

5.2.2 水力振動による応力評価方法

1次冷却材の流れによる振動については泊発電所3号機平成20年8月14日付け平成20・06・17原第1号にて認可された既工事計画にて実績のある、WV-1の式^(注1)又はPaidoussisの式^(注2)を用いて検討する。各燃料棒は9箇所を支持格子で支持されているが、支持格子ではさまれた代表的な1スパンについて評価する。

振動の要因には流路の非一様性による横流れ、燃料棒支持構造物の点で生じる流れのはく離及び乱流がある。WV-1の式又はPaidoussisの式は上述のような流れの乱れを有する軸方向流れに対する棒又は管の振動振幅の実験式であり、炉心内の流れに対しても適合できる。

(注1) J.R.Reavis, "Vibration Correlation for Maximum Fuel-Element Displacement in Parallel Turbulent Flow", Nuclear Science and Engineering, 38, 1969, pp.63-69

(注2) M.P.Paidoussis, "An Experimental Study of Vibration of Flexible Cylinders Induced by Nominally Axial Flow", Nuclear Science and Engineering, 35, 1969, pp.127-138

(1) A型燃料集合体

軸方向の流れに伴う乱れによって生じる水力振動振幅は、次に示すWV-1の式によって与えられる。

$$\delta = C \cdot \eta_d \cdot \eta_D \cdot \eta_L \cdot \frac{d \cdot L}{W \cdot f^{1.5} \cdot \zeta^{0.5}} \cdot U \cdot \rho \cdot \nu^{0.5}$$

ここで,

- δ : 振 幅 (mm)
- C : 不等係数 ($= 2.59 \times 10^{-3} C'$)
- η_d : 燃料棒直径に関する係数
- η_D : 水力的直径に関する係数
- η_L : スパン長さに関する係数
- d : 燃料棒直径 (mm)
- L : スパン長さ (mm)
- W : スパン当たりの燃料棒質量 (kg)
- f : 燃料棒の固有振動数 (Hz)
- D : 水力的直径 (mm)
- ζ : 減 衰 比
- U : 燃料棒の軸方向に沿った平均流速 (mm/s)
- ρ : 流体の密度 (kg/mm^3)
- ν : 流体の動粘性係数 (mm^2/s)

C' の値は第 5-4 図より, η_d , η_D , η_L の値については, 第 5-5 図より求める。
上式より, 燃料棒の最大振幅を求める。

その変位を燃料棒の中心部に与えたとき発生する応力を求める。ここで燃料棒の両端を単純支持と仮定すると, 中立軸から r_o の位置の被覆管断面に生じる応力は次式で与えられる。

$$\sigma_z = \pm \frac{48E \cdot r_o \cdot \delta}{5L^2}$$

ここで,

- σ_z : 振幅に対応する応力 (MPa)
- δ : 水力振動振幅 (mm)
- L : スパン長さ (mm)
- r_o : 燃料被覆管外半径 (mm)
- E : 燃料被覆管の縦弾性係数 (MPa)

(2) B型燃料集合体

1 次冷却材の軸方向流れによる振動により燃料被覆管に生じる応力を計算する。

燃料棒は 1 次冷却材の軸方向流れによって振動し, 燃料棒に曲げ応力が生じる。この 1 次冷却材による振動は, 次の Paidoussis の式により計算する。

$$\frac{\delta}{D} = \alpha^{-4} \left[\frac{\mu^{1.6} \cdot \varepsilon^{1.8} \cdot \text{Re}^{0.25}}{1 + \mu^2} \right] \left(\frac{D_h}{D} \right)^{0.4} \left[\frac{\beta^{2/3}}{1 + 4\beta} \right] \times [5 \times 10^{-4} K]$$

ここで、

D : 燃料棒直径 (mm)

δ : 振 幅 (mm)

D_h : 水力学的等価直径 (mm)

Re : レイノルズ数 = $\frac{D_h \cdot U}{\nu}$

μ : $\left(\frac{M}{E \cdot I} \right)^{1/2} U \cdot L$

M : 単位長さ当たりの流体の質量 (kg/mm)

E : 燃料被覆管の縦弾性係数 (MPa)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

U : 燃料棒の軸方向に沿った平均流速 (mm/s)

L : スパン長さ (mm)

β : $\frac{M}{(M+m)}$

m : 単位長さ当たりの燃料棒質量 (kg/mm)

ρ : 流体の密度 (kg/mm³)

ν : 流体の動粘性係数 (mm²/s)

ε : $\frac{L}{D}$

α : $\alpha^2 = \left[\frac{(m+M) L^4}{E \cdot I} \right]^{1/2} \cdot \omega$

ω : 燃料棒の固有角振動数 (Hz)

K : 流れの乱れのレベルを表わす因子
(実際の流れではK=5)

上式より、燃料棒の最大振幅を求める。

その変位を燃料棒の中心部に与えたとき発生する応力を求める。いま燃料棒の両端を単純支持と仮定すると、任意の直径を d とするとき、中立軸から $\frac{d}{2}$ の位置の燃料被覆管断面に生じる応力は次式で与えられる。

$$\sigma_z = \pm \frac{M \cdot d}{2 I} = \pm \frac{24 d \cdot E \cdot \delta}{5 L^2}$$

ここで、

σ_z : 振幅に対応する応力 (MPa)

M : 最大曲げモーメント $\frac{W \cdot L^2}{8}$ (N・mm)

d : 任意の直径 (mm) $\begin{cases} d_o : \text{燃料被覆管 外径 (mm)} \\ d_i : \text{燃料被覆管 内径 (mm)} \end{cases}$

I : 断面二次モーメント $\frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$ (mm⁴)

W : 等分布荷重 $\frac{384 E \cdot I \cdot \delta}{5 L^4}$ (N/mm)

δ : 振幅 (Paidoussis の式より求めた値) (mm)

L : スパン長さ (mm)

E : 燃料被覆管の縦弾性係数 (MPa)

5.2.3 地震による応力解析方法

燃料被覆管には、地震時において、燃料集合体の変形に応じた応力が発生するので、応力解析を行う。

(1) A型燃料集合体

水平方向応力解析モデルを第5-6図に示す。燃料棒、制御棒案内シンプル、スリーブ、インサート、上部ノズル、下部ノズル及び支持格子は、はり要素で、また支持格子ばね及びディンプルは、ばね-摩擦要素にて模擬している。ここで上部ノズル及び下部ノズルは固定、ノズルと制御棒案内シンプル及び制御棒案内シンプルと支持格子は剛結合、燃料棒と支持格子は弾性結合、ノズル及び支持格子は変形に対して剛とする。燃料棒及び制御棒案内シンプルについては、複数本あるのでそれぞれ等価な剛性を持つ2本のはりとして扱う。

鉛直方向応力解析モデルを第5-7図に示す。上部ノズル、下部ノズル、制御棒案内シンプル及び燃料棒等は、はり要素で、支持格子ばね及びディンプルは、ばね-摩擦要素で模擬している。

応力解析においては、地震応答解析で得られる各支持格子の最大変位における燃料集合体の振動モードを強制変位として、第5-6図の水平方向応力解析モデルに与えることにより水平地震による応力を求め、さらに、鉛直地震による応力を第5-7図の鉛直方向応力解析モデルにより求め、足し合わせ、地震時応力とする。

なお、解析に使用するコードは「ANSYS Ver. 11.0」である。評価に用いる解析コード「ANSYS Ver. 11.0」の検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す

(2) B型燃料集合体

水平方向応力解析モデルを第5-8図に示す。ここで、制御棒案内シンプルと上・下部ノズル及び最上・下部支持格子は固定、中間の7個の支持格子とは摩擦要素とばね要素で結合しフローティングを模擬している。また、燃料棒と支持格子は摩擦要素、ばね要素及び回転ばね要素を用いて結合し、ソフトストップ及びハードストップを模擬している。燃料棒については、たわみ方向と垂直な燃料棒列を考え、同一列に属するものを1本のはりとしてまとめ（剛性、断面二次モーメント等）、数本のはりとしてモデル化した。

また、制御棒案内シンプルについても同様なモデル化を実施した。

ノズル、支持格子については実験により求めた等価な物性値を持ったはり要素で代表している。

鉛直方向応力解析モデルを第5-9図に示す。ここで、制御棒案内シンプルと上・下部ノズル及び最上・下部支持格子は固定、中間の7個の支持格子とは摩擦要素とばね要素で結合しフローティングを模擬している。また、燃料棒と支持格子は摩擦要素、ばね要

素及び回転ばね要素を用いて結合し、ソフトストップ及びハードストップを模擬している。

水平地震による応力は、地震応答解析により得られる各支持格子の最大変位を、第5-8図の水平応力解析モデルにおいてそれが生じる支持格子に与えることによって求め、さらに、鉛直地震による応力を第5-9図の鉛直方向応力解析モデルにより求め、足し合わせ、地震時応力とする。

なお、解析に使用するコードは「NASTRAN Ver. 2012. 2. 0」である。評価に用いる解析コード「NASTRAN Ver. 2012. 2. 0」の検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

5.2.4 体積平均相当応力評価方法

燃料被覆管に生じる応力は、内外圧差による応力の他に水力振動による応力と地震による応力を加えた合応力が、内面から外面へと連続的に変化している。燃料被覆管の破損を判定するため耐力と比較する応力は、燃料被覆管にかかる平均的な応力（せん断ひずみエネルギー説に基づく体積平均相当応力）とする必要がある。体積平均相当応力とは、燃料被覆管にかかる合応力を体積の重みを付けて平均したもので、以下に示すとおりである。なお、本手法は泊発電所3号機平成20年8月14日付け平成20・06・17原第1号にて認可された既工事計画にて実績のある手法である*1。

まず、燃料被覆管任意半径 r における相当応力 $\sigma_{eff}(r)$ は以下の式で与える。

$$\sigma_{eff}(r) = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}}$$

これを軸方向単位長さ当たり、半径方向に体積積分（あるいは体積平均）をとり、体積平均相当応力 σ_{eff} を以下の式で求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{eff} &= \frac{\int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \sigma_{eff}(r) dz \cdot rd\theta \cdot dr}{\int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \int_0^1 dz \cdot rd\theta \cdot dr} \\ &= \frac{2 \int_{r_i}^{r_o} r \cdot \sigma_{eff}(r) dr}{r_o^2 - r_i^2} \end{aligned}$$

ここで、 r 、 θ 及び z は円筒座標系の変数であり、それぞれ半径方向、円周方向及び軸方向を表わす。

※1：体積平均相当応力評価方法について、以下の[]に泊発電所3号機平成20年8月14日付け平成20・06・17原第1号にて認可された既工事計画の抜粋を示す。

3.3.4 体積平均相当応力計算方法

燃料被覆管に生じる応力は、内外圧差による応力のほかに水力振動による応力と地震による曲げ応力を加えた合応力が、内面から外面へと連続的に変化している。燃料被覆管の破損を判定するため耐力と比較する応力は、燃料被覆管にかかる平均的な応力（せん断歪エネルギー説に基づく体積平均相当応力）とする必要がある。体積平均相当応力とは、燃料被覆管にかかる合応力を体積の重みを付けて平均したもので、以下に示すとおりである。

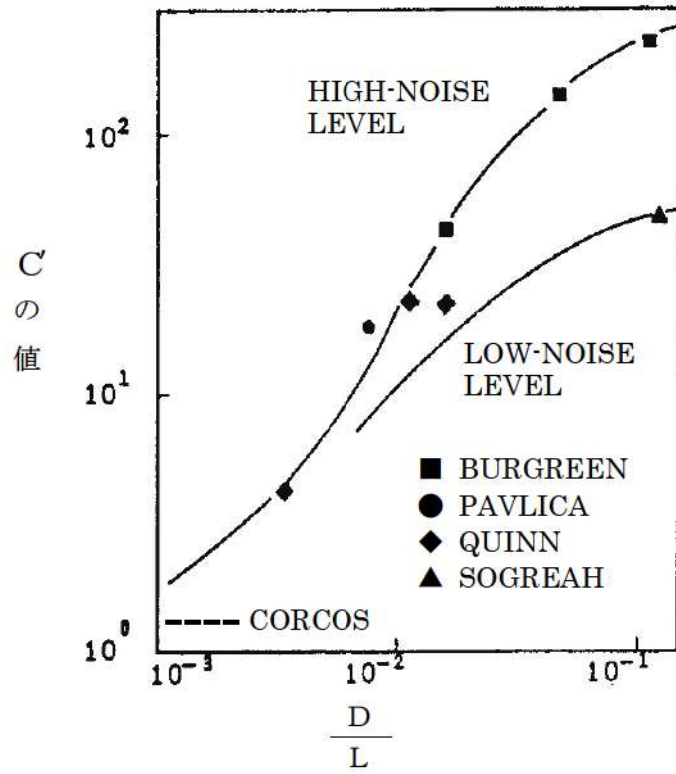
まず、燃料被覆管任意半径 r における相当応力 $\sigma_{eff}(r)$ は以下の式で与える。

$$\sigma_{eff}(r) = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}}$$

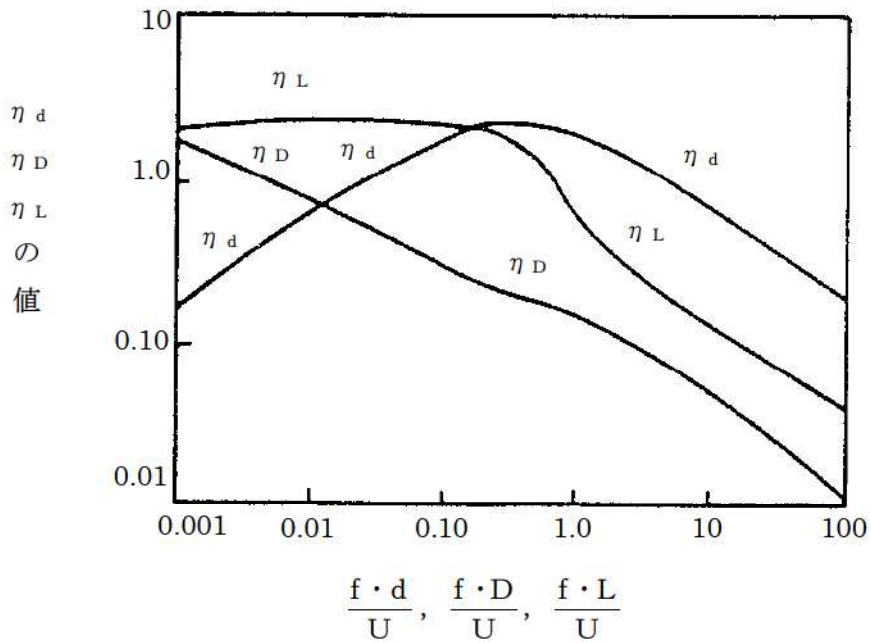
これを軸方向単位長さ当たり、半径方向に体積積分（あるいは体積平均）をとり、体積平均相当応力 σ_{eff} を以下の式で求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{eff} &= \frac{\int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \sigma_{eff}(r) \, dz \cdot r \, d\theta \cdot dr}{\int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \int_0^1 dz \cdot r \, d\theta \cdot dr} \\ &= \frac{2 \int_{r_i}^{r_o} r \cdot \sigma_{eff}(r) \, dr}{(r_o^2 - r_i^2)} \end{aligned}$$

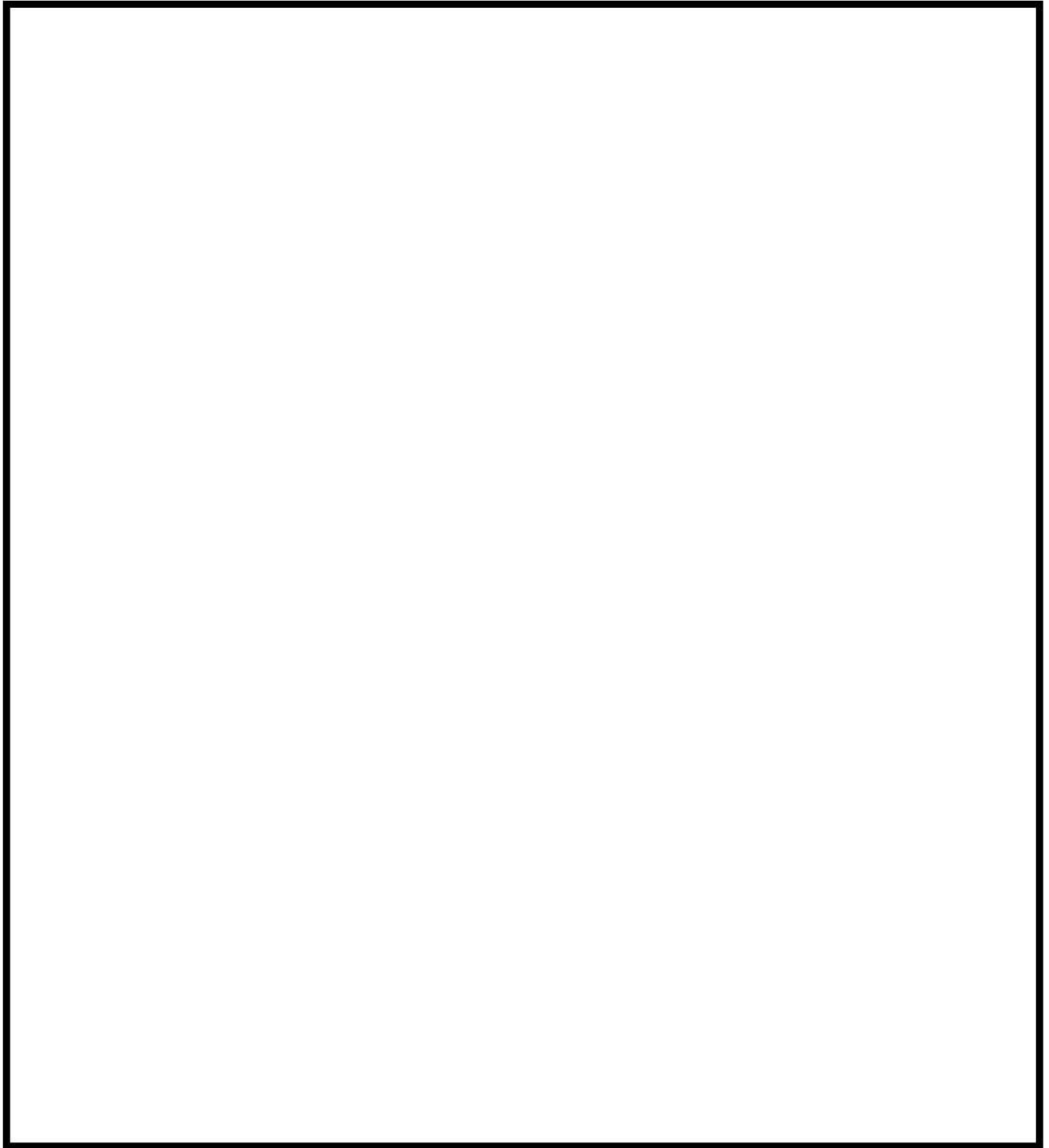
ここで、 r 、 θ 及び z は円筒座標系の変数であり、それぞれ径方向、周方向及び軸方向を表す。



第5-4図 不等係数 C の値




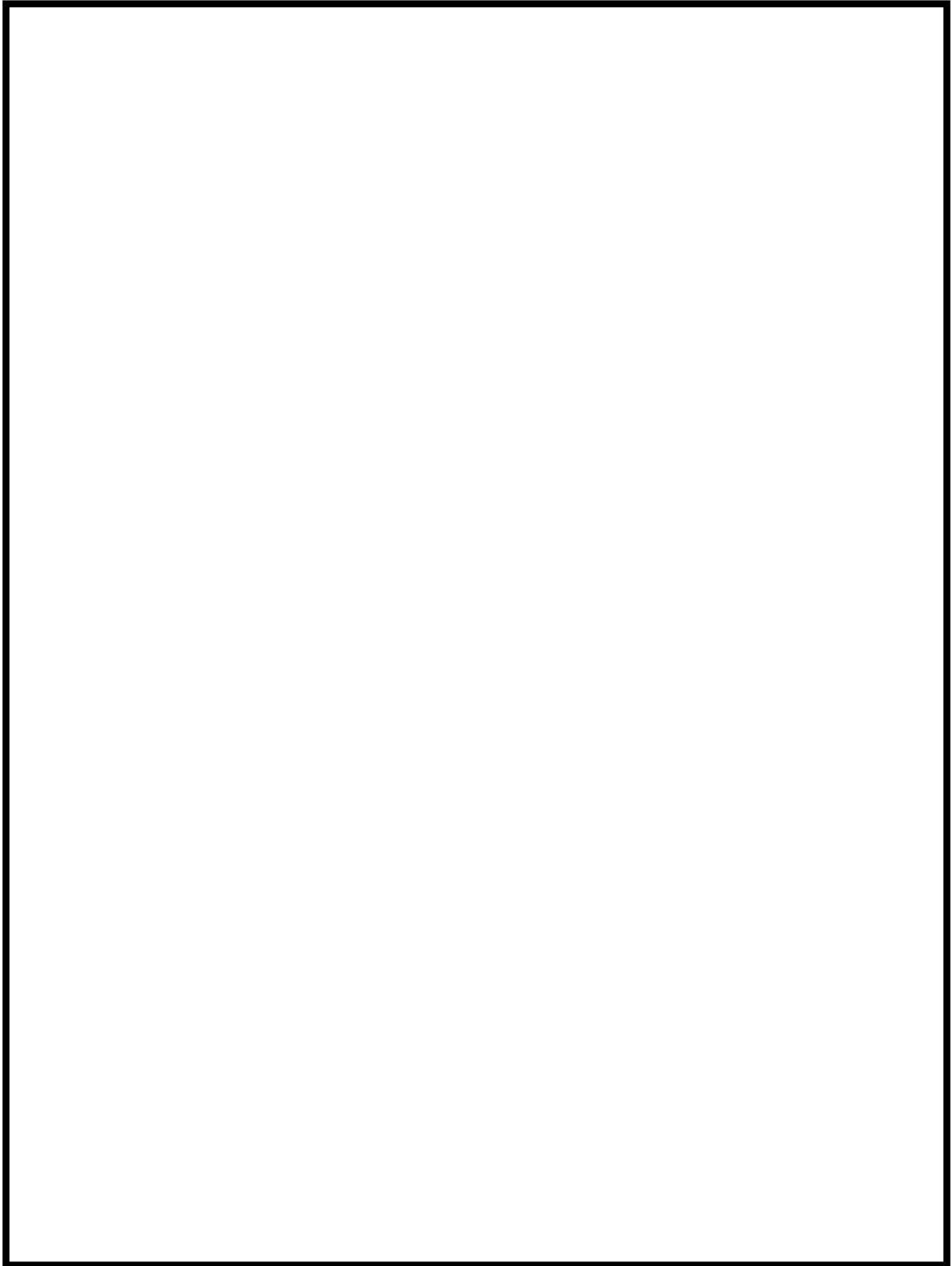
第5-5図 各係数 η_d , η_D , η_L の値



要素数：506（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料），574（ウラン燃料）
節点数：259（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料），327（ウラン燃料）

第5-6図 燃料棒及び制御棒案内シンプルの水平方向応力解析モデル（A型燃料）


 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



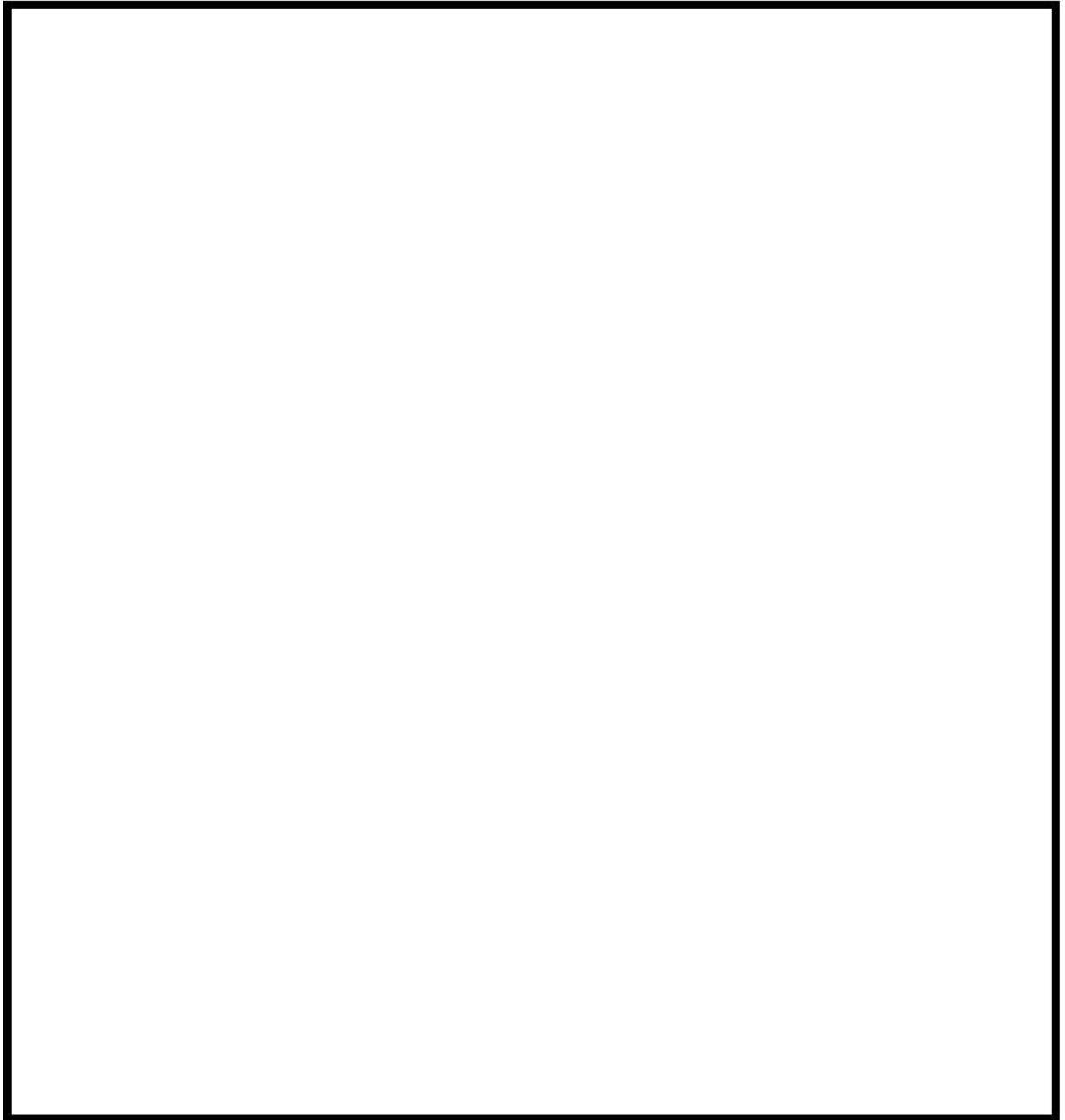
要素数 : 52

節点数 : 43

第5-7図 燃料棒及び制御棒案内シンプルの鉛直方向応力解析モデル (A型燃料)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。


4条-別紙5-別添2-22

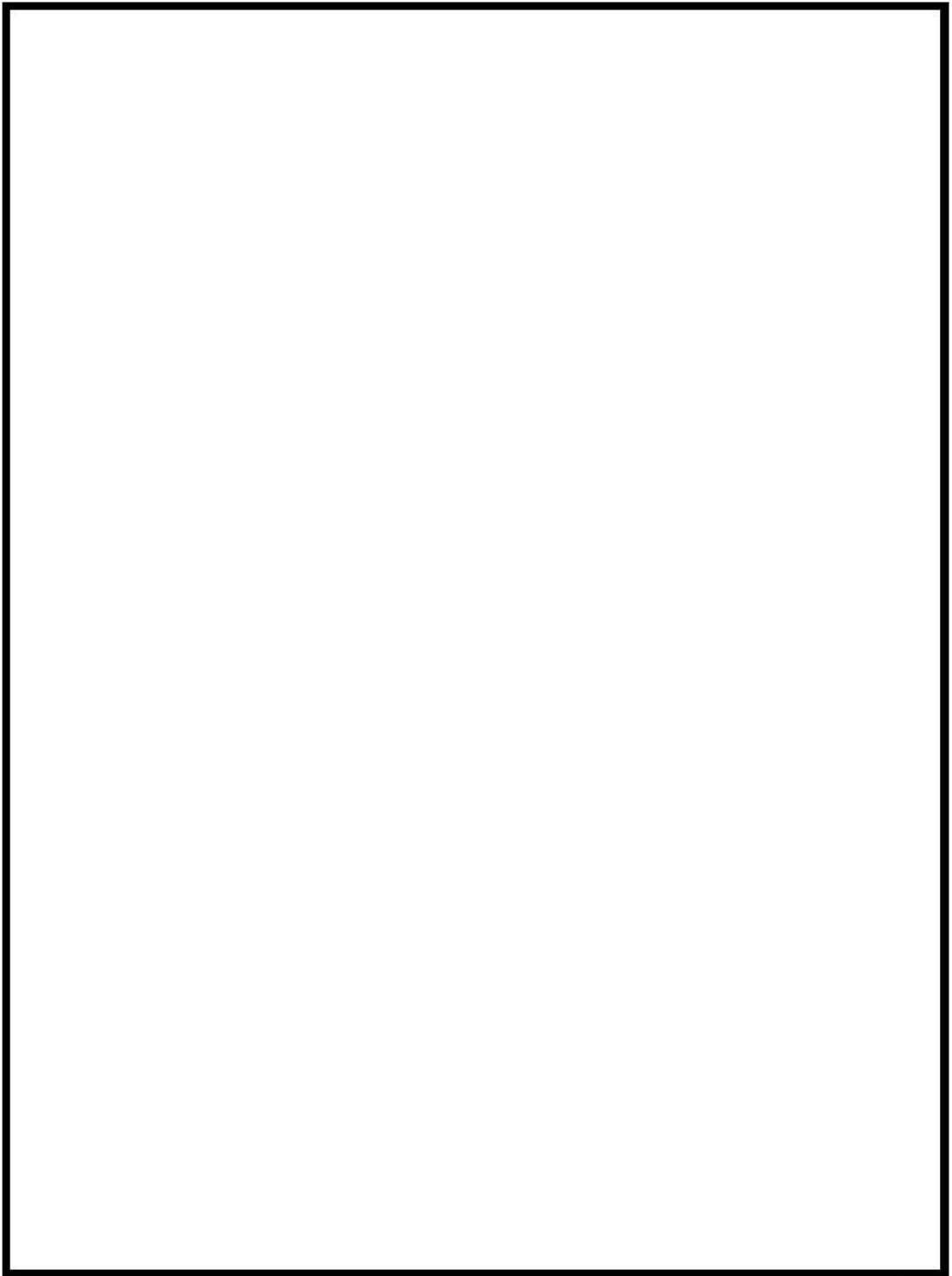


要素数
節点数



第5-8図 燃料棒及び制御棒案内シンプルの水平方向応力解析モデル（B型燃料）

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。




要素数

節点数

--

第 5-9 図 燃料棒及び制御棒案内シンプルの鉛直方向応力解析モデル (B型燃料)

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

別添資料 3 燃料被覆管応力評価方法及び 疲労評価方法に係る公開文献の抜粋

○資料

【三菱公開文献】

- ・ MAPI-1019 三菱 PWR の燃料設計計算コードの概要 改 1
- ・ MNF-1001 三菱 PWR 高燃焼度化ステップ 2 燃料の機械設計

【原燃工公開文献】

- ・ NFK-8011 燃料棒性能解析コード (FPAC) 改 4
- ・ NFK-8011 燃料棒性能解析コード (FPAC) 改 11
- ・ NFK-8134 原燃工製 PWR ステップ 2 燃料の機械設計について (泊 1, 2, 3 号) 改 1
- ・ NFK-8135 MOX 燃料の機械設計について (泊 3 号)



MAPI-1019
改1昭和63年5月

三菱PWRの燃料設計計算コードの概要

昭和49年10月

三菱原子力工業株式会社

—————MITSUBISHI ATOMIC POWER INDUSTRIES, INC—————

()



2.5 被覆管応力

被覆管応力の要因として、内外圧差やペレット-被覆管相互作用による応力、熱応力があるが、これらの応力はFINEコード内で計算される。以下にそれぞれの計算式を示す。

2.5.1 内外圧差及び接触圧による応力

次のような内外圧を受ける厚肉円筒公式を用いる。

$$\sigma_r = \frac{1 - K^2 / R^2}{K^2 - 1} P' - \frac{K^2 - K^2 / R^2}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_\theta = \frac{1 + K^2 / R^2}{K^2 - 1} P' - \frac{K^2 + K^2 / R^2}{K^2 - 1} P_o$$

$$\sigma_z = \frac{1}{K^2 - 1} P' - \frac{K^2}{K^2 - 1} P_o$$

但し、

$$K = r_o / r_i$$

$$R = r / r_i$$

ここで、
 σ_r : 被覆管半径方向応力, kg/mm^2
 σ_θ : 被覆管円周方向応力, kg/mm^2
 σ_z : 被覆管軸方向応力, kg/mm^2
 P' : 内圧とペレット-被覆管接触圧の和 ($P_i = P_o$), kg/mm^2
 P_o : 外圧, kg/mm^2
 r_o : 被覆管外半径, mm
 r_i : 被覆管内半径, mm
 r : 被覆管任意半径, mm

また、接触圧 P_c は次の簡化式の式を用いて計算する。

$$P_c = \frac{\delta}{r_i} \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \times \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{\nu_1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2}$$

ここで、
 r_i : 燃料棒中心から接触面までの距離, mm
 r_o : 被覆管外半径, mm
 δ : ペレットと被覆管の相互干渉 (半径分), mm
 ν_1, ν_2 : 被覆管及びペレットのポアソン比
 E_1, E_2 : 被覆管及びペレットの弾性係数, kg/mm^2





2.5.2 熱応力

被覆管内の半径方向温度分布は次式で計算される。

$$T(r) = \frac{T_o \cdot \ln(r/r_i) + T_i \cdot \ln(r_o/r)}{\ln k}$$

但し、 $K = r_o/r_i$

ここで、 T_i : 被覆管内面温度、℃ r_i : 被覆管内半径、mm
 T_o : 被覆管外面温度、℃ r_o : 被覆管外半径、mm
 r : 被覆管任意半径、mm

この温度分布をもとに三軸方向の熱応力 σ_r , σ_θ , σ_z は各々次の円筒の熱応力式で計算される。

(i) 半径方向応力

$$\sigma_r = \frac{\alpha E_1}{2(1-\nu_1)} \{ [K^2 T_o - T_i] - (T_o - T_i)(r_o/r)^2 \} / [K^2 - 1] - T(r)$$

(ii) 接線方向応力

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E_1}{2(1-\nu_1)} \{ [K^2 T_o - T_i] + (T_o - T_i)(r_o/r)^2 \} / [K^2 - 1] - (T_o - T_i) / \ln k - T(r)$$

(iii) 軸方向応力

$$\sigma_z = \left(\frac{\alpha E_1}{1-\nu_1} \right) \{ [K^2 T_o - T_i] / [K^2 - 1] - (T_o - T_i) / 2 \ln k - T(r) \}$$

ここで、 α : 被覆管熱膨張率、1/℃
 E_1 : 被覆管ヤング率、kg/mm²
 ν_1 : 被覆管ポアソン比

MNF-1001

三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計

平成21年6月

三菱原子燃料株式会社

4条-別紙 5-別添 3-5

1117

4.1.2 設計基準

三菱 PWR 高燃焼度化ステップ2燃料棒設計は、従来の燃料棒の設計と同様に、燃料寿命中、通常運転時および運転時の異常な過渡変化時における燃料健全性の観点から、表 4.1.2-1にまとめる5つの基準に基づいている。

なお、これらの基準は、原子力安全委員会安全審査指針「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針(平成2年8月30日)」、原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日)」、原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について(昭和51年2月16日)」等に記載されている考え方に基づいている。

(1) 燃料温度

ペレットが溶融すると体積が膨張し、被覆管に大きな応力が発生し、また、燃料スタックの寸法不安定性あるいは、FP ガスの過度な放出・移動、さらにはペレットと被覆管の有害な化学反応を引き起こす恐れがある。これらを防ぐため、寿命中の燃料最高温度(中心温度)を燃料の溶融点未満とする。

溶融点は、未照射状態における UO_2 ペレットに対して $2800^{\circ}C$ 、また高濃度ガドリニア入りペレット^{*10}では $2700^{\circ}C$ である。燃料中心温度の各燃焼度に対する解析上の制限値は、溶融点の燃焼に伴う低下、ならびに計算モデルの不確定性および燃料の製造公差に基づく燃料中心温度の不確定性 $220^{\circ}C$ を考慮し、以下の通りとする。

① UO_2 ペレット

未照射燃料では不確定性 $220^{\circ}C$ を考慮し、 $2580^{\circ}C$ とする。以降燃焼に伴い $10,000MWd/t$ あたり $32^{\circ}C$ の割合で低下するとする。

② ガドリニア入りペレット^{*10}

未照射燃料では不確定性 $220^{\circ}C$ を考慮し、 $2480^{\circ}C$ とする。以降燃焼に伴い $10,000MWd/t$ あたり $32^{\circ}C$ の割合で低下するとする。

(2) 燃料棒内圧

通常運転時において、寿命初期では内圧は外圧を下回っており、被覆管は内向きのクリープ変形により径が減少してペレットとの接触に到る。その後、寿命中期以降、ペレットより放出された FP ガスの蓄積により内圧が増加し、寿命末期では内圧が外圧を超える可能性がある。このような内圧支配に到った状態では被覆管は外向きのクリープ変形により外径が増加し、一旦接触したペレットと被覆管にギャップが生じる可能性がある。このギャップが開くことによりギャップコンダクタンスが低下して燃料温度が上昇すると、さらに FP ガスが放出されて内圧が上昇し、その結果、さらにギャップが広がるといったいわゆるサーマル

^{*10}: ガドリニア濃度 10wt%の場合。

フィードバックを起こす可能性がある。このような状態での燃料使用は、燃料温度の過大な上昇を招くこととなり望ましい状況ではない。このサーマルフィードバックを防ぐために、燃料棒内圧は、通常運転時において、被覆管の外向きクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えない設計とする。

ここで、燃料棒内圧基準値は、原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」に記載された方法に基づき、改良被覆管の特性等を適切に評価できる燃料棒設計計算コードを用いて求めており、複数の燃料タイプに対して炉心運用を想定し、さらに評価の不確定性を考慮して求めた具体的判断基準値として、19.7MPaを設定する。

(3) 被覆管応力

内外圧差およびペレットとの接触圧等により生じる被覆管応力を、被覆管の過度な変形を防ぐため、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を通して燃料寿命中、被覆材の耐力以下とする。

MDA および ZIRLO 被覆管の耐力は、ジルカロイ-4の耐力と同等であり、使用温度および高速中性子の照射効果を考慮すると約 310N/mm^2 ～約 590N/mm^2 となる。被覆管応力基準値は、これに基づき設定する。

(4) 被覆管歪

被覆管の過大な変形を防ぐため、被覆管円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に際して1%を超えない設計とする。

(5) 周期的な被覆管歪(疲労損傷係数)

被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えない設計とする。

具体的には、燃料寿命中の起動停止や負荷変化により被覆管にかかる応力サイクル数と、それぞれの応力振幅に対応して設計疲労曲線から求まる設計許容繰返し数との比の累積である累積疲労損傷係数が1.0を超えないことを評価する。なお、改良被覆管の疲労強度は、ジルカロイ-4の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnell⁽²⁸⁾の曲線を使用する。

表4.1.2-1 燃料棒設計における基本的考慮事項と設計基準

項目	基本的考慮事項	設計基準
(1) 燃料温度	1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。 2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。 3) FP ガスの過度の放出あるいは移動を防ぐ。 4) 燃料と被覆管の有害な化学反応を防ぐ。	UO ₂ ペレットおよびガドリニア入りペレットそれぞれの溶融点未満であること。
(2) 燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果による燃料温度の過度な上昇を防ぐ。	通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形により、ペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。
(3) 被覆管応力	通常運転時および運転時の異常な過渡変化時を通じて被覆管の健全性を確保する。	被覆材の耐力以下であること。
(4) 被覆管歪		円周方向引張歪*が1%以下であること。
(5) 周期的な被覆管歪	日間負荷変動を含む種々の設計過渡条件に対して被覆管の健全性を確保する。	ASME Sec. III の概念による設計疲労寿命以下であること。

* ;各過渡変化に対する変化量

NFK-8011

改1 昭和52年 6月
改2 昭和54年 11月
改3 昭和56年 1月
改4 昭和63年 3月

燃料棒性能解析コード
(FPAC)

昭和51年8月

原子燃料工業株式会社

2-5 燃料棒内圧

燃料棒の内圧は内部のガスが理想気体と仮定して次式で計算する。

$$P = nR / \sum_i (V_i / T_i)$$

- P ; 内圧
 n ; ガスのモル数
 R ; ガス定数
 V_i ; 各空間体積
 T_i ; 各空間の温度

内部ガスとしては、初期封入ガス、核分裂生成ガス、ペレットに吸着されたガス等を考慮する。核分裂生成ガスとしてはXe, Krを考慮している。

空間体積としては、ブレナム、ペレットと被覆管のギャップ、ディッシュ、チャンファ、クラック、オープンポアなどが考慮される。

2-6 被覆管応力

(1) 内外圧差による応力

応力は、その主方向が円筒座標の座標軸方向と一致し、(せん断応力は零として計算する。) その方向が変化しないと仮定して計算する。

応力の計算は次の2つの場合に分けて行なう。

(i) 被覆管がペレットと接触していない時

弾性限界内であれば、内外圧のみから次の円筒の式を用いて計算する。

$$\sigma_{\theta} = -\frac{r_i^2 r_o^3 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_z = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

- ここで
- | | | | |
|-------------------|---|--------|--------------------|
| σ_r | ; | 半径方向応力 | kg/cm ² |
| σ_{θ} | ; | 円周方向応力 | kg/cm ² |
| σ_z | ; | 軸方向応力 | kg/cm ² |
| r _i | ; | 被覆管内半径 | cm |

r_o ; 被覆管外半径 mm
 P_o ; 冷却材圧力(外圧) kg/cm²
 P_i ; 内圧 kg/cm²

(2) 被覆管がペレットと接触している時

(1)に記した式において内圧にペレットと被覆管の接触圧を加えて計算する。

接触圧はいわゆる焼きばめの式を用いて計算する。この時、ペレット及び被覆管のヤング率はそれぞれUO₂及びジルカロイ-4のヤング率を用いる。ただし、ペレットに、並びかえ(リロケーション)による外径の増加分が残っている間はペレットは小さな外力で収縮し、大きな接触圧は生じないとモデル化している。

応力が弾性限界内であるかは、Von Misesの理論に基づいて判定する。

弾性限界内でなければPrandl-Reussの式を用いてくり返し計算で応力を求める。

(2) 熱 応 力

被覆管の内外面に温度差がある場合には、被覆管に熱応力が生ずる。

本計算コードで使用している基本式は次のとおりである。

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{r^2(1-\nu)} \left[- \int_{r_i}^r T(r) r dr + \frac{r^2 - r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{E\alpha}{r^2(1-\nu)} \left[-T(r) r^2 + \int_{r_i}^r T(r) r dr + \frac{r^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right]$$

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[-T(r) + \frac{2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \right]$$

ここで

$$T(r) = \frac{T_i - T_o}{\log r_i - \log r_o} \log r + \frac{T_o \log r_i - T_i \log r_o}{\log r_i - \log r_o}$$

σ_r	;	半径方向応力
σ_θ	;	円周方向応力
σ_z	;	軸方向応力
r_i	;	被覆管内半径
r_o	;	被覆管外半径
E	;	被覆管のヤング率
α	;	熱膨張係数(被覆管)
ν	;	ポアソン比
T_i	;	被覆管の内面温度
T_o	;	被覆管の外面温度

INFK-8011

改1	昭和	52年	6月
改2	昭和	54年	11月
改3	昭和	55年	1月
改4	昭和	63年	3月
改5	平成	14年	4月
改6	平成	14年	8月
改7	平成	14年	12月
改8	平成	15年	7月
改9	平成	17年	11月
改10	平成	21年	6月
改11	平成	21年	10月

燃料棒性能解析コード

(FPAC)

昭和51年8月

原子燃料工業株式会社

高燃焼度用FPACの適用範囲について

高燃焼度用FPACコードは、従来のFPACコード⁴⁾に改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見等を反映したものであり、主要な特徴は以下のとおりである。

- ・ ペレット照射挙動は、ペレット熱伝導率の燃焼度依存性等の最近の知見を反映したモデルにより評価している。
- ・ 被覆管照射挙動は、各被覆管の特性を反映したモデルにより評価しており、改良被覆管を用いるステップ2燃料に加えジルカロイ-4製被覆管を用いた従来燃料についても評価できる機能を有している。

高燃焼度用FPACの従来燃料への適用性を表1にまとめる。本コードの実証性は、本文中において照射挙動項目毎に計算値と実測値の比較により示している。

これらのことから、高燃焼度用FPACコードは、ステップ2燃料の健全性評価に加えて従来燃料の健全性評価にも使用できる。

表1 高燃焼度用FPACコードの従来燃料への適用性

計算項目	挙動評価モデル	高燃焼度用FPACコード における追加・変更点	従来燃料への 適用性評価	参照図
燃料温度	ペレット被覆管 ギャップ温度	ギャップコンダクタンス	従来燃料のペレット仕様 を含む燃料の照射データ に対しても実証性が確認 できている。	第3-2図 (1/3)
	ペレット内温度分布	ペレット熱伝導率式		第3-2図 (2/3)
燃料棒 寸法変化	ペレットスプリング	固体FPスプリングの燃焼 度依存性	従来燃料のペレット仕様 を含む燃料の照射データ に対しても実証性が確認 できている。	第3-6図 (1/2)
	ペレットリケーション	ペレットと被覆管接触後 の ペレット剛性		第3-3図 (3/4)
	被覆管クランプ変形	被覆管タイプ別に評価 式の定数を設定	低Snジロイ4製被覆 管の照射データに対 して実証性が確認でき ている。 従来Snジロイ4は変 更無し。	第3-3図 (3/4)
	被覆管照射成長	被覆管タイプ別に評価 式の定数を設定		第3-7図
燃料棒 内圧	FPガス放出	FPガス放出評価式 (ペレット熱伝導率)	従来燃料のペレット仕様 を含む燃料の照射データ に対しても実証性が確認 できている。	第3-4図 (1/2)
被覆管 応力	内外圧差及び接 触圧による応力	有限要素法を使用		第3-4図 (2/2) 第3-5図 (1/2) 第3-3図 (3/4)
被覆管腐食 及び 水素吸収	被覆管腐食	被覆管タイプ別に評価 式の定数を設定	従来Snジロイ4は変 更無し。 低Snジロイ4製被覆 管の照射データに対 して実証性が確認でき ている。	第3-8図 第3-9図
	水素吸収量	被覆管タイプによらず 同一の水素吸収率を設 定		従来Snジロイ4/低Sn ジロイ4製被覆管の照 射データに対して実証 性が確認できている。

(参考文献)

[1] 原子燃料工業, "燃料棒性能解析コード (FPAC)", NFK-8011 改4, 1988

NFK-8134

改1 平成18年9月

原燃工製 PWR ステップ2 燃料の 機械設計について

(泊1、2、3号)

平成17年11月

原子燃料工業株式会社

(2) 燃料棒内圧

燃料棒内圧に対しては、燃料温度の過大な上昇防止の観点から“通常運転時において被覆管の外向きクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと”としており、設計基準である限界内圧以下であることを確認する。

ここで、限界内圧は高燃焼度用 FPAC により評価した値を用いる。限界内圧の評価では高燃焼度用 FPAC を用いて燃料棒内圧が高くなるような仮想的な計算を行い、図 3-4 に示すようにペレットと被覆管のギャップが増加し始める時の内圧(18.6MPa(abs))を限界内圧とする。

(3) 被覆管応力

被覆管応力は被覆管の耐力(0.2%オフセット)以下となるように設計する。被覆管応力評価では、内外圧差による応力、ペレット・被覆管の接触応力、熱応力、地震による応力、及び水力振動による応力を考慮する。ここで被覆管の耐力には照射による増加及び温度依存性を考慮している。

(4) 被覆管歪

燃料ペレットのスエリング及び熱膨張により被覆管に引張歪が発生するが、この歪変化量は被覆管の健全性に影響を与えない範囲に保つ必要があることから、設計基準としては、“被覆管の円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に対して1%以下であること”としている。

(5) 被覆管疲労損傷

燃料棒は原子炉に装荷されてから取出されるまでの間、出力変動及び圧力変動を受け、これにより繰返し応力が被覆管に加わる。この繰返し応力は、ASME ボイラ及び圧力容器コード第 3 章(ASME Sec. III)に準拠した方法により評価し、累積疲労サイクル数と設計疲労寿命との比として表される累積疲労損傷係数が1.0を超えないように設計する。

MOX 燃料の機械設計について
(泊 3 号)

平成 20 年 12 月

原子燃料工業株式会社

3.3. 燃料棒の設計基準

3.3.1. 燃料中心温度

燃料中心温度は、ペレットの溶融点未満となるよう設計する。

MOX 燃料の溶融点は、Pu 含有率の増加に伴い低下する。そこで MOX 燃料の融点は、PWR 炉心での使用を想定し最大 Pu 含有率 13wt%時の融点 2730℃とする。また溶融点の燃焼に伴う低下は二酸化ウラン燃料と同じく、32℃/10,000MWd/t とする。^[3] さらに設計では評価モデル及び製造公差に基づく不確定性として 220℃を考慮した値を制限値として用いる。この制限値をステップ 2 二酸化ウラン燃料及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料とともに以下に示す。

MOX 燃料	: 2,510℃
ステップ 2 二酸化ウラン燃料	: 2,580℃
ステップ 2 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料	: 2,480℃

3.3.2. 燃料棒内圧

燃料棒内圧は、燃料温度の過大な上昇防止の観点から“通常運転時において被覆管の外向きクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと”としており、設計基準である限界内圧以下であることを確認する。ここで、限界内圧は高燃焼度用 FPAC により評価した値を用いる。限界内圧の評価では高燃焼度用 FPAC を用いて燃料棒内圧が高くなるような仮想的な計算を行い、図 3-2 に示すようにペレットと被覆管のギャップが増加し始める時の内圧 (18.6MPa[abs]) を限界内圧とする。

3.3.3. 被覆管応力

被覆管応力は、被覆管の耐力 (0.2%オフセット) 以下となるように設計する。被覆管応力評価では、内外圧差による応力、ペレットと被覆管の接触応力、熱応力、地震による応力及び水力振動による応力を考慮する。ここで、被覆管の耐力は照射による増加及び温度依存性を考慮している。^[4]

3.3.4. 被覆管歪

ペレットのスエリング及び熱膨張により被覆管に引張歪が発生する。この歪変化量は被覆管の健全性に影響を与えない範囲に保つ必要があることから、設計基準としては、“被覆管の円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に対して 1%以下であること”としている。

3.3.5. 被覆管疲労損傷

燃料棒は原子炉に装荷されてから取り出されるまでの間、出力変動及び圧力変動を受け、これにより繰り返し応力が被覆管に加わる。この繰り返し応力は、ASME Sec. III に準拠した方法に

より評価し、累積疲労サイクル数と設計疲労寿命との比として表される累積疲労損傷係数が 1 を超えないように設計する。

泊発電所 3 号炉

土木構造物の解析手法及び
解析モデルの精緻化について

目次

1. 屋外重要土木構造物等の評価手法の概要
2. 土木学会マニュアルの適用性について
 - 2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について
 - 2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について
 - 2.2.1 せん断耐力評価式
 - 2.2.2 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価
3. 屋外重要土木構造物等の減衰定数
 - 3.1 減衰の設定について
 - 3.2 建設工認と今回工認の相違について
4. 耐震性能照査の手順
5. 参考文献

参考資料1 取水口の評価方針

参考資料2 Rayleigh 減衰の設定の妥当性について

1. 屋外重要土木構造物等^(注)の評価手法の概要

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価について、泊発電所3号炉の今回の工事計画認可申請書（以下「今回工認」という。）では、屋外重要土木構造物等の変位や変形をより実状に近い応答に精緻化することを目的に、評価手法の高度化として、解析手法と減衰定数の変更を予定している。泊発電所3号炉の建設時の工事計画認可（平成15年11月）（以下「建設工認」という。）と今回工認との手法の比較を第6-1表に示す。

（注）以下のいずれかに該当するか、又は兼務する構造物を「屋外重要土木構造物等」という。

- ・屋外重要土木構造物
- ・常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備のうち土木構造物
- ・常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く）のうち土木構造物
- ・波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設のうち土木構造物

建設工認との相違点のうち、解析手法として適用している「時刻歴応答解析、限界状態設計法」は、新規制基準対応工認にて適用例がある手法である。

なお、土木構造物の地震時の挙動は、地盤の影響を受けることを踏まえると、地盤特性を適切にモデル化することにより、実応答に近い形で評価できるものと考えられる。このため、コンクリート強度は、建設工認と同じく設計基準強度を採用する方針とする。

第6-1表 建設工認と今回工認との手法の比較

	解析手法	解析モデル	減衰定数	コンクリート強度
建設工認	周波数応答解析 許容応力度法	地質データに基づく FEMモデル	構造物の減衰5%	設計基準強度
今回工認	時刻歴応答解析 限界状態設計法又は 許容応力度法	地質データに基づく FEMモデル	構造物の履歴減衰 ^(注) +Rayleigh減衰	設計基準強度
比較結果	●異なる	○同じ	●異なる	○同じ
適用例	○あり	○あり	○あり	○あり

（注）構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh減衰のみとする。

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価については、建設工認では、第6-2表に示すとおり、地震応答解析手法として周波数応答解析を採用し、許容応力度法による設計として、構造部材の曲げ及びせん断について許容応力度に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としていた。

今回工認では、第6-3表に示すとおり、屋外重要土木構造物等の地震応答解析手法に時刻歴応答

解析を適用した限界状態設計法による設計を採用する。減衰定数は、構造物の履歴減衰及び Rayleigh 減衰とする。なお、構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみとする。

構造部材の曲げについては限界層間変形角又は許容応力度に対して十分な安全余裕を持つこと、せん断についてはせん断耐力又は許容応力度に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。また、各設備の要求機能（支持機能、通水機能、貯水機能、止水機能）を踏まえて照査項目・内容を追加する。

支持機能及び通水機能が要求される構造部材については、目標性能としては部材が終局状態に至らないことが求められるため、構造部材の曲げについては限界層間変形角、終局状態に対する限界ひずみ、終局曲率又は許容応力度に対して十分な安全余裕を持つこと、せん断についてはせん断耐力又は許容応力度に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

貯水機能及び止水機能が要求される構造部材については、第 6-4 表に示す「水道施設耐震工法指針・解説 2009」に規定されている照査基準のとおり、漏水が生じるような顕著な（部材を貫通するような）ひび割れが発生しないよう、目標性能としては鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下になることが求められるため、構造物の曲げについては、許容応力度又は構造部材の曲げ-曲率関係（ $M-\phi$ 曲線）にて、応答が第 6-1 図に示す鉄筋降伏に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。せん断については、許容応力度又はせん断耐力に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。

ただし、取水口は、無筋コンクリート造のマスコンクリートであり、その他の屋外重要土木構造物等と構造が異なることから、要求機能に対する目標性能を個別に設定することとし、評価方針の詳細について参考資料 1 に示す。

「2. 土木学会マニュアルの適用性について」では、「耐震設計に係る工認審査ガイド」において、適用実績のある耐震設計に関連した規格及び基準等で示されていないが、先行サイトの審査で実績のある「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005）」（以下「土木学会マニュアル」という。）の適用性について検討を行う。

第 6-2 表 耐震評価条件整理一覧表 (建設工認)

分類	設備名称	要求機能	要求機能に対する 目標性能	許容限界		解析手法	減衰	解析モデル
				曲げ	せん断			
設計基準 対象施設 のうち屋 外重要土 木構造物	取水路	通水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	周波数応答解析	構造物の減衰 5%	地震データに基づく FEM モデル
	取水ピットスクリーン室	通水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	周波数応答解析	構造物の減衰 5%	地震データに基づく FEM モデル
	取水ピットポンプ室	通水機能 間接支持機能	終局状態に至らない	コンクリート許容応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	周波数応答解析 三次元静的線形解析	構造物の減衰 5%	地震データに基づく FEM モデル
	原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレート室	間接支持機能	終局状態に至らない	コンクリート許容応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	周波数応答解析 三次元静的線形解析	構造物の減衰 5%	地震データに基づく FEM モデル
	原子炉補機冷却海水管ダクト	間接支持機能	終局状態に至らない	コンクリート許容応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	周波数応答解析	構造物の減衰 5%	地震データに基づく FEM モデル

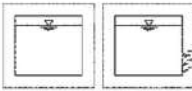
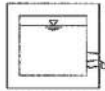
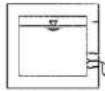
第 6-3 表 耐震評価条件整理一覧表 (今回工認)

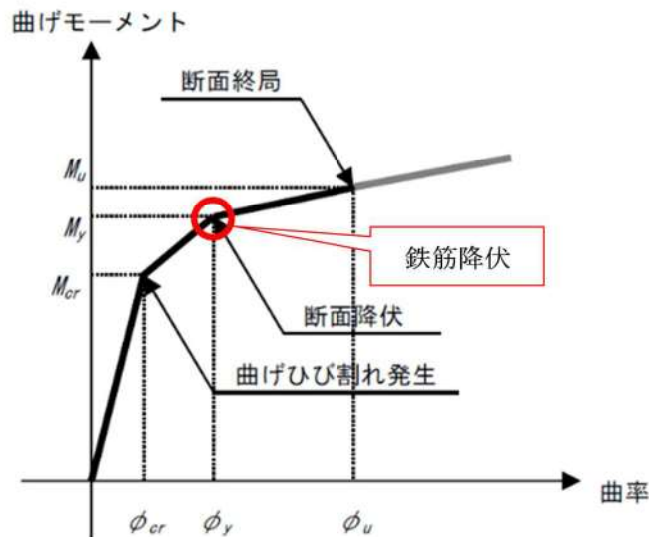
分類	設備名称	要求機能	要求機能に対する 目録性能	許容限界		解析手法	減衰	解析モデル	
				曲げ	せん断				
屋外重要 土木構造物等	取水口	通水機能	護岸コンクリートが滑動、転倒しない	—	—	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	護岸コンクリートに貫通するような 顕著なひび割れが生じない 護岸コンクリート前面側の表面に通 水方向のひび割れが生じない	—	—				
		支持機能	アンカー定着部周辺にひび割れが生 じない	—	—				
	取水塔	通水機能	終局状態に至らない	限界開閉変形角	せん断耐力	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰 + 構造物の履歴減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	M-φ 曲線における鉄筋降伏点	せん断耐力				
		支持機能	終局状態に至らない	限界開閉変形角	せん断耐力				
	取水ピット/ストレーン室	通水機能	終局状態に至らない	限界開閉変形角	せん断耐力	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰 + 構造物の履歴減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	M-φ 曲線における鉄筋降伏点	せん断耐力				
		支持機能	終局状態に至らない	限界開閉変形角	せん断耐力				
	波及的影響を 及ぼすおそれ のある下位ク ラス施設のうち 土木構造物 (注 1)	原子炉建屋冷却海水ポンプ出口ストレーン室	通水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	時刻歴応答解析 三次元的動的解析	Rayleigh 減衰	地質データに基づく FEM モデル
			貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	コンクリート許容圧縮応力度	許容せん断応力度			
			止水機能	終局状態に至らない	鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度			
原子炉建屋冷却海水管ダクト		通水機能	終局状態に至らない	限界開閉変形角	せん断耐力	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰 + 構造物の履歴減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	コンクリート許容圧縮応力度	許容せん断応力度				
		支持機能	終局状態に至らない	鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度				
B1、B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ		通水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰 + 構造物の履歴減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	コンクリート許容圧縮応力度	許容せん断応力度				
		支持機能	終局状態に至らない	鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度				
取水口 L 型溝壁 (A)		通水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰	地質データに基づく FEM モデル	
		貯水機能	鉄筋が降伏しない 発生せん断力がせん断耐力以下	コンクリート許容圧縮応力度	許容せん断応力度				
		支持機能	終局状態に至らない	鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度				
3号炉バックアップコンクリート	通水機能	L 型溝壁が滑動、転倒しない 終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度	(注 2)	—	—		
	貯水機能	3号炉バックアップコンクリートが 滑動、転倒しない 終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度					
	支持機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度					
分解ヤード	通水機能	終局状態に至らない	曲げ耐力 終局曲率	せん断耐力	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰 + 構造物の履歴減衰	地質データに基づく FEM モデル		
	貯水機能	終局状態に至らない	許容曲げ応力度	許容せん断応力度					
	支持機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度					
構内排水設備 (排水管)	通水機能	終局状態に至らない	許容曲げ応力度	許容せん断応力度	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰	地質データに基づく FEM モデル		
	貯水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度					
	支持機能	終局状態に至らない	許容曲げ応力度	許容せん断応力度					
衝突防止工	通水機能	終局状態に至らない	許容曲げ応力度	許容せん断応力度	時刻歴応答解析	Rayleigh 減衰	地質データに基づく FEM モデル		
	貯水機能	終局状態に至らない	コンクリート許容圧縮応力度 鉄筋許容引張応力度	許容せん断応力度					
	支持機能	終局状態に至らない	許容曲げ応力度	許容せん断応力度					

(注 1) 波及的影響防止のために耐震評価を実施する土木構造物を記載する。

(注 2) 3号炉バックアップコンクリートに対しては、地盤・斜面の安定性評価において実施する地盤応答解析 (高減衰応答解析) から応答加速度を抽出し、滑動・転倒に対する安定性評価及び構造部材の健全性に対する評価を行う。

第 6-4 表 池状構造物 (RC 構造物) 耐震性能と照査基準

耐震性能	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態 ^{※1}	限界状態 1 (降伏耐力以下)	限界状態 2 (最大耐力以下)	限界状態 3 (終局変位以下、せん断耐力以下)
損傷状態			
	無被害又はひび割れは生じるが漏水は生じない。修復の必要ない。	軽微なひび割れから漏水は生じるが地震後に早期に修復可能である。	ひび割れ幅が拡大し、漏水が生じるが施設全体が崩壊しない。修復可能。
照査項目例 ^{※2}	断面力 (曲げ、せん断)、応力度	断面力 (曲げ、せん断)、塑性率	変位量、曲率、断面力 (せん断)
照査用限界値例 ^{※3}	断面力 (曲げ) \leq 降伏曲げ耐力 断面力 (せん断) \leq せん断耐力 応力度 \leq 許容応力度	断面力 (曲げ) \leq 最大曲げ耐力 断面力 (せん断) \leq せん断耐力 塑性率 \leq 許容塑性率	変位量 \leq 終局変位量 曲率 \leq 終局曲率 断面力 (せん断) \leq せん断耐力



第 6-1 図 鉄筋コンクリート部材のM-φ 関係 (土木学会マニュアルより引用)

2. 土木学会マニュアルの適用性について

2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認における曲げに対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用層間変形角が限界層間変形角を超えないことを確認する。

「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。）では、構造部材の終局変位は、部材の荷重－変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求めてよいとしている。コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方を第6-2図に示す。

一方、土木学会マニュアルでは、以下の考え方に基づいている。屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験の結果より、かぶりコンクリートが剥落すると荷重が低下し始める。層間変形角 $1/100$ に至る状態は、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることを確認しており^{(1), (2)}、荷重が低下しない範囲にある。当該限界値を限界状態とすることで、構造全体としての安定性が確保できるものとして設定されたものである。ラーメン構造の破壊実験の例を第6-3図に示す。

したがって、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書2002による照査よりも安全側の評価を与えるため、適用性を有している。

さらに、土木学会マニュアルでは、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説（日本建築学会，1997）」（以下「日本建築学会」という。）にて記載されている設計限界変形 $1/100$ ，終局限界変形 $1/80$ 等を基準値として参照している。

対象は同じラーメン構造であり、軸力比（軸応力度／コンクリート圧縮強度比）は建築物よりも屋外重要土木構造物の方が小さいと考えられることから、変形性能がより大きくなる傾向にあり、層間変形角 $1/100$ は安全側であると考えられる。機能維持確保の観点からも耐荷性能が確保されることが担保できるため限界値として適切である。

参考に、日本建築学会における曲げ降伏先行型の部材について、復元力特性と限界状態（損傷度）の関係の概念図を第6-4図に、土木学会マニュアルにおける鉄筋コンクリートはり部材の荷重変位関係と損傷状態に対する概念図を第6-5図に示す。日本建築学会と土木学会マニュアルにおいておおむね対応が取れており、土木学会マニュアルの各損傷状態の設定は妥当であると考えられる。第6-5図において層間変形角 $1/100$ は第4折れ点よりも手前にあり、屋外重要土木構造物の限界状態に至っていないと考えられる。また、第3折れ点は層間変形角 $1/100$ よりも更に手前にある。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、妥当な安全裕度を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数と、地盤物性のばらつきの影響を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の5種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第6-6図に示す。

また、地盤物性のばらつきについては、これらの影響を見込んだ照査を詳細設計段階において実施する。地盤物性のばらつきは、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差 (σ) のケースについて確認を行う。

耐震安全性評価において、基準地震動全波を用いて基本ケースでの評価を実施し、基本ケースにおいて、曲げに対する照査が厳しい（許容限界に対する余裕が小さい）地震動を用い、地盤物性のばらつきを考慮した確認を行う。

曲げに対する照査において考慮している安全係数は第 6-5 表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

(1) 材料係数

コンクリート強度の特性値は、製造において、その値を下回る強度が発現する確率が 5 % 以内となるように設定する。また、鉄筋の機械的性質の特性値に関しても、日本工業規格 (JIS) の規格範囲の下限值を設定してよいとしている。このように、双方とも特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定しており、応答値・限界値ともに安全側の照査がなされているため、材料係数は 1.0 としている。

(2) 部材係数

安全側に配慮した設定を行っていることから、部材係数は 1.0 としている。

(3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は 1.0 としている。

(4) 構造解析係数

限られた条件での実験であること、地盤パラメータの設定が応答解析結果に及ぼす影響等を考え併せて、構造解析係数は 1.2 以上を標準としている。

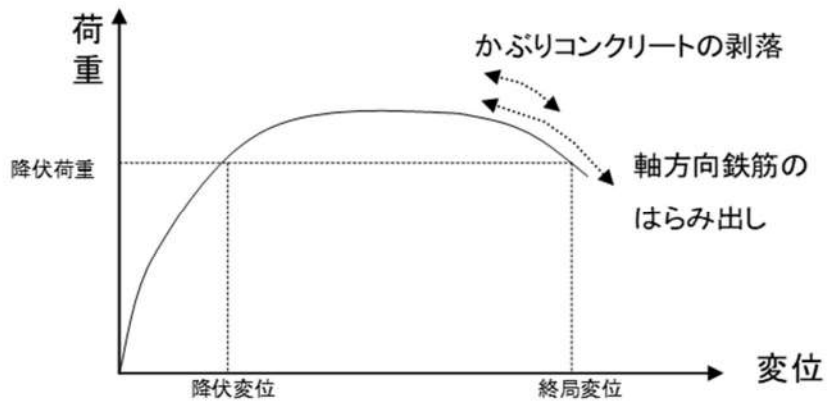
(5) 構造物係数

屋外重要土木構造物は重要度ごとに適切な地震動が設定される。したがって、構造物係数により更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は 1.0 としている。

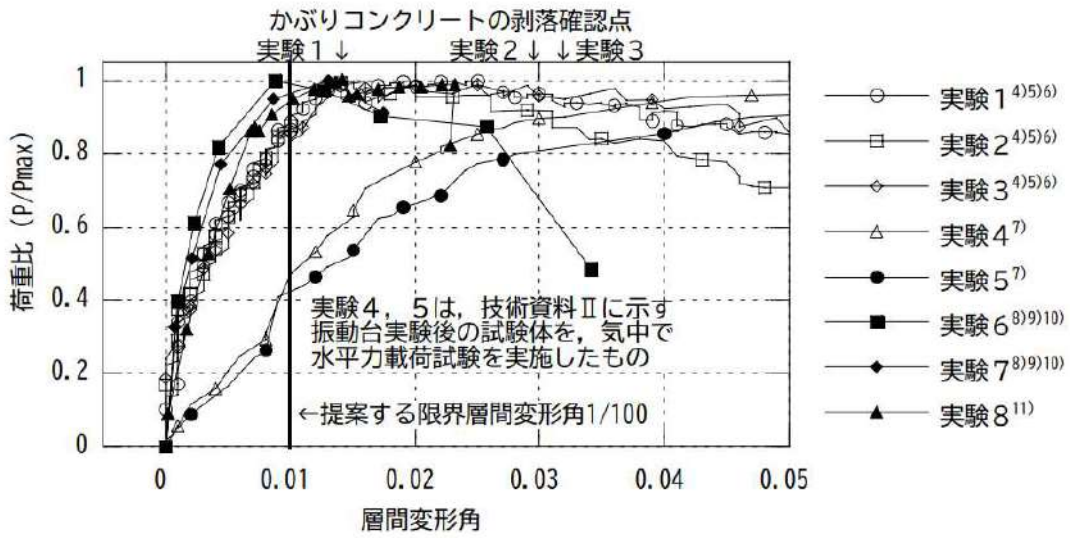
以上のことから、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書 2002 による照査よりも安全側の評価を与えるため、技術的妥当性及び適用性を有するとともに適切な余裕が確保されていると判断できる。

第 6-5 表 曲げ評価において考慮している安全係数

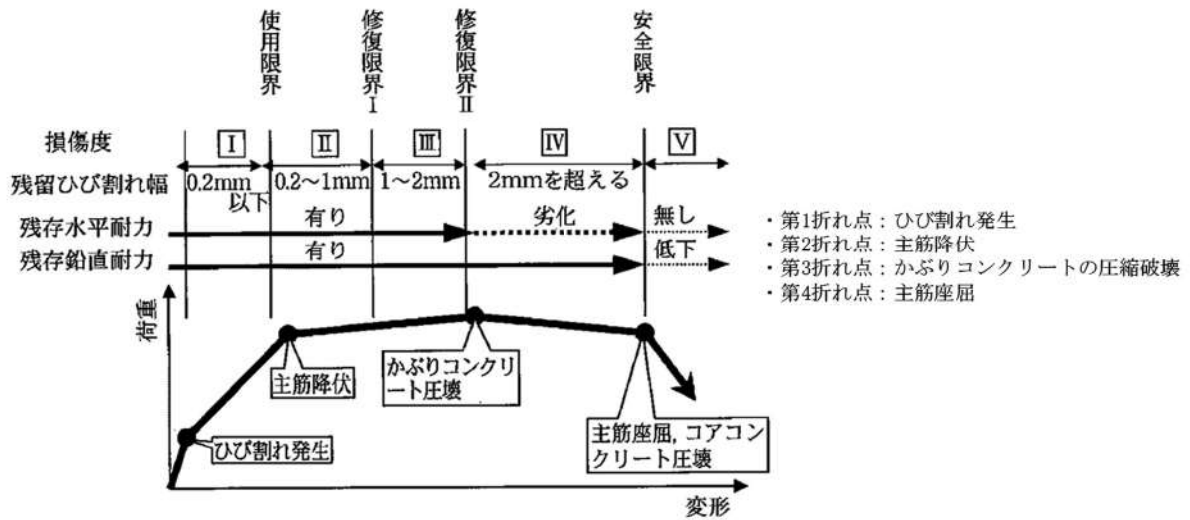
安全係数		曲げ照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.0
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数		—	1.0
荷重係数		1.0	
構造解析係数		1.2	—
構造物係数		1.0	



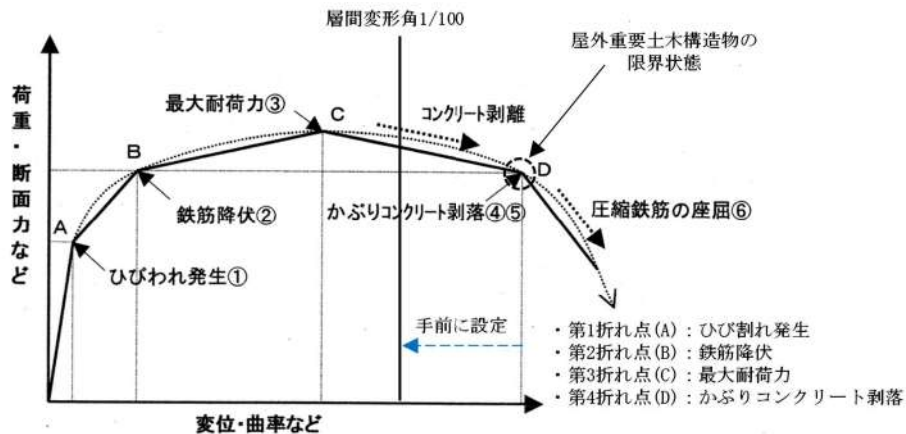
第 6-2 図 コンクリート標準示方書 2002 による構造部材の終局変位の考え方



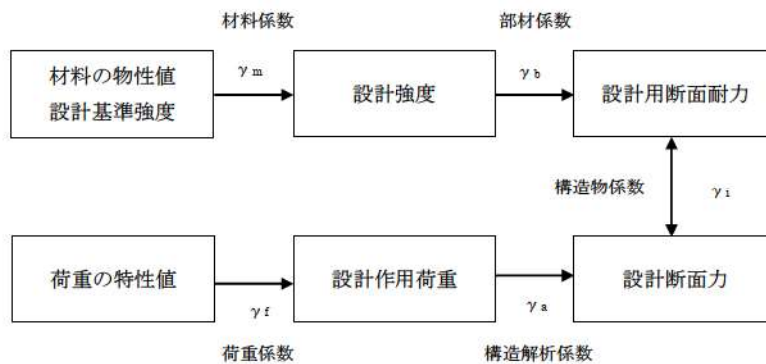
第 6-3 図 鉄筋コンクリート製ラーメン構造の破壊実験 (1), (2)
(土木学会マニュアル)



第 6-4 図 曲げ降伏先行型の部材の復元力特性の限界状態 (損傷度) の関係の概念図 (日本建築学会)



第 6-5 図 鉄筋コンクリートはり部材の荷重－変位関係と損傷状態に対する概念図（土木学会マニュアル）



第 6-6 図 安全係数の考え方

2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認におけるせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用せん断力が、せん断耐力を下回ることを確認する。

なお、せん断耐力は、せん断耐力評価式（分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法を含む）及び材料非線形解析を用いる方法のいずれかを用いて評価する。

2.2.1 せん断耐力評価式

コンクリート標準示方書 2002 では、棒部材及びディープビームについて第 6-6 表に示すとおりせん断耐力式を定義している。このうち、ディープビームについては、コンクリート標準示方書 2002 及び土木学会マニュアルにおいて同様の評価式となっている。

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書 2002 におけるせん断耐力式のうち棒部材式において、等価せん断スパンにより設定可能な係数 β_a を考慮している。これは屋外重要

土木構造物が地中に埋設されたラーメン構造で、土圧、水圧、地震時慣性力等の多数の分布荷重が作用していることによる分布荷重が卓越し、スパン内に反曲点が存在する等の載荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書 2002 のせん断耐力式を精緻化したものである。当該せん断耐力式は、第 6-8 図に示すとおり、屋外重要土木構造物を模した破壊試験より得られるせん断耐力と整合的であり、合理的な評価が可能であることが確認されている^{(3), (4)}。

また、これら多数の荷重の複合作用を個々に分解することは困難であることから、せん断耐力の算定時に個々の荷重作用を区分せず最終的な設計用断面力分布を用いて合理的なせん断耐力を算定することとしている⁽⁴⁾。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、妥当な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数と、地盤物性のばらつきの影響を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の 5 種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第 6-7 図に示す。

また、地盤物性のばらつきについては、これらの影響を見込んだ照査を詳細設計段階において実施する。地盤物性のばらつきは、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差 (σ) のケースについて確認を行う。

耐震安全性評価において、基準地震動全波を用いて基本ケースでの評価を実施し、基本ケースにおいて、せん断に対する照査が厳しい（許容限界に対する余裕が小さい）地震動を用い、地盤物性のばらつきを考慮した確認を行う。

せん断に対する照査において考慮している安全係数は第 6-7 表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

(1) 材料係数

限界値算定時に適用する材料係数はコンクリート標準示方書 2002 に準拠して、コンクリートに対して 1.3、鉄筋に対して 1.0 としている。応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が、特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定していることから安全側の照査がなされているため、材料係数は 1.0 としている。

(2) 部材係数

コンクリート標準示方書 2002 に準拠して、コンクリート寄与分に対して 1.3、鉄筋寄与分に対して 1.1 としている。

(3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は 1.0 として

いる。

(4) 構造解析係数

変形に関する応答値の評価精度に比較して、断面力に関する応答値の評価精度は高いと考えられることから、変形照査の場合より低減させて1.05としている。

(5) 構造物係数

基準地震動は地点ごとにサイト特性を考慮して設定され、重要度分類に対応して入力地震動が選定される。したがって、構造物係数により更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0としている。

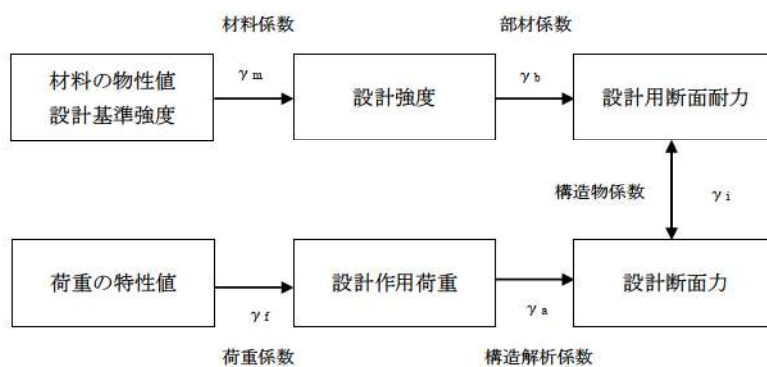
以上のことから、土木学会マニュアルによるせん断照査手法は、屋外重要土木構造物の構造的特徴を踏まえ設定された手法であるため、技術的妥当性及び適用性を有すると判断できる。

第 6-6 表 せん断耐力式の比較表

	コンクリート標準示方書2002	土木学会マニュアル
棒部材	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ <p> V_{yd} : せん断耐力 V_{cd} : コンクリート負担 V_{sd} : せん断補強筋負担 </p> $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ <p> β_d, β_p : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 β_n : 発生曲げモーメントで決まる係数 f_{vcd} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる b_w : 腹部の幅 d : 有効高さ γ_b : 安全係数 </p>	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ <p> V_{yd} : せん断耐力 V_{cd} : コンクリート負担 V_{sd} : せん断補強筋負担 </p> $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ <p> β_d, β_p : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 β_n : 発生曲げモーメントで決まる係数 $\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ a : せん断スパン長 f_{vcd} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる b_w : 腹部の幅 d : 有効高さ γ_b : 安全係数 </p>
	せん断スパンより設定される係数を考慮し, コンクリート標準示方書2002のせん断耐力式を精緻化	
デ イ ー ブ ビ ー ム	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ <p> V_{ydd} : せん断耐力 V_{cdd} : コンクリート負担 V_{sdd} : せん断補強筋負担 </p> $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{add} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1+(a_v/d)^2}$ <p> a_v : 荷重作用点から支承全面までの距離 f_{add} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる </p>	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ <p> V_{ydd} : せん断耐力 V_{cdd} : コンクリート負担 V_{sdd} : せん断補強筋負担 </p> $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{add} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1+(a_v/d)^2}$ <p> a_v : 荷重作用点から支承全面までの距離 f_{add} : 設計基準強度, 安全係数等で決まる </p>
	コンクリート標準示方書2002と土木学会マニュアルにおいて同一の評価式となっている	

第 6-7 表 せん断耐力評価において考慮している安全係数

安全係数		せん断照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.3
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数	コンクリート	—	1.3
	鉄筋	—	1.1
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.05	—
構造物係数		1.0	

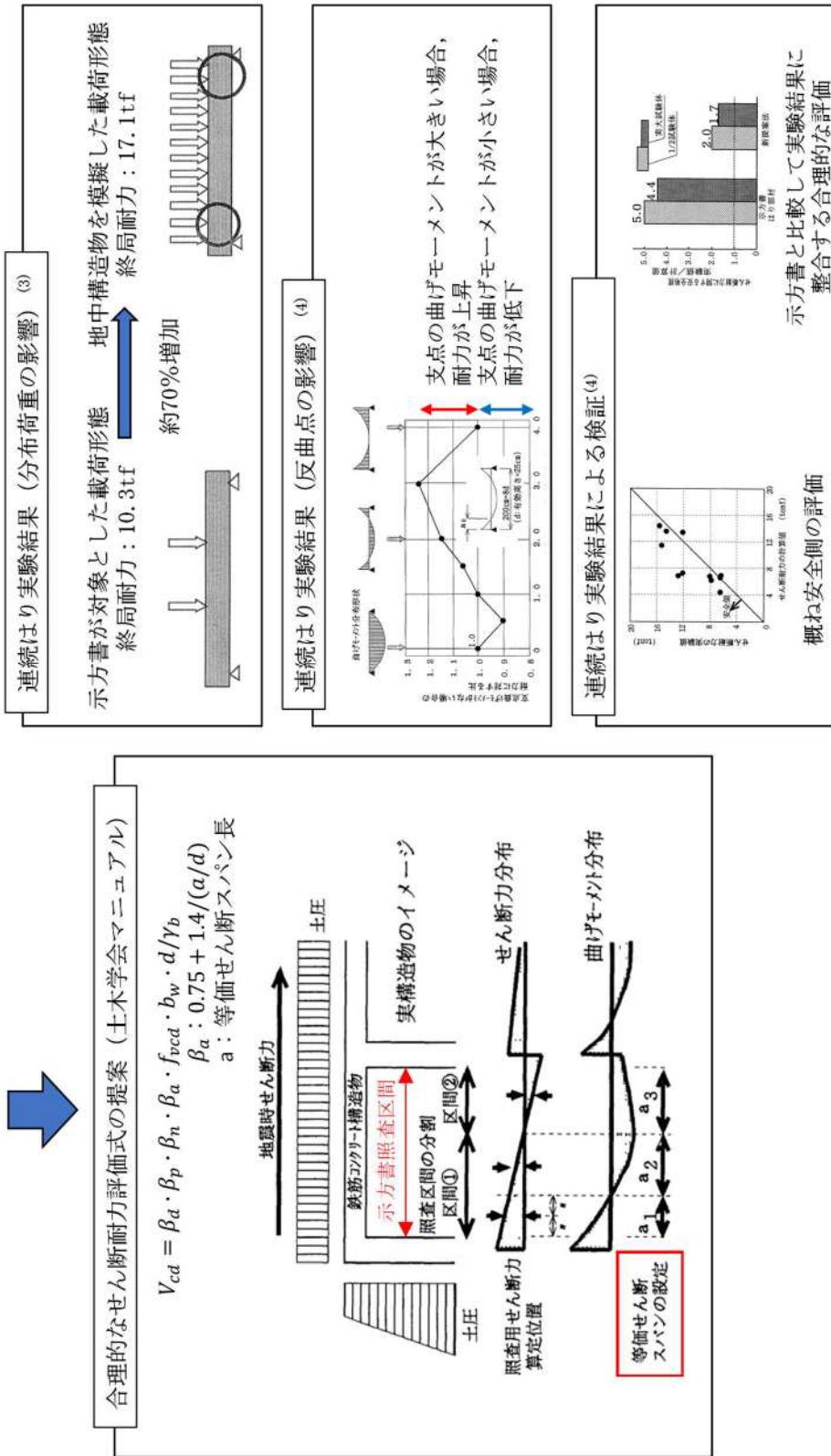


第 6-7 図 安全係数の考え方
(第 6-6 図の再掲)

○コンクリート標準示方書2002におけるせん断耐力式 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$
 2点载荷の単純はりの実験結果に基づいた単純な載荷形態あるいは単純な断面力分布は精度良くせん断耐力を評価する。

<問題点>

- ・分布荷重が卓越する場合、支点付近に大きな荷重が加わる場合及び支点反力が大きい場合において、せん断耐力を過小評価する。
- 地中構造物を模擬した実験によるせん断耐力評価式
 地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に反曲点がある等複雑な載荷形態を考慮してせん断耐力を評価する。



第6-8図 土木学会マニュアルによるせん断耐力式評価の設定経緯

2.2.2 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価

構造部材の照査において発生するせん断力が、せん断耐力式によるせん断耐力を上回る部材については、以下で示す材料非線形解析（解析コード：WCOMD-SJ Ver. 7.2）を用いたせん断耐力評価を実施する。

(1) 評価条件

2.2.1 で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

第 6-8 表及び第 6-9 表に材料非線形解析の概要を示す。

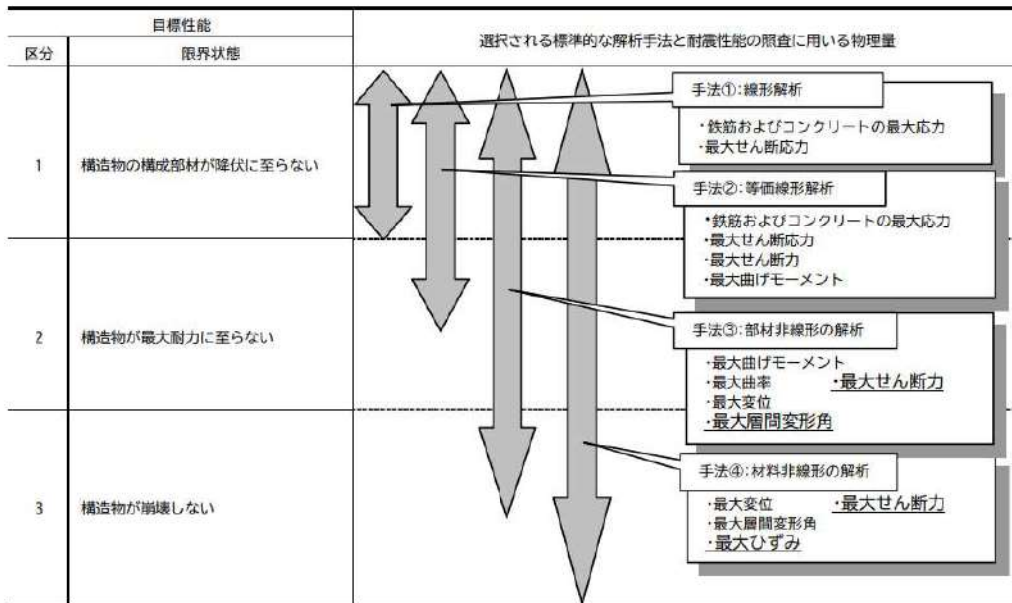
材料非線形解析は、90 年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、「コンクリート標準示方書 設計編（土木学会、2012）」（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されており、コンクリート標準示方書 2012 において標準とされる以下の手法とする。

- ① 鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ② 鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ③ 鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

なお、材料非線形解析の適用に当たっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

第 6-8 表 材料非線形解析の位置付け (土木学会マニュアル)



第 6-9 表 部材非線形解析と材料非線形解析の特徴

	部材非線形解析		材料非線形解析	
モデル化	骨組モデル		有限要素	
解析次元	1次元		2次元	3次元
構成則	M-φ, M-θ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性) (解析時間)	狭い ← → 広い 短い ← → 長い		

a. 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書 2012 等に基づき実施する。基準と異なる設定を用いる場合には、設定根拠の妥当性を確認する。

第 6-10 表に参考とする主な基準・文献を示す。

第 6-10 表 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数 ・材料特性	・コンクリート標準示方書2012 ・土木学会マニュアル	—
許容限界	—	・せん断力-相対変位関係より設定した許容限界(破壊基準)が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果とおおむね整合的であることを確認

b. 材料定数

耐震安全性評価に用いる材料定数は、設計図書及び文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を第 6-11 表及び第 6-12 表に示す。

第 6-11 表 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	18.5N/mm ²	設計基準強度(設計図書24.0N/mm ²) /材料係数 ^(注)
引張強度	1.47N/mm ²	引張強度/材料係数 ^(注)
圧縮ピークひずみ	0.19%	コンクリート標準示方書2012
ひび割れ—せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2012
破壊エネルギー	0.0718N/mm	コンクリート標準示方書2012

(注) 材料係数を 1.3 として算出

第 6-12 表 鉄筋の材料定数

	設定値	諸元	
単位体積重量	0.0kN/m ³	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない	
ヤング係数	206kN/mm ²	コンクリート標準示方書2012	
降伏強度	主鉄筋	3432N/mm ²	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう曲げ耐力が増大するように設定
	せん断補強筋	345N/mm ²	設計図書 (SD345)

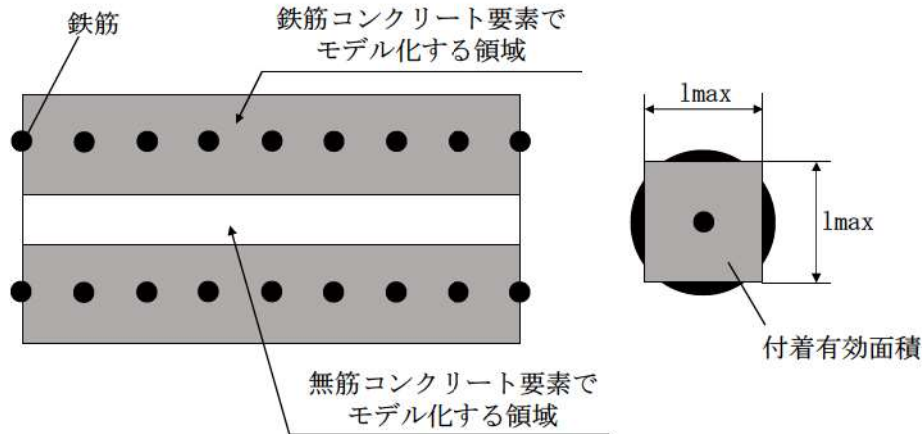
c. 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては、第 6-9 図に示すとおり、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと、及び 3 層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから 3 層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル下端を固定境界とする。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{\frac{f_y}{f_t}}$$

ここに、

- l_{max} : 鉄筋一本当たりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ
- D_b : 鉄筋の直径
- f_y : 鉄筋の降伏強度
- f_t : コンクリートの引張強度

第 6-9 図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

d. コンクリートの非線形特性

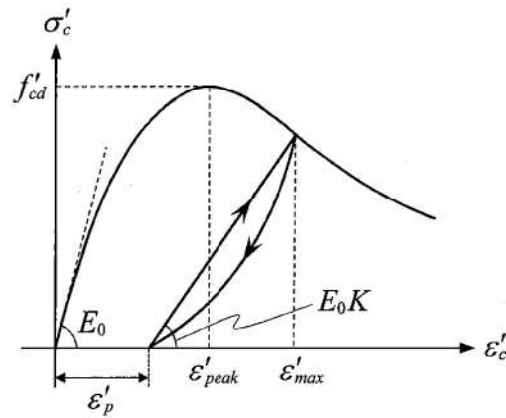
耐震安全性評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

・圧縮応力下における応力-ひずみ関係

第 6-10 図に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、第 6-11 図に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\epsilon'_c - \epsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\epsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\epsilon'_p = \epsilon'_{max} - 2.86 \cdot \epsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

$$f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_c$$

ここに,

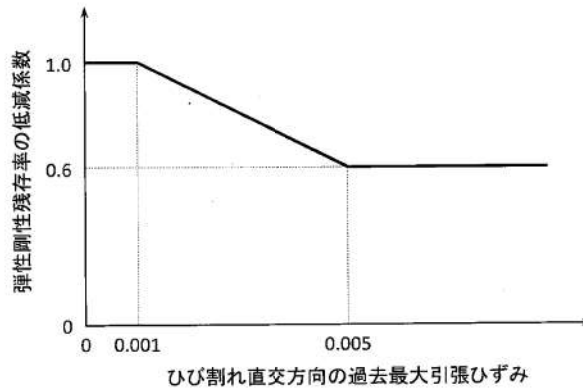
ϵ'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に, 0.002 としてもよい)

ϵ'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ϵ'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

第 6-10 図 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

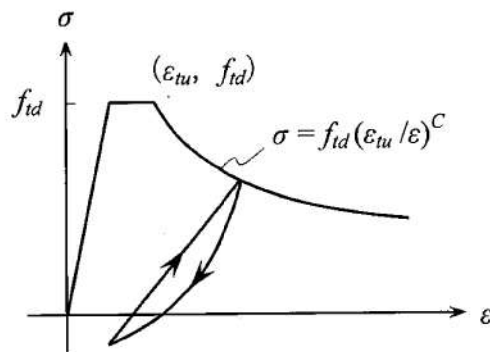


第 6-11 図 弾性剛性残存率の低減係数

・引張応力下における応力-ひずみ関係

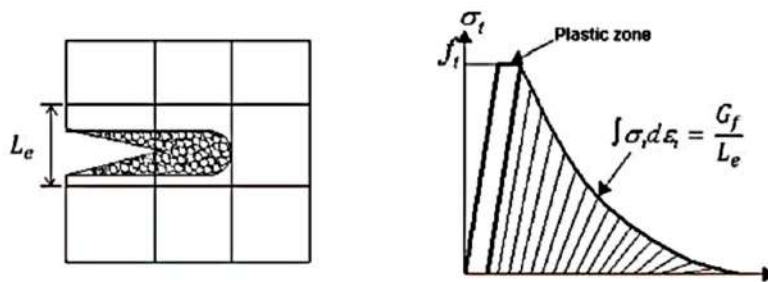
引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、第 6-12 図に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー (G_f) によって定義する。引張軟化挙動の考慮に当たっては、第 6-13 図に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が G_f/Le (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数 C を用いる。



- f_{td} : 設計引張強度
- ϵ_{tu} : 引張軟化開始ひずみ
- C : 引張軟化特性を表す係数

第 6-12 図 引張応力下における鉄筋とコンクリートの
付着効果を考慮した応力-ひずみ関係

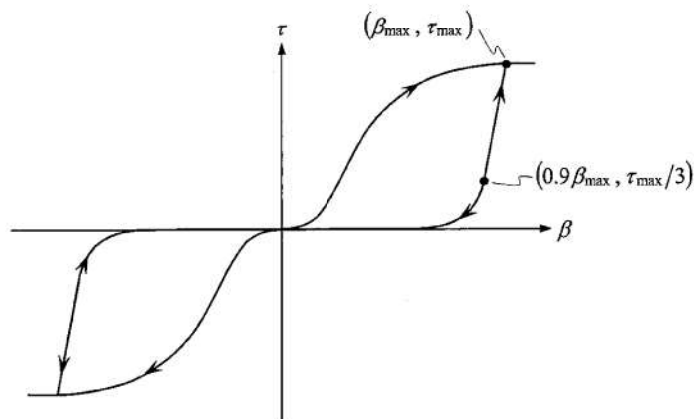


第 6-13 図 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー G_f の関係

・ ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、第 6-14 図に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ϵ の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。

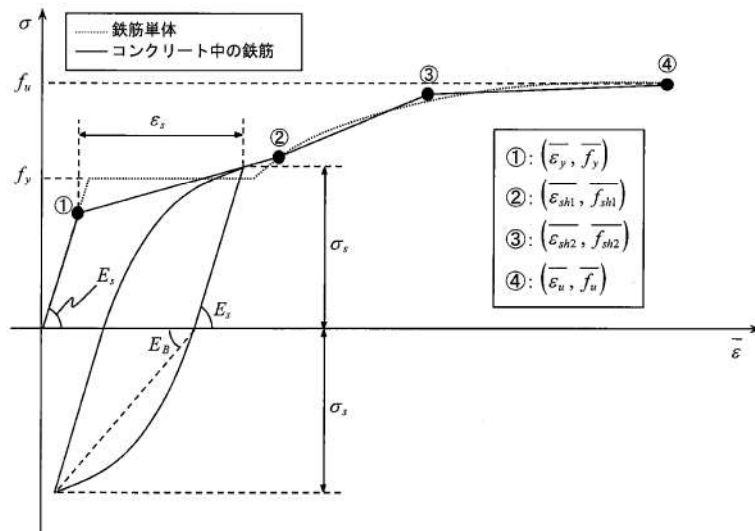


- β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ϵ の比 (γ/ϵ)
- τ : ひび割れ面でのせん断応力
- τ_{max} : 除荷開始時せん断応力
- β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ϵ の比

第 6-14 図 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

e. 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、第 6-15 図に示すひずみ硬化特性を考慮する。



第 6-15 図 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係

f. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果(引張特性が硬化する現象)として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_c}{A_{RC}} \bar{\sigma}_c$$

ここに、

$\bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_c$: それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

A_s, A_c : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積 $A_{RC} = A_s + A_c$

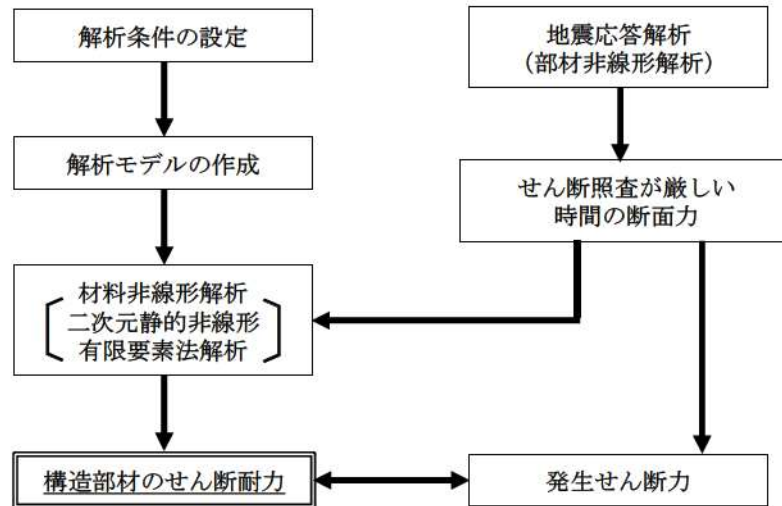
g. 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析(部材非線形解析)により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価方法

a. 耐震安全性評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを第 6-16 図に示す。



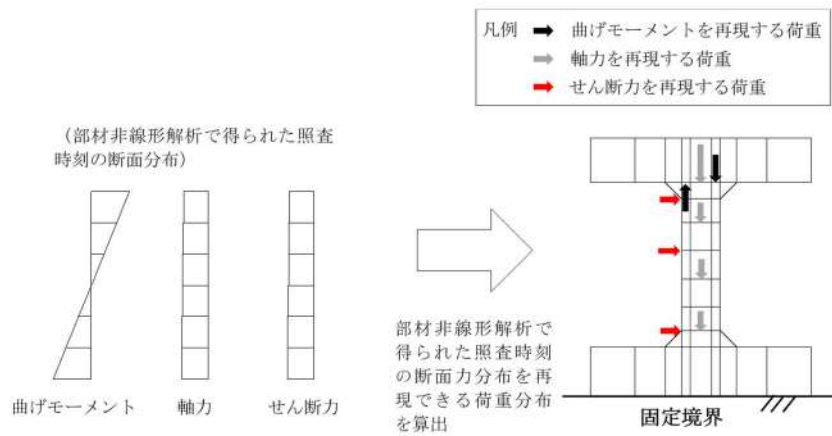
第 6-16 図 材料非線形解析の耐震安全性評価フロー

b. 荷重の設定

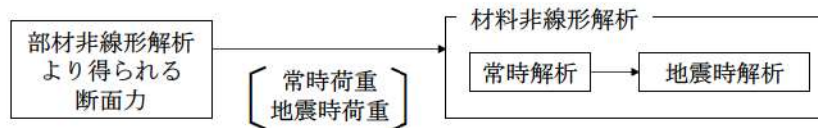
材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに第 6-17 図に示すとおり作用させる。

材料非線形解析では、部材非線形解析で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増载荷する。

作用荷重は、常時荷重及び地震時荷重に分けて、第 6-18 図に示すとおり常時解析と地震時解析に分けて、材料非線形解析を実施する。



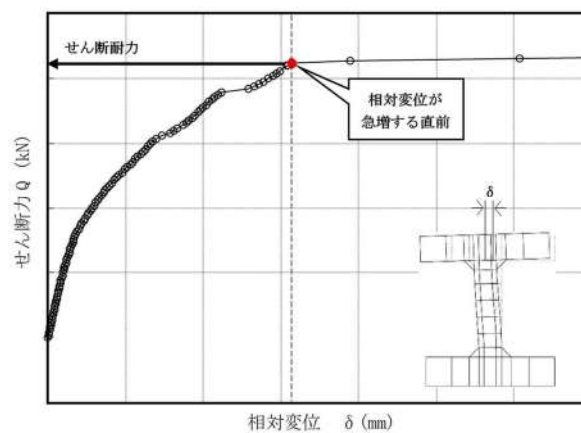
第 6-17 図 材料非線形解析における荷重状況



第 6-18 図 荷重の作用手順

c. せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析におけるせん断力-相対変位関係から設定する。具体的には、第 6-19 図に示す例のとおり、せん断力-相対変位関係においてせん断力の増分に対して相対変位が急増する直前の点又はせん断力が最大となる点を部材のせん断耐力と判断する。



第 6-19 図 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

d. 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られる断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力 V と材料非線形解析で得られるせん断耐力 V_y に、以下のとおり部材係数 γ_{b1} 、 γ_{b2} 、構造解析係数 γ_a 、構造物係数 γ_i を考慮し、照査用せん断力 V_d 、設計せん断耐力 V_{yd} を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮する安全係数の設定例を第 6-13 表に示す。ここで、部材係数 γ_{b1} については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される 17 ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きい Case No. 11 の部材係数 1.38 を設定する（第 6-14 表）。

第 6-13 表 考慮する安全係数

安全係数		値	設定根拠
部材係数	γ_{b1}	1.38	別途実施する材料非線形解析により設定
	γ_{b2}	1.0	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	γ_i	1.0	構造物の重要度は、基準地震動 S_s により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	γ_a	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	γ_i	1.3	各種文献より設定

第 6-14 表 部材係数 γ_{bl} の設定

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	462	0.97	
2	1187	1276	1.07	
3	324	347	1.07	
4	294	304	1.03	
5	581	531	0.91	
6	329	362	1.10	
7	1587	1783	1.12	
8	350	402	1.15	
9	855	864	1.01	
10	165	200	1.21	
11	333	461	1.38	最大値
12	127	167	1.31	
13	188	192	1.02	
14	163	192	1.18	
15	273	212	0.78	
16	356	271	0.76	
17	432	361	0.84	

(3) 適用範囲

適用範囲は、二次元時刻歴応答解析により断面力等を算出して耐震安全性評価を行う構造物とし、後施工せん断補強筋 (CCb) により耐震補強を行っている部材は適用範囲外とする。

3. 屋外重要土木構造物等の減衰定数

3.1 減衰の設定について

今回工認で採用している時刻歴応答解析において、地盤及び構造物の減衰は、粘性減衰と履歴減衰で考慮している。

粘性減衰による減衰は、固有値解析にて求められる固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下の Rayleigh 減衰を解析モデル全体に与える。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

[C]：減衰係数マトリックス，[M]：質量マトリックス，

[K]：剛性マトリックス， α ， β ：係数

係数 α について、有効応力による時刻歴応答解析では、地震力による時系列での地盤剛性の軟化に伴い1次固有振動数の低振動数側へのシフトに応じて、地盤応答の保守的な評価が行えるように係数 $\alpha=0$ として設定し、低振動数帯で減衰 α の影響がない剛性比例型減衰とする。

係数 β については、「FLIP研究会14年間の検討成果のまとめ「理論編」」において実施した検討結果や先行サイトでの実績を参考に、減衰定数を定めずに決めた値として $\beta=0.002$ を設定し、解析モデル全体に Rayleigh 減衰を与える。ただし、 β の値は地盤条件によって変動することから、泊発電所の地盤条件に対して $\beta=0.002$ を設定することの妥当性については、参考資料2「Rayleigh 減衰の設定の妥当性について」で確認する。

履歴減衰による減衰は、構造部材の部材非線形性（曲げモーメント-曲率関係）における非線形の程度に応じた値となる。なお、構造物を線形でモデル化する場合は、Rayleigh 減衰のみ設定する。

3.2 建設工認と今回工認の相違について

今回工認で採用する粘性減衰は、材料ごとに個別の減衰を考慮せず解析モデル全体に Rayleigh 減衰（ $\alpha=0$ ， $\beta=0.002$ ）にて与える。

建設工認では、JEAG4601-1987において鉄筋コンクリート構造物の減衰定数は5%が慣用的に使用されていることが示されていることを参考に、周波数応答解析における構造物の減衰定数は5%を用いた。

4. 耐震性能照査の手順

機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の照査では、想定される荷重条件に対して機器・配管の機能を維持することが主たる目的となる。このため、土木学会マニュアルでは、機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の耐震性能評価においては、機器・配管の機能維持のために屋外重要土木構造物に求められる制約条件を与条件としている。

屋外重要土木構造物の耐震性能の照査に当たっては、地盤と構造物の連成解析を行い、床応答や変位を算定する。機器・配管の耐震安全性は、当該構造物を支持する屋外重要土木構造物の床応答や変位を用いて、別途確認を行う。第 6-15 表に対象構造物の例を示す。

第 6-15 表 検討対象構造物の例

屋外重要土木構造物	機器・配管
取水ピットポンプ室	原子炉補機冷却海水ポンプ 原子炉補機冷却海水設備配管
原子炉補機冷却海水管ダクト	原子炉補機冷却海水設備配管

5. 参考文献

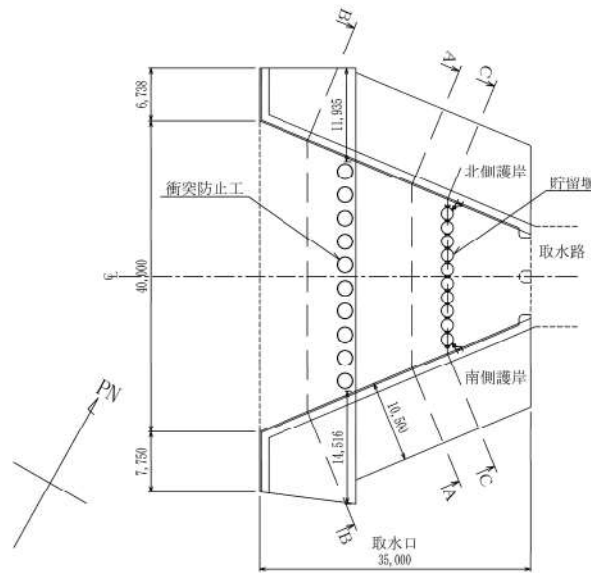
- (1) 松尾ら：コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討，土木学会地震工学論文集，2003
- (2) 石川ら：鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損傷状態に関わる実験的考察，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp885-888
- (3) 遠藤ら：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告
- (4) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用・安全性照査マニュアルの提案，土木学会論文集No. 442/V-16

取水口の評価方針

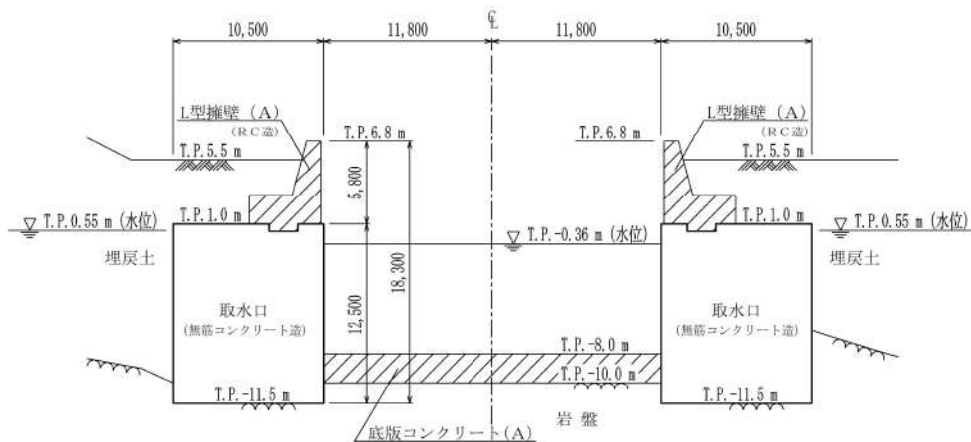
1. 要求機能

取水口の平面図を参考 1-1 図に、断面図を参考 1-2 図～参考 1-4 図に示す。屋外重要土木構造物のうち取水口は、無筋の護岸コンクリートにより構成され、津波防護施設及び常設重大事故等対処設備である貯留堰が設置される。取水口の要求機能は、A-A断面では通水機能及び貯水機能、B-B断面では通水機能、C-C断面では通水機能、貯水機能及び支持機能である。

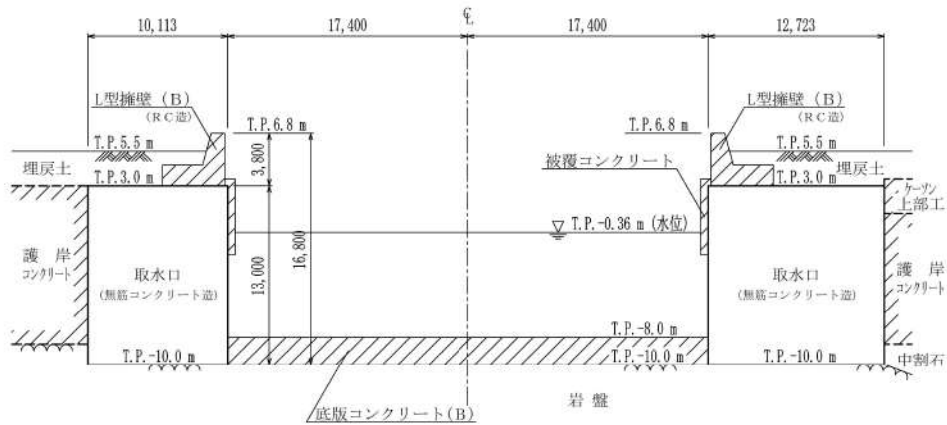
また、取水口の上部に設置される鉄筋コンクリート造のL型擁壁についても波及的影響の観点で、取水口の取水性に影響を及ぼさないよう安定性を保持すること及び構造部材が終局状態に至らないことを確認する。



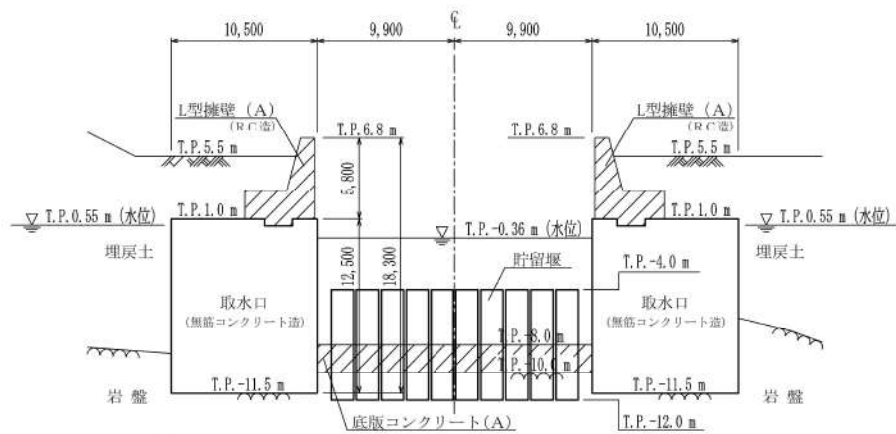
参考 1-1 図 取水口 平面図



参考 1-2 図 取水口 断面図 (A-A断面)



参考 1-3 図 取水口 断面図 (B-B 断面)

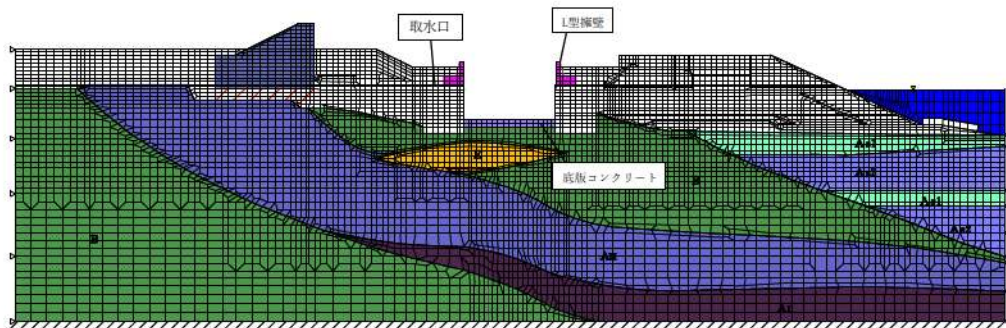


(注) 貯留堰は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある

参考 1-4 図 取水口 断面図 (C-C 断面)

2. 評価方法

取水口の耐震安全性評価については、地震応答解析手法に時刻歴応答解析を適用することとし、要求機能ごとに許容限界を定めて評価を実施する。解析モデルの例を参考 1-5 図に示す。



(注) 防潮堤は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある。

参考 1-5 図 取水口の解析モデル (例)

2.1 通水機能に対する評価方法

取水口及びL型擁壁の滑動及び転倒により通水断面の閉塞につながる可能性があることから、取水口の通水機能に対する目標性能は、取水口及びL型擁壁が滑動及び転倒しないこととする。

滑動及び転倒評価に当たっては、地震時荷重を二次元地震応答解析により算定し、水平力が最大となる時刻の荷重を用いて評価する。

また、L型擁壁は、許容応力度法により耐震評価を実施し、構造部材が破壊に至らないことを確認する。

(1) 滑動評価

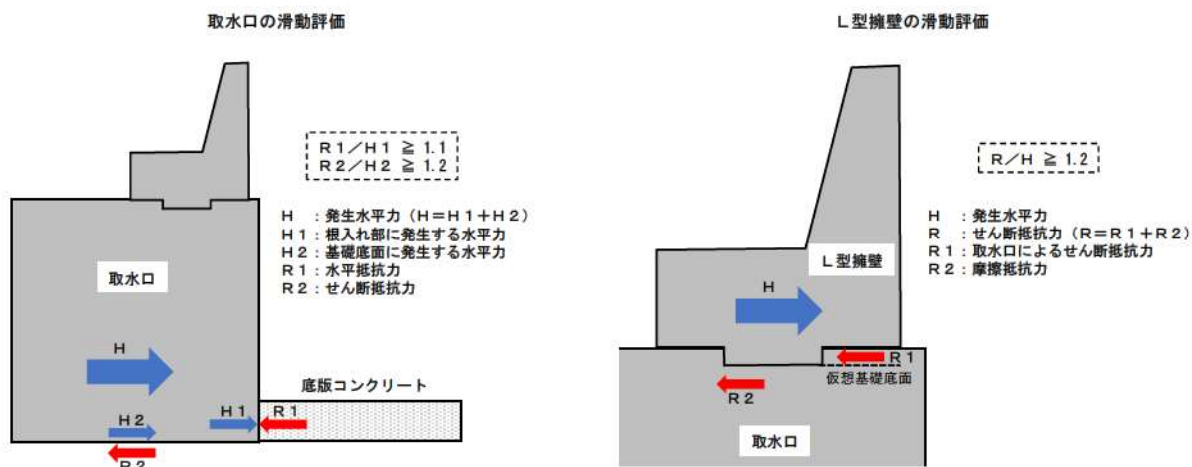
① 取水口

取水口の滑動評価については、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（（社）日本道路協会、平成14年3月）」（以下「道路橋示方書（下部構造編）」という。）を参考に、発生水平力を取水口側面の底版コンクリートと接している部分（以下「根入れ部」という。）に発生する水平力と取水口底面に発生する水平力に分けて評価することとして、根入れ部に発生する水平力と水平抵抗力の比が1.1以上となること、及び取水口底面に発生する水平力とせん断抵抗力の比が1.2以上となることを確認する。

② L型擁壁

L型擁壁の滑動評価については、道路橋示方書（下部構造編）を参考に、発生水平力とせん断抵抗力の比が1.2以上となることを確認する。

L型擁壁には底版に突起部を設けていることから、せん断抵抗力は、道路橋示方書（下部構造編）を参考に、突起部の先端を通るL型擁壁の底版と平行な面を仮想の基礎底面とみなして、突起部前面の取水口によるせん断抵抗力と突起部底面及び突起部後方の摩擦抵抗として算出する。



参考 1-6 図 滑動評価 イメージ図

(2) 転倒評価

取水口及びL型擁壁の転倒評価については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」を参考に，妥当な安全余裕を確保する観点から転倒モーメントと抵抗モーメントの比が1.1以上となることを確認する。

2.2 貯水機能に対する評価方法

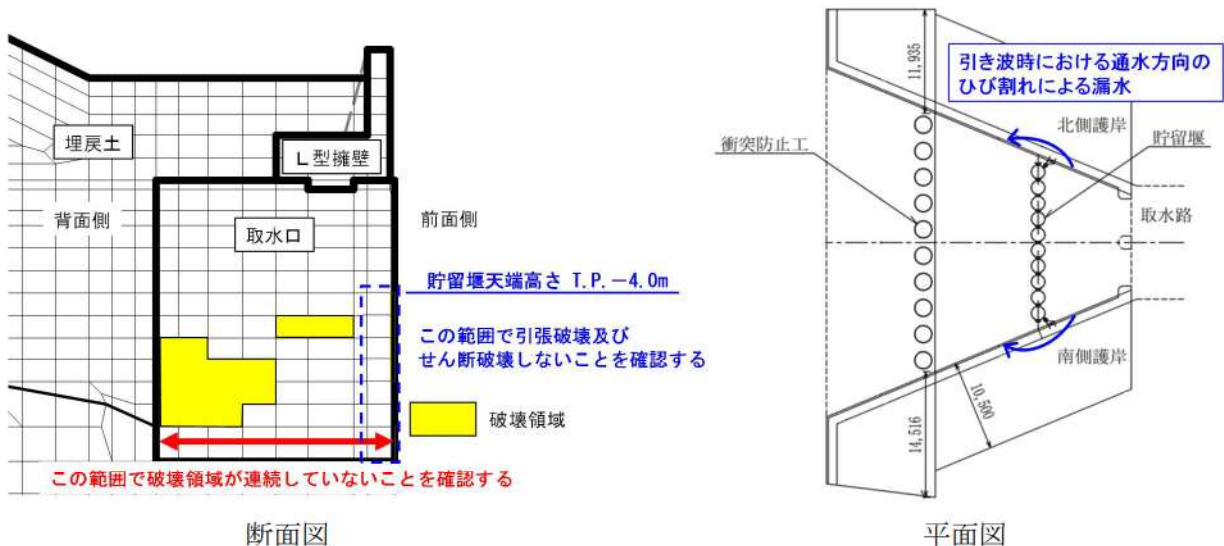
取水口にひび割れが発生し，ひび割れから漏水する可能性があることから，取水口の貯水機能に対する目標性能は，取水口を貫通するような顕著なひび割れが発生しないこととする。また，取水口前面側の表面に通水方向のひび割れが発生した場合，引き波時にひび割れから漏水する可能性があることから，前面側の取水口表面にひび割れが発生しないことを確認する。

具体的な評価方法は，取水口に該当する要素の局所安全係数を算出し，破壊領域（引張破壊及びせん断破壊）が取水口の背面から前面にかけて連続していないこと及び貯留堰の天端高さ以下の範囲で，取水口前面側の表面が引張破壊及びせん断破壊していないことを確認する。局所安全係数の算出に当たっては，コンクリートの材料強度^(注)を使用する。局所安全係数による評価のイメージ図を参考1-7図に示す。

(注) コンクリートのせん断強度： $f_{ck}'/5$ （コンクリート標準示方書，ダムコンクリート編2013）

コンクリートの引張強度： $0.23f_{ck}'^{2/3}$ （コンクリート標準示方書2002）

ここに， f_{ck}' ：コンクリートの設計基準強度

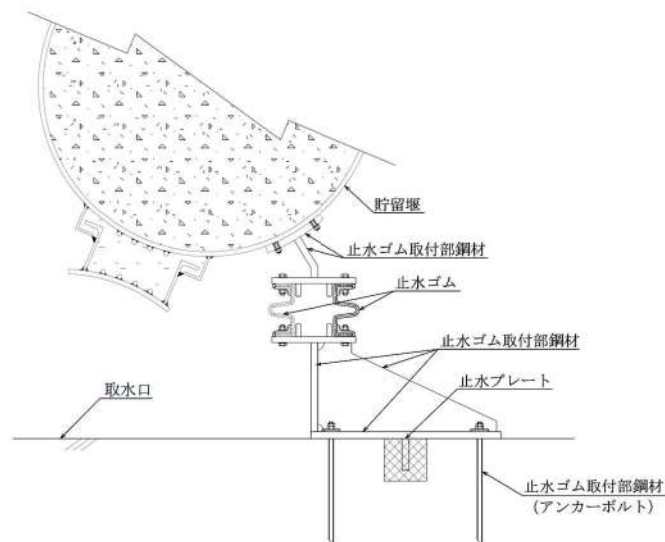


参考1-7図 局所安全係数による評価 イメージ図

2.3 支持機能に対する評価方法

津波の引き波時による取水ピットの水位低下に対して、原子炉補機冷却海水ポンプの取水に必要な高さの海水を確保するために、取水口に貯留堰を設置する（参考 1-1 図及び参考 1-4 図参照）。取水口と貯留堰の接続部（以下「護岸接続部」という。）は、参考 1-8 図に示すとおり、止水ゴム取付部鋼材をアンカーボルトで取水口に固定することで、止水ゴムと止水プレートにより、護岸接続部からの漏水を防止する設計方針としている。

よって、取水口の損傷によりアンカーボルトの定着に影響を及ぼし、貯留堰の止水性を損なうおそれがあることから、取水口の支持機能に対する目標性能は、護岸接続部周辺の取水口においてひび割れが発生しないこととする。具体的な評価方法は、アンカーボルト定着部の取水口に発生する最大引張応力度及び最大せん断応力度が各種強度に対して妥当な安全余裕を持つことを確認する。引張強度及びせん断強度には、2.2 に示すコンクリートの引張強度及びせん断強度を使用する。



参考 1-8 図 護岸接続部 概略図

3. コンクリートのせん断強度の妥当性について

貯水機能に対する評価において、せん断強度をコンクリート標準示方書（ダムコンクリート編，2013）（以下「ダムコンクリート編」という。）に基づいて設定することの妥当性を確認する。

ダムコンクリート編において取り扱うコンクリートは、発生する応力が曲げ主体ではなく、地盤のようにせん断で抵抗する形状のコンクリートである。

先行審査において適用実績のある女川 2 号炉では、防潮堤の背面補強工及び置換コンクリート、取放水路流路縮小工並びに MMR に対してダムコンクリート編に準拠したせん断強度を設定しており、いずれも上記と同様の形状のコンクリートである。

また、「ダムおよび他の大型構造物に用いるマスコンクリート（その 2）（コンクリートジャーナル，1971）」では、参考 1-1 表、参考 1-2 表に示すとおり、コンクリートのせん断強度と圧縮強度

の関係性について、複数のダムを対象に、圧縮強度が 123.02kg/cm²～597.55kg/cm² の範囲において試験を実施しており、せん断強度は、材料及び配合条件の違いやコンクリートの圧縮強度の値によらず、圧縮強度のおおむね 0.20～0.23 倍程度であることが示されている。

泊 3 号炉の取水口は、適用実績のある構造物と同様な形状であること。また、取水口的设计基準強度は 18.00N/mm² (183.55kg/cm²) であり、参考 1-1 表で確認された範囲内であることから、取水口の評価において、コンクリートのせん断強度を设计基準強度の 1/5 として設定することは妥当であるとする。

参考 1-1 表 コンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係性

ダム名	材令 (日)	W/C	圧縮強度 (C)	せん断強度 (S)	tan φ	S/C
			kg/cm ²	kg/cm ²		
Grand Coulee	28	0.52	369.08	82.25	0.90	0.223
	28	0.58	318.46	71.71	0.89	0.225
	28	0.64	267.84	58.35	0.92	0.218
	90	0.58	333.93	71.00	0.97	0.212
	112	0.58	345.88	68.89	1.05	0.199
	365	0.58	597.55	132.16	0.91	0.221
Hungry Horse	104	0.55†	158.18	35.15	0.90	0.222
	140	0.55†	213.71	47.80	0.89	0.224
	622	0.60†	123.02	28.12	0.86	0.229
Monticello	28	0.62†	196.84	42.88	0.93	0.218
	40	0.62†	289.64	66.78	0.85	0.231
Shasta	28	0.50	403.52	80.14	1.05	0.199
	28	0.60	345.88	74.52	0.95	0.215
	90	0.50	383.14	76.63	1.05	0.200
	90	0.50	463.28	95.61	1.01	0.206
	90	0.60	351.50	73.11	1.00	0.208
	245	0.50	430.24	86.47	1.04	0.201

注) * φ15×h30 cm の供試体で骨材最大寸法は 40 mm

† W/C+P

参考 1-2 表 各ダムに使用されている粗骨材の種類※

ダム名	粗骨材の種類
Grand Coulee	玄武岩
Hungry Horse	砂岩
Monticello	(砂岩 (硬質砂岩) 珪岩
Shasta	(安山岩 粘板岩

※: 「ダムおよび他の大型構造物に用いるマスコンクリート (その 2)」 から該当箇所を抜粋

Rayleigh 減衰の設定の妥当性について

1. Rayleigh 減衰の概要

Rayleigh 減衰は、質量マトリックスと剛性マトリックスの線形結合で減衰が与えられるものとして以下の式で表され、目標とした固有周期よりも周期が長い（振動数が小さい）振動に対しては係数 α が支配的となり、周期が短い（振動数が大きい）振動に対しては係数 β が支配的となる特徴がある。係数 α 及び β は、固有値解析の結果から卓越するモードを選定し、そのモードにおける固有振動数及び減衰定数から算出する方法が一般的である。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

$[C]$: 減衰係数マトリックス, $[M]$: 質量マトリックス,

$[K]$: 剛性マトリックス, α, β : 係数

今回工認においては、有効応力による時刻歴応答解析を実施する方針であるため、地震力による時系列での地盤剛性の軟化に伴い 1 次固有振動数は低振動数側へシフトすることを踏まえ、地盤応答が保守的となるよう $\alpha = 0$ の剛性比例型減衰とする。

係数 β については、「FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ「理論編」」の検討結果や先行サイトでの実績を参考に、 $\beta = 0.002$ を設定する。

2. 係数 β の妥当性確認

前述のとおり、係数 α 及び β の設定に当たっては、固有値解析の結果に基づいて定めることが一般的であることから、固有振動数及び減衰定数を定めずに決めた値である $\beta = 0.002$ を泊発電所の地盤条件に対して設定することの妥当性を確認する。

2.1 確認方法

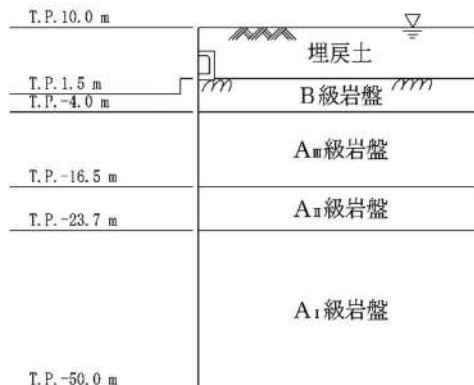
係数 β の確認方法は、「FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ「理論編」」で係数 β の設定方法の 1 つとして提案されている「自由地盤部の固有周期と減衰定数に基づく方法」により確認する。この方法は、自由地盤部の土層構造を用いて、1 次固有周期 T_G を求め、 $\beta = h \cdot T_G / \pi$ (h : 減衰定数) により係数 β を算定する方法である。 T_G は「建築基礎構造設計指針 (日本建築学会, 2001)」に基づき、 $T_G = 4 \sum (H_i / V_{S_i})$ (H_i : i 層の層厚 (m), V_{S_i} : i 層の S 波速度 (m/s)) により算定する。

上記の方法により係数 β を算定し、算定された β が 0.002 と同等以上であれば、 $\beta = 0.002$ による減衰は保守的な設定となっており妥当である。

2.2 検討条件

対象地盤は、泊発電所における屋外重要土木構造物の周辺地盤とし、時刻歴地震応答解析との整合性の観点から、時刻歴地震応答解析のモデル領域 (モデル高さ) に着目して選定する。建築基礎構造設計指針に基づく T_G から係数 β を算出する場合、係数 β が小さくなる条件は、「解析モ

「埋戻土層厚が小さい」であることを踏まえ、原子炉補機冷却海水管ダクト（最浅部）の地盤を検討対象とする。原子炉補機冷却海水管ダクト（最浅部）の地盤モデルを参考 2-1 図に示す。



参考 2-1 図 原子炉補機冷却海水管ダクト（最浅部） 地盤モデル

2.3 検討結果

原子炉補機冷却海水管ダクト（最浅部）における係数 β の算定結果を参考 2-1 表に示す。 $\beta = 0.003 \geq 0.002$ より、泊発電所の地盤に対して $\beta = 0.002$ は保守的な設定であり妥当である。

参考 2-1 表 原子炉補機冷却海水管ダクト（最浅部）における係数 β の算定結果

地盤	層上面標高 T.P. (m)	層厚H (m)	S波速度 V_s (m/s)	H/V_s (s)
埋戻土	10.0	1.0	150.6	0.007
	9.0	1.0	196.7	0.005
	8.0	1.0	222.6	0.004
	7.0	1.0	241.6	0.004
	6.0	1.0	256.8	0.004
	5.0	1.0	269.7	0.004
	4.0	1.0	280.8	0.004
	3.0	1.0	290.8	0.003
	2.0	0.5	297.6	0.002
B級岩盤	1.5	5.5	1,300	0.004
A _{III} 級岩盤	-4.0	12.5	1,400	0.009
A _{II} 級岩盤	-16.5	7.2	1,700	0.004
A _I 級岩盤	-23.7	26.3	1,800	0.015
	-50.0	—	1,800	—
合計 (s)				0.069
1次固有周期 T_G (s)				0.276
係数 β (注)				0.003

(注)：減衰定数 $h = 3\%$ として係数 β を算定している。

泊発電所3号炉

後施工せん断補強筋による
耐震補強について

目次

1. 概要
 2. Ccb 工法について
 - 2.1 Ccb 工法の適用部位
 - 2.2 Ccb 工法の概要
 3. 泊3号炉における Ccb 工法の適用性の確認
 - 3.1 適用性確認方法
 - 3.2 適用範囲の確認
 - 3.2.1 女川2号炉における Ccb 工法の適用性確認結果
 - 3.2.2 泊3号炉における適用範囲の確認
 - 3.3 泊3号炉における Ccb 工法の設計上の制限
 - 3.3.1 耐震補強を行うにあたっての設計上の制限
 - 3.3.2 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー
 4. 泊3号炉における Ccb 工法の適用性確認のまとめ
- 添付資料1 女川2号炉における建設技術審査証明報告書適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認内容
- 添付資料2 泊3号炉におけるコンクリートの健全性の検討
- 参考資料1 建設技術審査証明報告書の概要
- 参考資料2 Ccb の施工精度に影響を与える項目の確認
- 参考資料3 施工実績・研究事例

1. 概要

泊3号炉の屋外重要土木構造物等^(注)には、基準地震動の大加速度化に伴い、せん断破壊に対して耐震補強工事が必要となる既設鉄筋コンクリート構造物がある。

せん断破壊に対する補強工法としては、部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法の他に、増厚工法や地盤改良工法等があるが、泊3号炉の屋外重要土木構造物等については、部材の耐力を直接向上させる合理的な補強工法で、後施工せん断補強工法の一つである、セラミックキャップ（以下「CCb」という。）工法を採用している。（第1-1表、第1-2表参照）

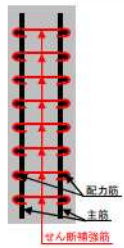
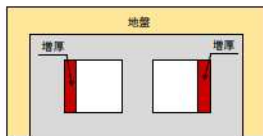
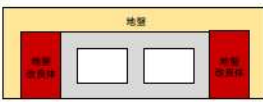
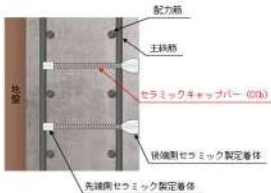
CCb工法は、第1-1図に示すとおり、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、部材を削孔後、その孔内にCCbを挿入し、グラウト充てんにて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

CCbにより耐震補強を行った構造物の一覧を第1-2表、耐震補強箇所及び補強概要を第1-2図及び第1-3図に示す。

本資料は、本補強工法が開発された際の実験の範囲と泊3号炉で用いる部材厚や破壊形態に差異があること等から、CCb工法を採用する目的、効果及び泊3号炉への適用性について説明するものである。

(注)：「屋外重要土木構造物」、「常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備」、「常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く）」のいずれかに該当するか、又は兼務する構造物を「屋外重要土木構造物等」とする。

第1-1表 主なせん断補強工法

	従来工法（先施工）	増厚工法	地盤改良工法	後施工せん断補強工法
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋又は配力筋にフックを掛けて定着させる工法。 ・ せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設コンクリート構造物表面にコンクリートを打ち増しすることで、断面を増厚する工法。 ・ 部材厚の増により、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設コンクリート構造物周辺地盤にセメントミルク等を噴射し、地盤改良体を構築する工法。 ・ 地盤改良を行うことにより、地震時荷重（主に土圧）が低減され、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にせん断補強筋を差し込み充てん材で固定する工法。 ・ せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。
図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・ 泊3号炉他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 泊3号炉他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 泊3号炉他、多数の施工実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 女川2号炉にて、工認実績有り。（セラミックキャップ（CCb）工法）

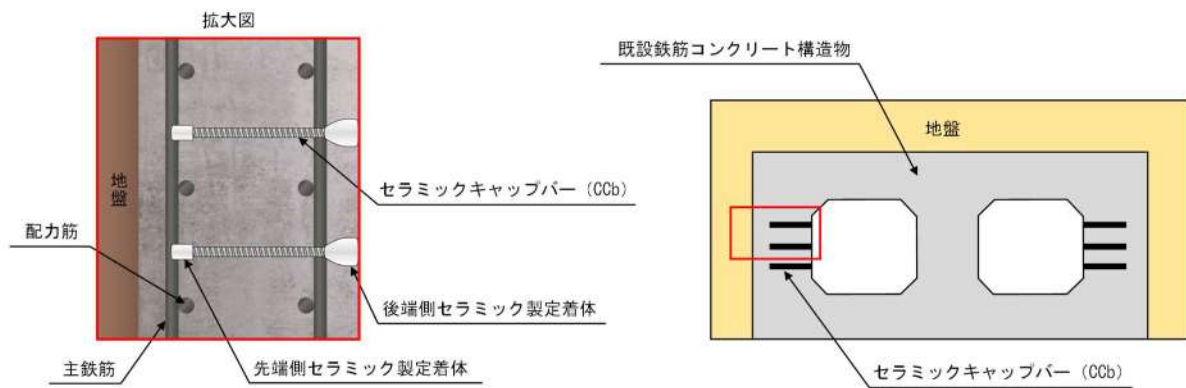
第 1-2 表 Ccb により耐震補強を行った構造物^(注1)

構造物名称 ^(注2)	部 材	部材厚 (mm)	CCb 径	せん断スパン比 ^(注3)
取水ピット スクリーン室	頂版	1,000	D22	4.38
	側壁	2,000	D22	3.07
	隔壁	1,200	D22	5.32
		1,500	D22	4.17

(注1)：今後の評価により、CCb により耐震補強を行う構造物は増える可能性がある。

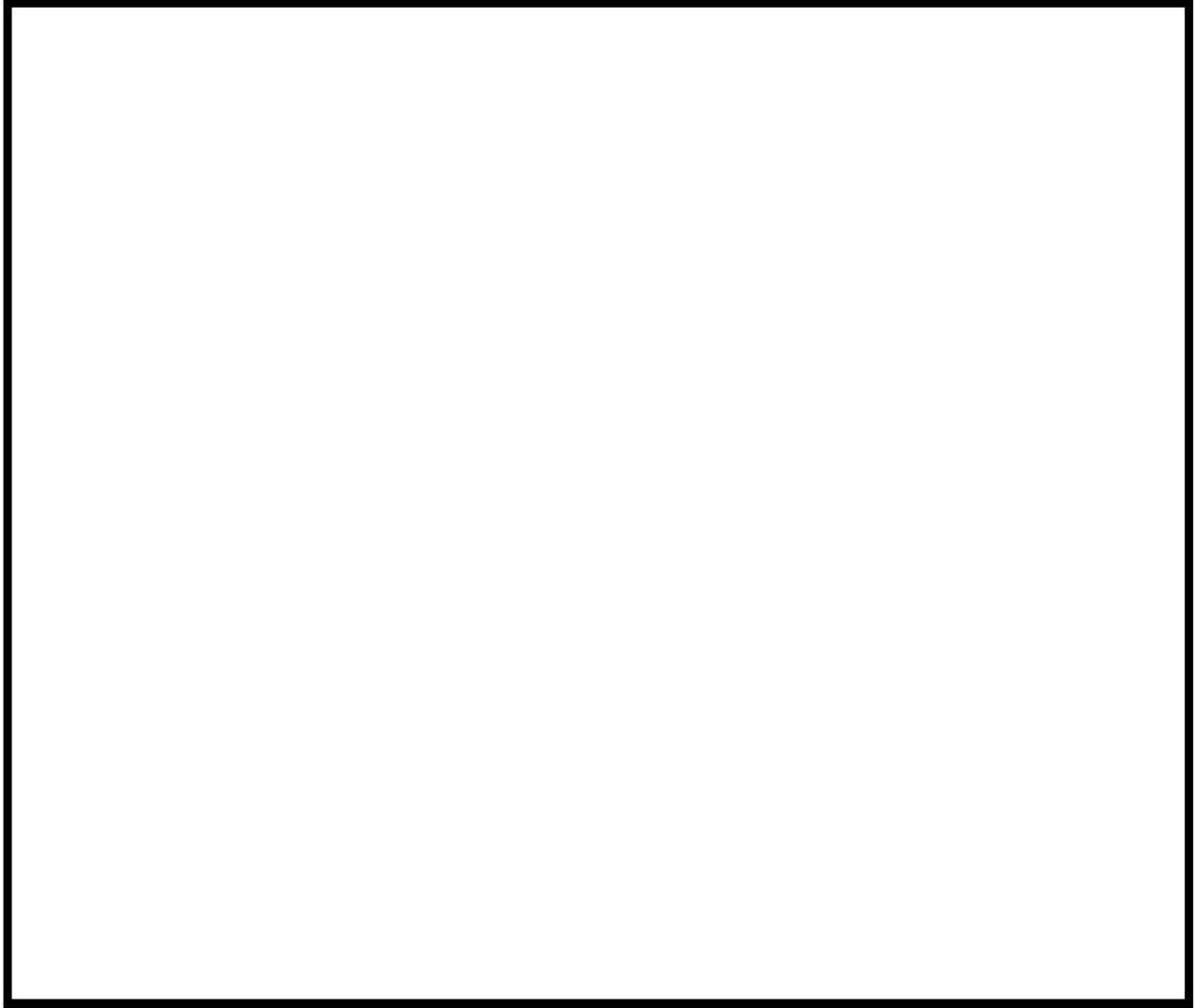
(注2)：トラッシュピットも CCb により耐震補強を行っているが、撤去予定のため除外している。

(注3)：せん断スパン比： a/d (a ：支間長， d ：有効高さ)



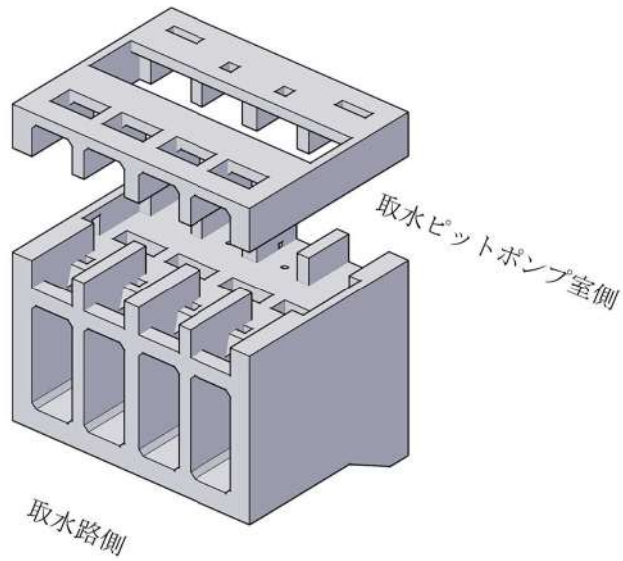
第 1-1 図 Ccb 工法の概要図^(注)

(注)：セラミックキャップバー (CCb) 工法研究会 HP より引用。一部修正・加筆。

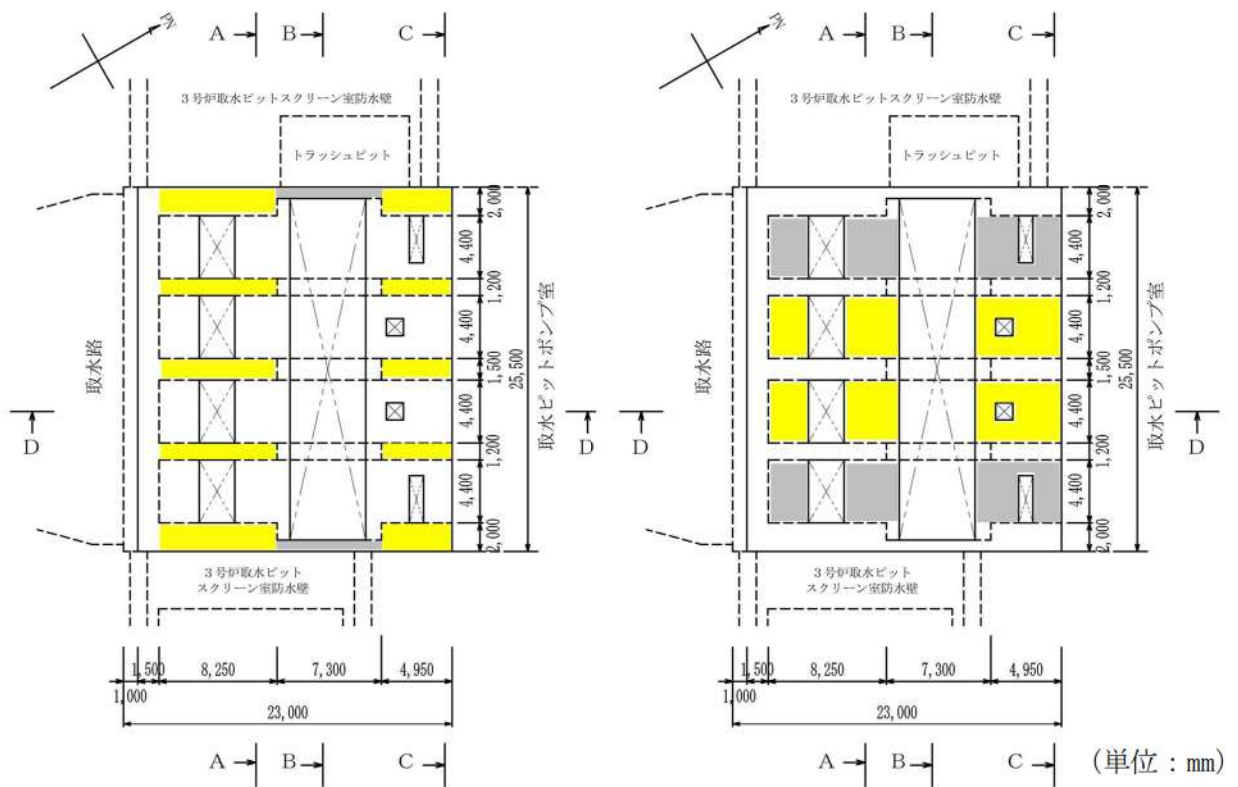


第 1-2 図 Ccb により耐震補強を行った構造物（配置図）

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



鳥瞰図



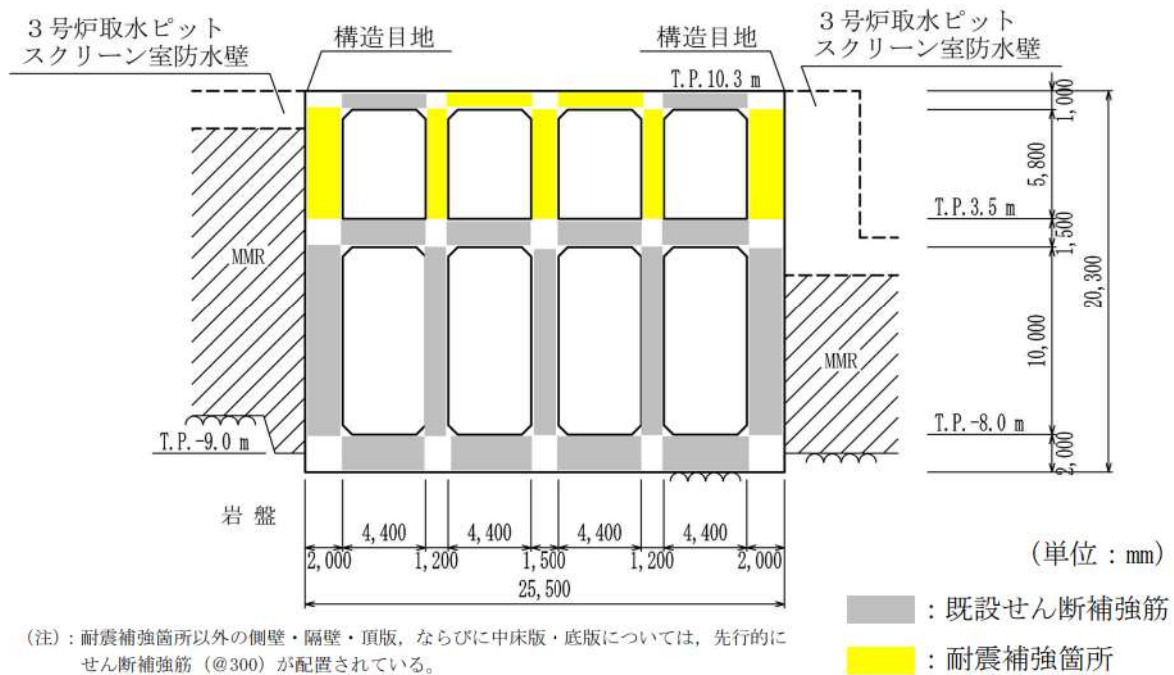
(注)：トラッシュピットは、3号炉取水ピットスクリーン室防水壁の構築に伴い撤去する予定である

■：既設せん断補強筋

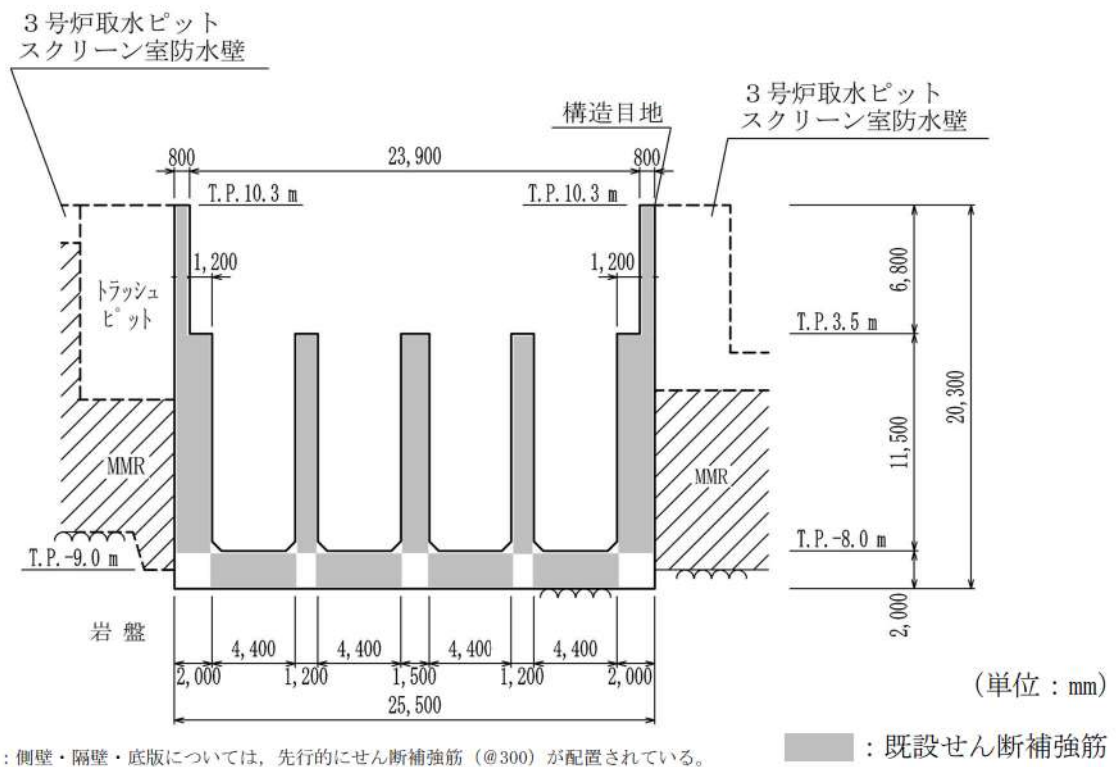
■：耐震補強箇所

平面図 (左：側壁・隔壁，右：頂版)

第 1-3 図 Ccb により耐震補強を行った構造物 (取水ピットスクリーン室) (1/3)

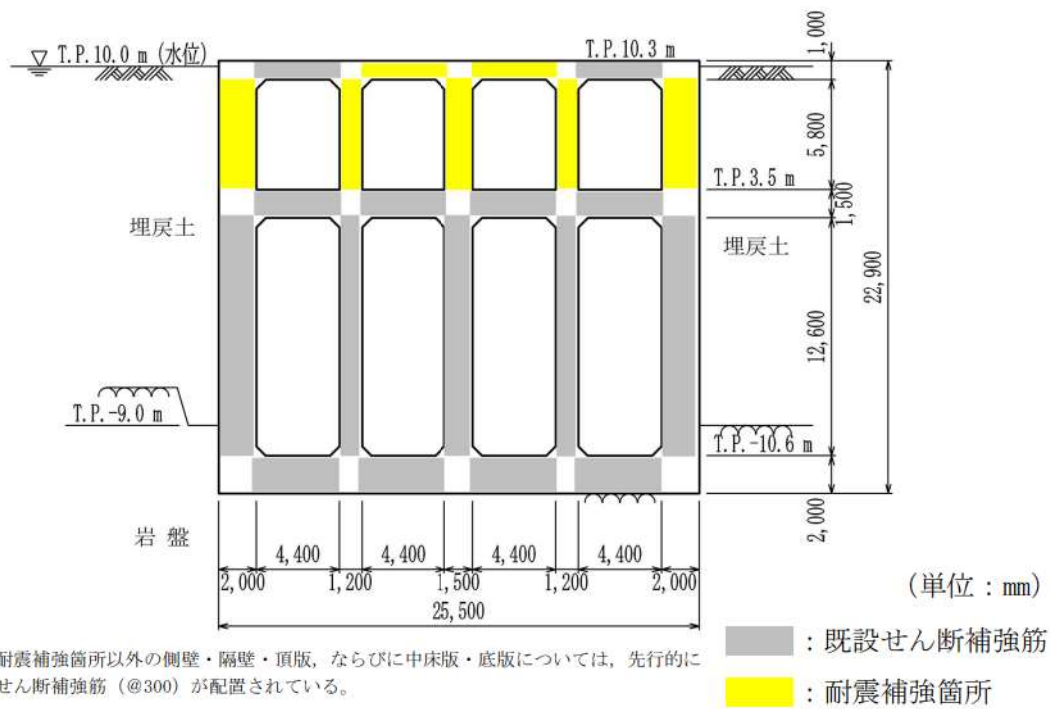


A-A 断面

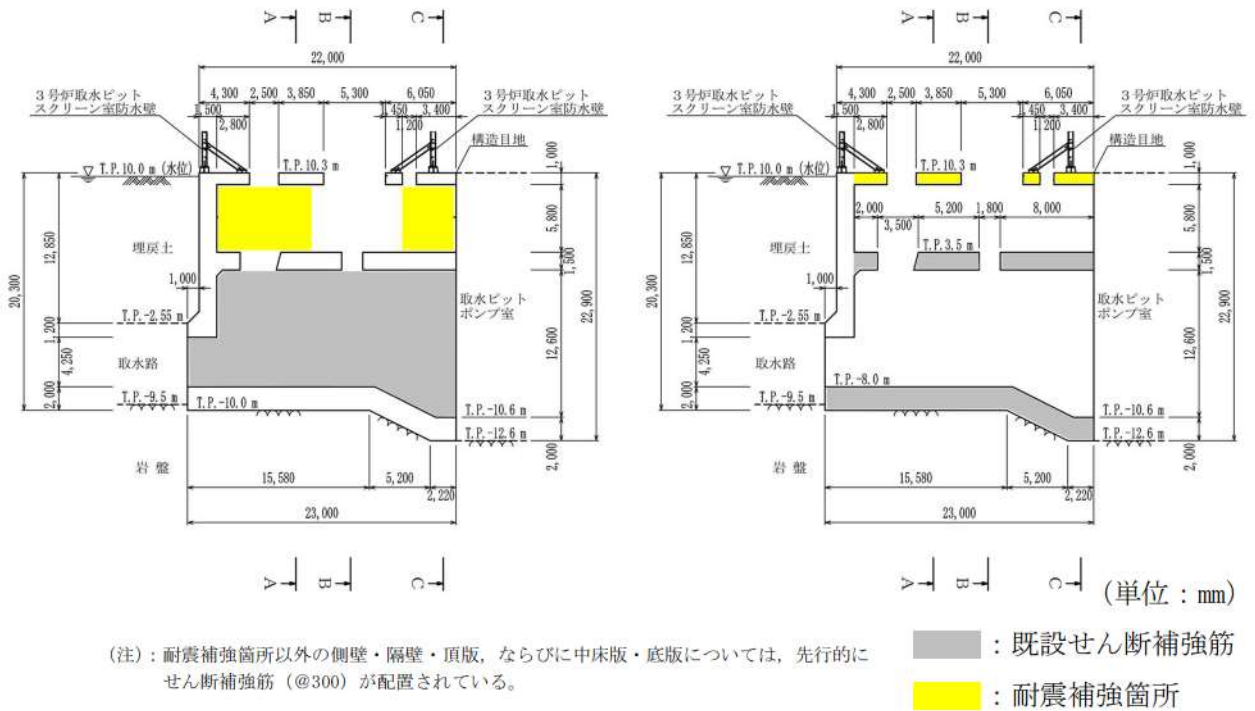


B-B 断面

第 1-3 図 Ccb により耐震補強を行った構造物 (取水ピットスクリーン室) (2/3)



C-C 断面



D-D 断面 (左：隔壁，右：頂版・中床版・底版)

第 1-3 図 Ccb により耐震補強を行った構造物 (取水ピットスクリーン室) (3/3)

2. Ccb 工法について

2.1 Ccb 工法の適用部位

泊3号炉の屋外重要土木構造物等においては、基準地震動発生時に屋外重要土木構造物等としての機能（設計基準対象施設のうち耐震Sクラス施設の間接支持機能、重大事故等対処施設の間接支持機能、非常時における海水の通水機能、貯水機能及び止水機能）を維持するために、耐震安全性を確保する必要がある。そのため、屋外重要土木構造物等の一部の部材においては、せん断に対する安全性を確保するために、Ccb 工法を適用し、せん断耐力の向上を図っている。

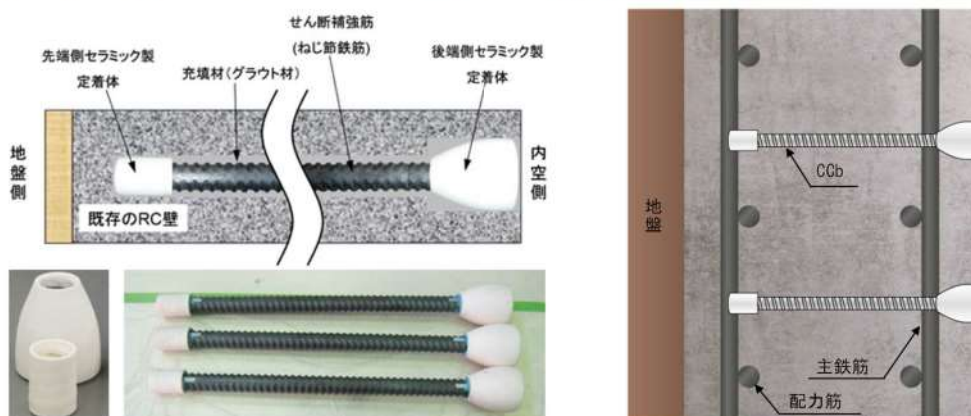
Ccb 工法を適用した部材は、第 1-2 表並びに第 1-2 図及び第 1-3 図に示すとおり、取水ピットスクリーン室の隔壁、側壁、頂版である。

2.2 Ccb 工法の概要

Ccb 工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、Ccb を既設の鉄筋コンクリート構造物の部材に挿入・一体化させて、せん断耐力を向上させるものである。Ccb は第 2-1 図に示すように、せん断補強筋の両端に耐腐食性に優れたセラミック製の定着体を取り付けた構造となっている。

Ccb 工法の具体的な施工方法は、第 2-1 表に示すように、既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にせん断補強材である Ccb を差し込み、充填材で固定することにより構造躯体と一体化を図っており、従来工法（先施工）とは施工方法が異なる。

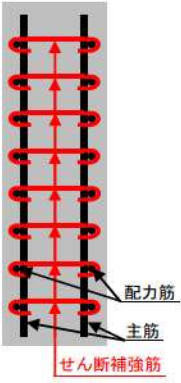
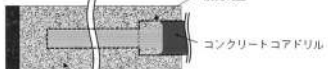
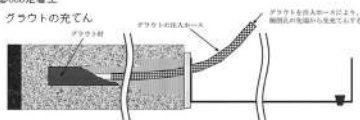
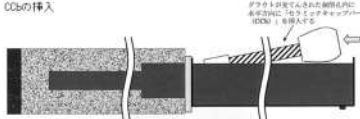
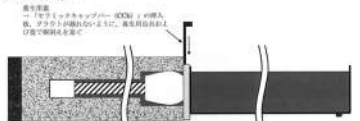
また、Ccb 工法は第 2-2 表に示すように、「セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）」と「セラミック定着体及び Ccb とコンクリート間の付着（先端側）」により定着しており、フックを掛けて定着する従来工法（先施工）とは定着機構が異なる。そのため、Ccb 工法では設計・照査において、通常の従来工法（先施工）であるせん断補強筋によるせん断耐力に有効性を示す係数（ β_{aw} ）を乗じることにより、せん断補強効果を評価している。



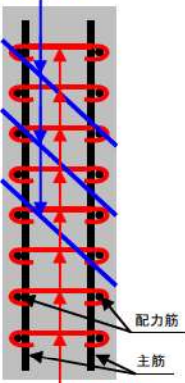
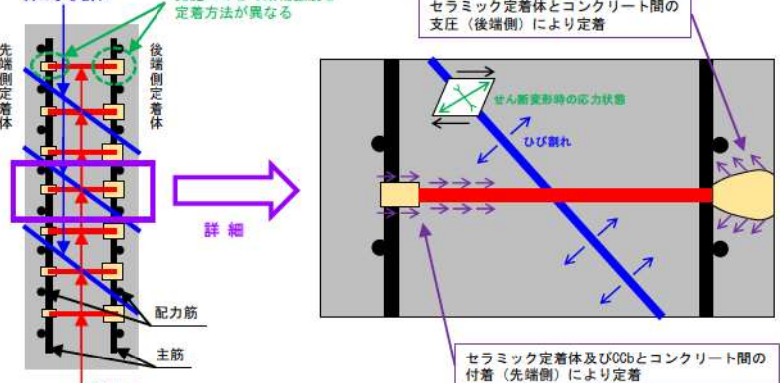
第 2-1 図 Ccb の詳細図 (注)

(注)：セラミックキャップバー（Ccb）工法研究会及び鹿島建設 HP より引用。一部修正・加筆。

第 2-1 表 施工方法の違い

従来工法（先施工）	CCb 工法（後施工）
	<p>①削孔工 コンクリートコアドリルによる削孔</p>  <p>既設鉄筋コンクリート構造物</p> <p>②CCb 定着工 グラウトの充てん</p>  <p>CCb の挿入</p>  <p>養生用蓋の設置</p> 
<ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋又は配力筋にフックを掛けて設置している。 ・ 多数の施工実績があり、コンクリート打設前にせん断補強筋を設置するという確実性の高い施工方法である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内に CCb を差し込み、充てん材で一体化している。 ・ 従来工法（先施工）と比較すると施工実績が少なく、既設コンクリートを削孔して部材と直交する方向に CCb を設置し、削孔部をグラウトにて充てんするものである。

第 2-2 表 定着機構の違い

従来工法（先施工）	CCb 工法（後施工）
<p>斜めひび割れ</p>  <p>配力筋 主筋 せん断補強筋</p>	<p>斜めひび割れ</p> <p>先施工のせん断補強筋と定着方法が異なる</p> <p>先端側定着体</p> <p>後端側定着体</p> <p>CCb</p> <p>セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）により定着</p> <p>せん断発生時の応力状態</p> <p>ひび割れ</p> <p>セラミック定着体及びCCbとコンクリート間の付着（先端側）により定着</p> <p>詳細</p> 
<ul style="list-style-type: none"> ・ せん断補強筋は、主筋又は配力筋にフックを掛けて定着しており、主に当該部にて定着効果を期待している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ CCb は「セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）」と「セラミック定着体及び CCb とコンクリート間の付着（先端側）」により定着している。

3. 泊3号炉におけるCCb工法の適用性の確認

3.1 適用性確認方法

CCb工法は、一般財団法人土木研究センターの『建設技術審査証明報告書（土木系材料・製品・技術、道路保全技術） 技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー（CCb）」、建技審証第0811号、有効期限：2024年2月2日』（以下「建設技術審査証明報告書」という。）により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、これまでに数多くの施工実績がある。

CCb工法を泊3号炉の屋外重要土木構造物等に適用するにあたり、女川2号炉における適用性確認結果及び適用実績から適用範囲を整理し、泊3号炉の屋外重要土木構造物等へのCCb工法の適用性について確認する。

3.2 適用範囲の確認

3.2.1 女川2号炉におけるCCb工法の適用性確認結果

女川2号炉では、建設技術審査証明報告書に記載されている適用範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出し、抽出した項目に対して、女川2号炉で採用した補強仕様が建設技術審査証明報告書の適用範囲に収まっているかを確認しており、適用範囲外となった項目については、数値解析や実験等を実施し、せん断補強効果が期待できることを確認している。女川2号炉における建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認結果を第3-1表に、適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認内容については添付資料1に示す。

上記を踏まえた、建設技術審査証明報告書に記載されている適用範囲及び女川2号炉において適用性が確認されたCCb工法の適用範囲を整理した結果を第3-2表に示す。

なお、本資料で示す女川2号炉における確認内容等の記載については、会合資料等に基づき弊社の責任において独自に解釈・整理したものである。

第3-1表 女川2号炉における建設技術審査証明報告書の適用範囲確認結果(1/2)

適用性確認項目	建設技術審査証明報告書の適用範囲	女川2号炉における適用状況	適用範囲確認結果	補強効果確認方法	備考
使用目的	応答変位量が限定される地中構造物であって、壁状の既設鉄筋コンクリート部材に対して後施工によるせん断補強を目的とする。	左記のとおり	○	—	
構造形式	原子力施設等の重要地下構造物, 高速道路, 鉄道及び上下水処理施設等の地下構造物等。	左記のとおり	○	—	
構造細目	せん断補強鉄筋比	左記のとおり	○	—	
	最大配置間隔	左記のとおり	○	—	
	部材厚	700~4,700mm	×		
部材諸元	せん断スパン比	0.83~49.61	×		
	主鉄筋比	0.054~1.974%	×		
載荷方法	荷重形態	集中荷重系及び分布荷重系	×		
	せん断補強筋	D13~D32 SD295A, SD295B, SD345	○	—	
使用材料	セラミック定着体	左記のとおり	○	—	
	充てん材	躯体コンクリート以上の強度	○	—	
	せん断補強筋の定着長	左記のとおり	○	—	
				数値解析により確認	添付資料1 2.(1)(2) 参照

(注)：女川2号炉に係わる記載については、会合資料等に基づき弊社の責任において独自に解釈・整理したものの。

第3-1表 女川2号炉における建設技術審査証明報告書の適用範囲確認結果(2/2)

適用性確認項目	建設技術審査証明報告書の適用範囲	適用範囲確認結果	補強効果確認方法	備考
せん断ひび割れ抑制効果の確認	建設技術審査証明報告書の適用範囲 女川2号炉における適用状況 建設技術審査証明報告書の試験と女川2号炉においてCCbを適用した構造物の諸元が異なることから、適用範囲外の項目として補強効果の確認を実施。	×	数値解析により確認	添付資料1 2.(3)参照
ひび割れに対する定着機能の保持	建設技術審査証明報告書の試験と女川2号炉においてCCbを適用した構造物では、発生するひび割れ性状が異なる可能性があること、実験と性状が異なるひび割れが生じても定着機能が保持されていることを確認する必要があることから、適用範囲外の項目として補強効果の確認を実施。	×	建設技術審査証明報告書の試験の考察により確認	添付資料1 2.(4)参照
変形量	実験の変形量(1%を超える範囲)	○	—	
使用環境	層間変形角1%に十分な余裕をもって使用 硫酸等の影響を受ける腐食環境下における下水道施設での施工実績がある。 海水環境下	○	—	
CCbを適用した部材のコンクリートの健全性	CCbのせん断補強効果を発揮するためには、コンクリートが健全であり、補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認する必要があることから、適用範囲外の項目として補強効果の確認を実施。	×	ひび割れ状況の確認及び圧縮強度試験により確認	添付資料1 2.(5)参照
デュープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性	せん断スパン比及び荷重形態から、デュープビーム的な破壊となる可能性がある部材にも適用している。	×	模型実験により確認	添付資料1 2.(6)参照
面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性	面内荷重と面外荷重が作用する部材への適用性は未確認。	×	数値解析により確認	添付資料1 2.(7)参照

(注)：女川2号炉に係わる記載については、会合資料等に基づき弊社の責任において独自に解釈・整理したものの。

第 3-2 表 建設技術審査証明報告書及び女川 2 号炉における適用性確認結果を踏まえた Ccb 工法の適用範囲

適用性確認項目		適用範囲
使用目的		地中構造物の既設鉄筋コンクリート部材に対する後施工せん断補強
構造形式		原子力施設等の重要地下構造物等
構造細目	せん断補強鉄筋比	0.15%以上
	最大配置間隔	補強部材の有効高さの 1/2 以下
部材諸元	部材厚	500～4,700mm
	せん断スパン比	0.83～49.61
	主鉄筋比	0.054～1.974%
載荷方法	荷重形態	集中荷重系及び分布荷重系
使用材料	せん断補強筋	D13～D32 SD295A, SD295B, SD345
	セラミック定着体	所定の材料、製造工程で製作され、所定の頻度で検査されたもの
	充てん材	躯体コンクリート以上の強度
せん断補強筋の定着長		5D
変形量		層間変形角 1%に十分な余裕をもって使用
使用環境		腐食環境下、海水環境下等
ディープビームへの適用		適用可
面内荷重と面外荷重が同時に作用する部材への適用		適用可
その他		<ul style="list-style-type: none"> 建設技術審査証明報告書の実験にて確認していない諸元においても、せん断ひび割れ抑制効果が発揮されることを確認 定着体部やその周囲にひび割れが発生した状態においても定着機能が保持されることを確認 Ccb を適用した部材のコンクリートの健全性を別途確認

(注)：女川 2 号炉に係わる記載については、会合資料等に基づき弊社の責任において独自に解釈・整理したもの。

3.2.2 泊 3 号炉における適用範囲の確認

泊 3 号炉における Ccb により耐震補強を行った構造物における適用性確認結果を第 3-3 表に示す。

泊 3 号炉において Ccb による耐震補強を行った構造物は、第 3-2 表に示す適用範囲に収まっていることから、泊 3 号炉における Ccb 工法の適用性について問題ないことを確認した。

ただし、第 3-1 表に示す適用性確認項目のうち Ccb を適用した部材のコンクリートの健全性については、サイトごとに状況が異なることから、ひび割れ状況の確認及び非破壊試験により確認する。詳細は添付資料 2「泊 3 号炉におけるコンクリートの健全性の確認」に示す。

第3-3表 泊3号炉におけるCCbにより耐震補強を行った構造物における適用性確認結果

適用性確認項目	適用範囲	泊3号炉取水ピットスクリーン室				泊3号炉 適用性 確認結果	
		頂版	側壁	隔壁			
使用目的	地中構造物の既設鉄筋コンクリート部材に対する後施工せん断補強	左記のとおり				○	
構造形式	原子力施設等の重要地下構造物等	左記のとおり				○	
構造 細目	せん断補強鉄筋比	0.15%以上	0.22	0.22	0.22	0.22	○
	最大配置間隔(mm) ^(注)	補強部材の有効高さの1/2以下	300 (890)	300 (1,890)	300 (1,090)	300 (1,390)	○
部材 諸元	部材厚(mm)	500~4,700	1,000	2,000	1,200	1,500	○
	せん断スパン比	0.83~49.61	4.38	3.07	5.32	4.17	○
	主鉄筋比(%)	0.054~1.974	0.59	0.28	0.70	0.55	○
載荷 方法	荷重形態	集中荷重系及び分布荷重系	分布荷重	分布荷重	集中荷重	集中荷重	○
使用 材料	せん断補強筋	D13~D32 SD295A, SD295B, SD345	D16~D32 SD345			○	
	セラミック 定着体	所定の材料, 製造工程で製作され, 所定の頻度で検査されたもの	左記のとおり			○	
	充てん材	躯体コンクリート以上の強度	躯体コンクリート以上の強度			○	
せん断補強筋の定着長		5D	5D			○	
変形量		層間変形角1%に十分な余裕をもって使用	層間変形角1%に十分な余裕をもって使用			○	
使用環境		腐食環境下, 海水環境下等	海水環境下			○	

(注) : カッコ内の数値は部材の有効高さを示す。

3.3 泊3号炉におけるCCb工法の設計上の制限

泊3号炉において, CCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限について整理する。

3.3.1 耐震補強を行うにあたっての設計上の制限

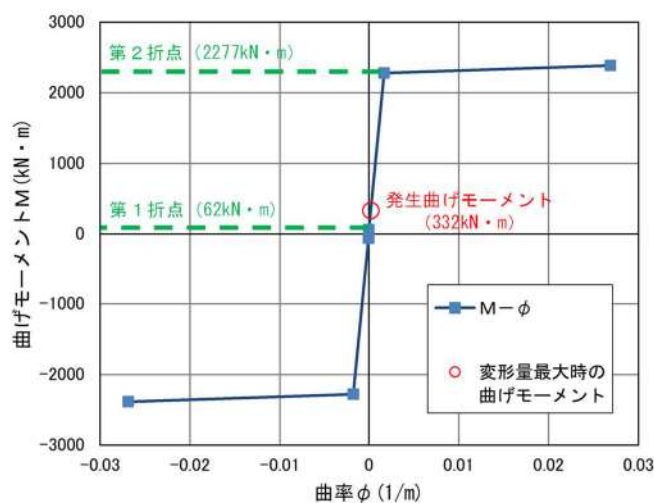
建設技術審査証明報告書の梁試験では、主鉄筋にSD490（降伏ひずみ2,450 μ ）を使用しており、主鉄筋ひずみが2,363 μ まで達した状態でのひび割れ状況においてもせん断耐力を保持していることが確認されていることから、面内せん断力と面外力の合力により鉄筋に生じる応力が降伏強度以下（おおむね弾性範囲）となる状況下でCCb工法を使用する。

確認例として、取水ピットスクリーン室の評価結果（基準地震動Ss3-4による照査結果（暫定値））を示す。取水ピットスクリーン室は、部材非線形解析（M- ϕ モデル）により評価していることから、M- ϕ 曲線の第2折れ点（主鉄筋の降伏に相当）以下であることを確認する。第3-1図に示すとおり、応答値M- ϕ 曲線の第1折点（ひび割れ発生）付近であり、主鉄筋は降伏していないためCCb工法が適用可能であることがわかる。

建設技術審査証明報告書の梁試験では層間変形角が1%（1/100）を超えている範囲までせん断耐力が保持されていることが確認されているが、かぶりコンクリートの剥落によってCCbの定着機能を阻害するおそれがある。そのため、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である層間変形角1%（1/100）に、十分な余裕をもってCCb工法を使用する。

面内荷重と面外荷重が作用する部材については、女川2号炉の検討を参考に、面内せん断ひずみが750 μ までの範囲内においてCCb工法を使用する。

参考資料2「CCbの施工精度に影響を与える項目の確認」に示すとおり、施工上の配慮により、せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下が生じる可能性は低いと考えられるが、施工精度の低下が生じる可能性は低いながらも完全に否定できるものではないこと等から、設計上の配慮として耐震評価上の裕度（せん断破壊に対する照査値を0.8程度に抑える）を持たせた設計を行う。

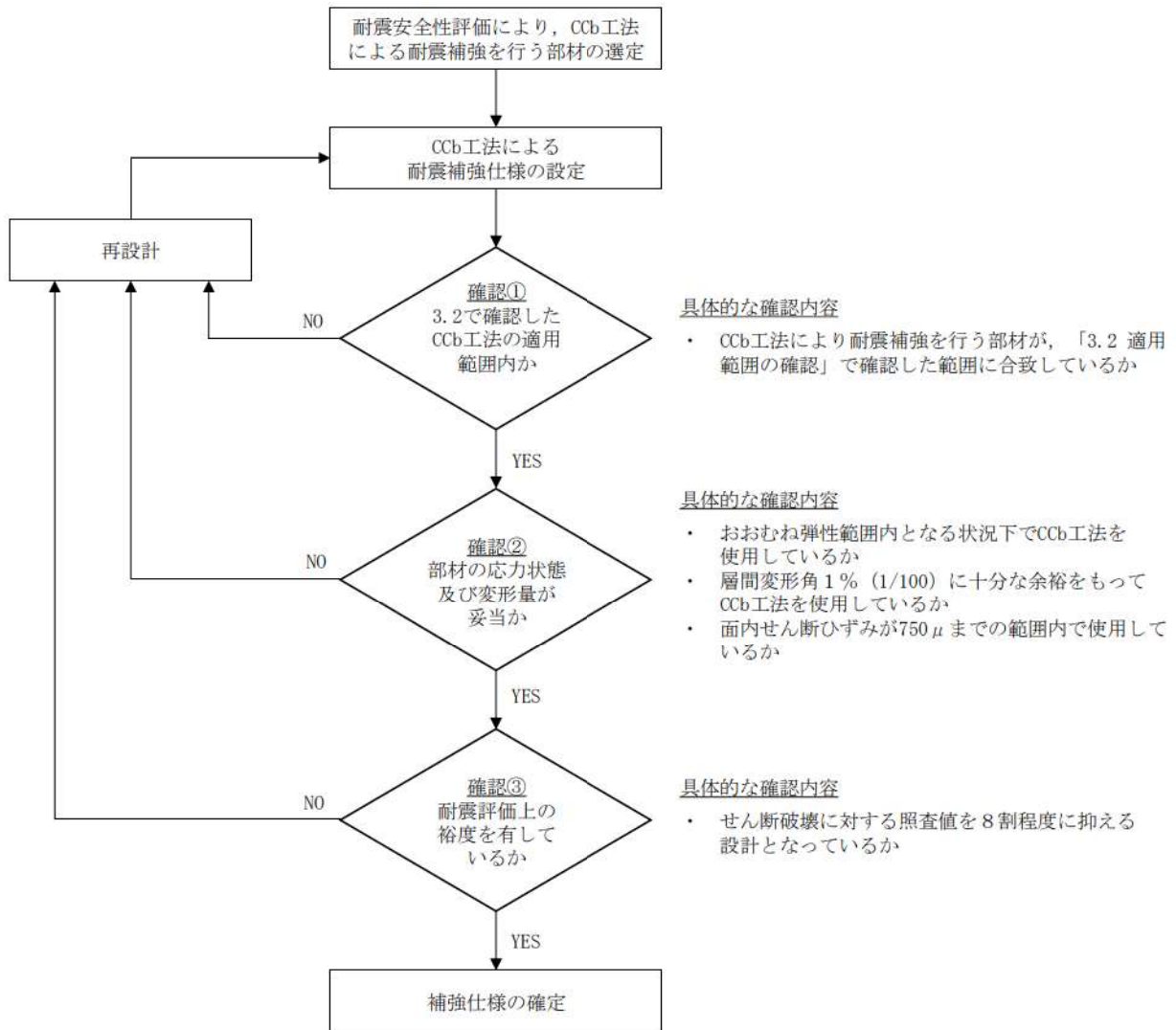


第3-1図 取水ピットスクリーン室のM- ϕ 曲線（暫定値^(注)）

(注)：詳細設計段階で選定する解析手法等により、変更となる可能性がある。

3.3.2 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

3.3.1 に示す，泊 3 号炉において Ccb により耐震補強を行うにあたっての設計上の制限を考慮した設計検討フローを第 3-2 図に示す。



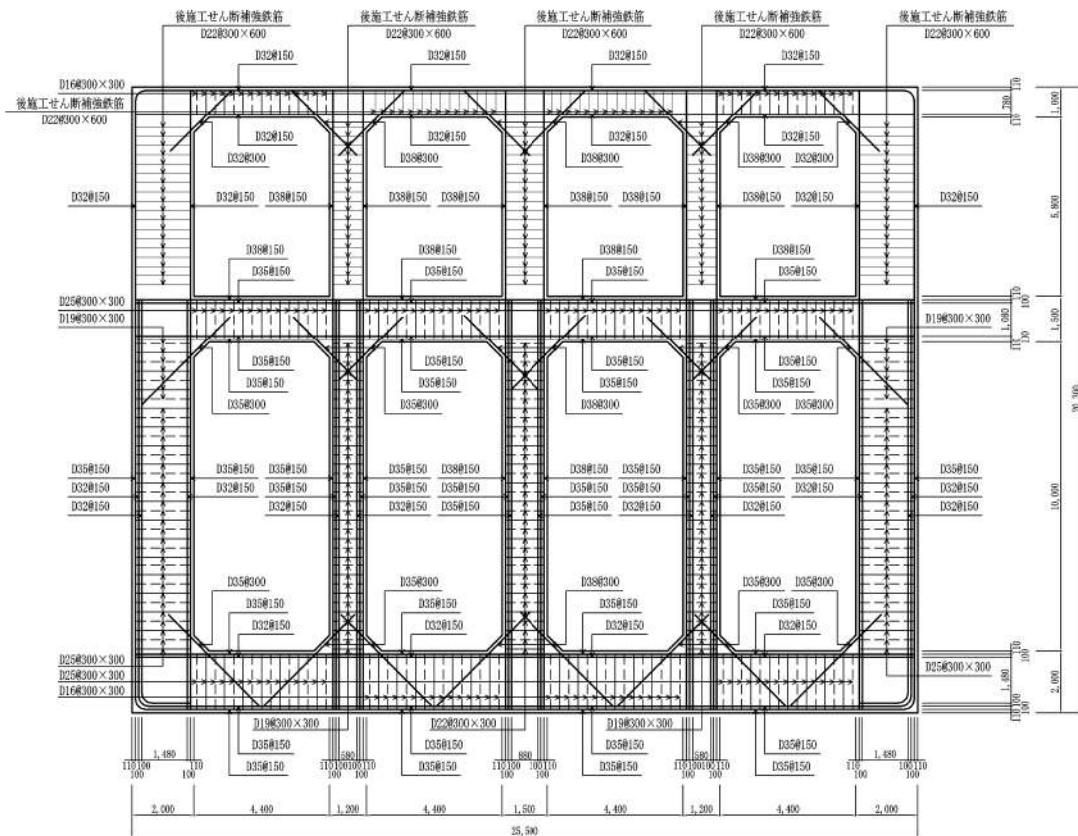
第 3-2 図 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

4. 泊3号炉におけるCCb工法の適用性確認のまとめ

泊3号炉の取水ピットスクリーン室はCCb工法により耐震補強を行っており、その適用性については、補強仕様^(注)(第4-1図参照)が、先行サイトでの適用実績を踏まえて整理した適用範囲内に収まっていることにより確認した。

また、建設技術審査証明報告書の実験で確認できている範囲及び女川2号炉での適用実績を踏まえ、泊3号炉にてCCb工法を適用するにあたっての設計上の制限を設定し適用することとした。

今後、詳細設計段階においてCCb工法による耐震補強を行う構造物が追加となる場合は、今回整理した適用範囲に収まっているかを確認し、適用範囲外となる場合、又は適用範囲内であっても女川2号炉で実施している数値解析や実験の条件から大きく逸脱する場合には、女川2号炉を参考に、数値解析又は実験等によりCCbによるせん断補強効果が期待できることを確認する。



第4-1図 取水ピットスクリーン室の補強仕様

(注)：補強仕様については、今後変更となる可能性がある。

女川 2 号炉における建設技術審査証明報告書適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認内容

1. はじめに

女川 2 号炉では、建設技術審査証明報告書に記載されている適用範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出し、抽出した項目に対して、女川 2 号炉で採用した補強仕様が建設技術審査証明報告書の適用範囲に収まっているかを確認しており、適用範囲外となった項目に対して数値解析や実験等を実施し、せん断補強効果が期待できることを確認している。

本資料では、女川 2 号炉において実施した上記確認結果の概要について整理した。

なお、本資料は女川 2 号炉の会合資料等に基づき、弊社の責任において独自に解釈・整理したものである。

女川 2 号炉で採用した補強仕様が建設技術審査証明報告書の適用範囲外となった項目は、以下の 7 項目である。

- (1) 部材諸元（部材厚・せん断スパン比・主鉄筋比）
- (2) 載荷方法（荷重形態）
- (3) せん断ひび割れ抑制効果の確認
- (4) ひび割れに対する定着機能の保持
- (5) CCb を適用した部材のコンクリートの健全性
- (6) ディープビーム的な破壊に対する CCb 工法の適用性
- (7) 面内荷重と面外荷重が作用する部材への CCb 工法の適用性

各項目に対する女川 2 号炉における確認内容の概要を 2 章に示す。

2. せん断補強効果の確認

- (1) 部材諸元（部材厚・せん断スパン比・主鉄筋比）、(2) 載荷方法（荷重形態）、(3) せん断ひび割れ抑制効果の確認

女川 2 号炉では、部材諸元や載荷方法が建設技術審査証明報告書の実験と異なっても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果が期待できることを材料非線形解析により確認している。

女川 2 号炉における確認内容は以下のとおり。

【女川2号炉における確認内容】

- ・ 材料非線形解析による解析にて、以下の2項目について確認した。
 - ①「建設技術審査証明報告書の実験よりも大きな部材厚に対する適用性の確認」
 - 女川2号炉においてCCbにより耐震補強を行った構造物のうち最も部材厚が大きい軽油タンク室底版(t=1,500mm)を想定して解析を実施し、実験よりも大きな部材厚に対する適用性を確認した。【添付1-1表の①】
 - ②「実施工部材の応答性状の確認」
 - 女川2号炉においてCCbにより耐震補強を行った構造物のうち取水路(漸拡部)隔壁を対象に解析を実施し、女川2号炉で用いた部材及び荷重レベルでの適用性を確認した。【集中荷重系：添付1-1表の②-1】
 - また、荷重形態や破壊形態の違いに着目し、土圧による分布荷重が作用する軽油タンク室側壁についても同様に適用性を確認した。【分布荷重系：添付1-1表の②-2-1,2】
- ・ 上記の解析においては、従来工法(先施工)による材料非線形解析との比較を実施した。
- ・ 解析ケースの概要について添付1-1表に示す。

添付1-1表 解析ケース概要

	部材厚 (mm)	せん断 スパン比	主鉄筋比 (%)	コンクリート強度 (N/mm ²)	荷重方法
①	1500	2.78	1.28	42.4	強制変位 (集中荷重系)
②-1	1200	6.17	0.44	20.5	断面力に基づく 節点力(集中荷重系)
②-2-1	1200	4.50	0.71	20.5	断面力に基づく 節点力(分布荷重系)
②-2-2					等分布荷重

- ・ いずれのケースにおいても、CCb工法がせん断補強効果に影響を与えるような特異な状況は確認されなかった。また、初期ひび割れ発生時において、変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況は、従来工法とCCb工法の間で顕著な差は確認されず、おおむね整合的な結果となった。
- ・ 以上のことから、建設技術審査証明報告書の実験と部材諸元及び荷重方法等が異なっても、せん断ひび割れ抑制効果を確認できており、CCb工法が適用できることを確認した。

なお、女川2号炉では、工認段階において、数値解析で確認した部材厚よりも大きな部材及び数値解析で確認したせん断スパン比よりも小さなせん断スパン比の部材にも Ccb 工法を適用しているが、部材厚が大きくなるほど、せん断耐力算出時における有効係数 β_{aw} が大きくなり、先施工との差異がなくなることから、部材厚が大きくなることによる影響はないことを確認している。

また、せん断スパン比が小さいことによる影響としてディープビームとなる部材への適用性は、模型実験により確認している。(2.(6)参照)

(4) ひび割れに対する定着機能の保持

女川2号炉では、女川2号炉において Ccb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ（曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる45度を超える高角度のひび割れ）が Ccb の定着体部やその周囲に生じても、定着機能が保持されることを建設技術審査証明報告書の実験との対比により確認している。

女川2号炉における確認内容は以下のとおり。

【女川2号炉における確認内容】

- ・ 建設技術審査証明報告書の梁試験体による交番載荷試験において、女川2号炉において Ccb により耐震補強を行った構造物に発生する可能性があるひび割れ（曲げひび割れ、面内せん断力に伴う高角度の貫通ひび割れ及びディープビームに生じる45度を超える高角度のひび割れ）と同様のひび割れ性状を示すひび割れが再現されていることを確認した。
- ・ また、試験結果から、Ccb の定着体部やその周囲にひび割れが発生した状態においても、せん断耐力評価式から算出したせん断耐力以上の耐荷力を有していることを確認した。
- ・ 以上のことから、Ccb の定着体部やその周囲にひび割れが発生した状態においても、定着機能が保持されており、せん断補強効果が発揮されることを確認した。
- ・ ただし、建設技術審査証明報告書の実験は、曲げ降伏させないよう主鉄筋に高強度の鉄筋（SD490）を使用しており、せん断破壊時における主鉄筋のひずみが、降伏ひずみ未満の $2,363\mu$ まで確認されていることを踏まえ、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが降伏ひずみ $1,725\mu$ 以下（応力が降伏強度以下 345N/mm^2 ）、若しくは面内せん断力に対してコンクリートのみで抵抗可能な部材を対象に概ね弾性範囲となる状況下で Ccb 工法を適用することとした。

(5) Ccb を適用した部材のコンクリートの健全性

女川2号炉では、Ccb により耐震補強を行った構造物について、ひび割れ状況の確認及び圧縮強度試験を実施し、既設コンクリートの状態が、Ccb のせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認している。

女川2号炉における確認内容は以下のとおり。

【女川2号炉における確認内容】

- ・ コンクリートのひび割れ状況より、CCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れがないことを確認した。
- ・ また、構造物から採取したコンクリートコアの圧縮強度が、設計基準強度以上であり、CCbのせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認した。
- ・ 以上より、女川2号炉のCCbにより耐震補強を行った構造物の既設コンクリートの状態が、CCbのせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認した。

(6) ディープビーム的な破壊に対するCCb工法の適用性

女川2号炉では、ディープビームを対象とした模型実験を実施し、ディープビームにおいてもCCbのせん断補強効果が発揮されることを確認している。また、女川2号炉では、せん断スパン比がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲であっても棒部材式により評価を行う方針としていたことから、棒部材式で算定されるせん断耐力よりも大きなせん断耐力が得られることを同実験にて確認している。

女川2号炉における確認内容は以下のとおり。

【女川2号炉における確認内容】

- ・ 女川2号炉で実施したディープビーム($a/d=1.00$ 及び 1.44)を対象とした模型実験のケースを添付1-2表に、試験体の諸元を添付1-3表に、土木学会マニュアルのせん断耐力評価式と実験結果の比較を添付1-4表に示す。
- ・ 実験の結果、CASE1～CASE4のいずれの試験体も斜めひび割れの発生後もせん断力の上昇が確認され、載荷点近傍においてディープビーム的な破壊形態であるコンクリートの圧壊により耐力の低下が確認された。また、CASE5(せん断補強鉄筋無しのケース)に対して、CASE1の最大荷重は約1.9倍であり、せん断補強鉄筋による補強効果が確認された。
- ・ 添付1-4表に示すとおり、CASE1～CASE3のいずれのケースについても、実験値は棒部材式に基づくせん断耐力を上回る結果となった。また、実験値はディープビーム式に基づくせん断耐力と同等かそれ以上の結果となった。
- ・ 以上のことから、ディープビームについてもCCbにより十分なせん断補強効果が得られることが確認された。
- ・ また、せん断スパン比がディープビーム式で想定する破壊形態の範囲内でも、棒部材式を用いることの保守性を確認した。

添付 1-2 表 実験ケース

	ケースの概要	せん断補強鉄筋の種類	せん断スパン比 (a/d)	せん断補強鉄筋比 (pw)
CASE1	基本ケース	CCb	1.44	0.20
CASE2	せん断スパン比の違い	CCb	1.00	0.20
CASE3	せん断補強鉄筋比の違い	CCb	1.44	0.55
CASE4	せん断補強鉄筋の種類の違い	先施工 (両端フック)	1.44	0.20
CASE5	せん断補強鉄筋の有無	なし	1.44	0.20

添付 1-3 表 試験体諸元

諸元		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	
試験体	幅	mm	550				
	高さ	mm	880				
	かぶり	mm	80				
	有効高さ	mm	800				
	せん断スパン比		1.44	1.00	1.44	1.44	1.44
主鉄筋	鉄筋径	mm	D32				
	規格降伏強度	N/mm ²	980				
	本数	本	3				
	鉄筋比	%	0.54				
せん断補強鉄筋	種類		CCb	CCb	CCb	先施工	なし
	鉄筋径	mm	D13	D13	D19	D13	—
	規格降伏強度	N/mm ²	345				—
	間隔	mm	230	230	190	230	—
	本数	本	2				—
	鉄筋比	%	0.20	0.20	0.55	0.20	—
コンクリートの設計基準強度		N/mm ²	24				

添付 1-4 表 土木学会マニュアルのせん断耐力評価式と実験結果の比較

	ケースの概要	せん断 スパン比	せん断補強 鉄筋比	せん断耐力 (kN)		
				実験	せん断耐力評価式 ^(注1) (注 2)	
					棒部材式	ディープ ビーム式
CASE1	基本ケース	1.44	0.20	1287	744	1051
					583	777
CASE2	せん断スパン比 の違い	1.00	0.20	1972	875	1461
					663	1053
CASE3	せん断補強 鉄筋比の違い	1.44	0.55	1396	1226	1433
					1021	1122

(注1) : 土木学会マニュアル 2005 による評価式

(注2) : 上段 : 安全係数 ($\gamma_c=1.0$, $\gamma_s=1.0$, $\gamma_{bc}=1.0$, $\gamma_{bs}=1.0$) として算出

下段 : 安全係数 ($\gamma_c=1.3$, $\gamma_s=1.0$, $\gamma_{bc}=1.3$, $\gamma_{bs}=1.1$) として算出

ここに, γ_c : 材料係数 (コンクリート)

γ_s : 材料係数 (鉄筋)

γ_{bc} : 部材係数 (コンクリート)

γ_{bs} : 部材係数 (鉄筋)

(7) 面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性

女川 2 号炉では, 数値解析 (三次元静的材料非線形解析) を実施し, 面内荷重と面外荷重が作用する部材への Ccb 工法の適用性に問題がないことを確認している。

女川 2 号炉における確認内容は以下のとおり。

【女川 2 号炉における確認内容】

- ・ 三次元静的材料非線形解析における対象部材は, 壁全面に Ccb 工法が適用されており, 面外荷重として土圧及び慣性力が作用する壁のうち, Ccb 工法の効果に支配的な要因である壁厚が小さい軽油タンク室の側壁 (幅 3m, 高さ 4.5m, 厚さ 1.2m) とした。
- ・ 面外荷重と面内荷重の載荷順序を考慮し, 以下の 2 ケースについて解析を実施した。
 - ① : 面外荷重載荷後に面内荷重を載荷するケース

面外荷重のみを作用させた状態を再現し, 面外荷重載荷の最終ステップの応力及びひずみの状態を引き継ぎ, 面内せん断ひずみが 750μ ※となるまで面内荷重を漸増載荷させ, Ccb に生じる軸方向ひずみへの影響を確認した。

※ 女川 2 号炉の Ccb 補強部材で見込まれている設計応答値 (500μ 程度) に十分な余裕を見込んだ値として 750μ を設定。

②：面内荷重載荷後に面外荷重を載荷するケース

面内せん断ひずみが 750μ となるまで面内ひずみを載荷し、その後、面内荷重の最終ステップの応力及びひずみの状態を引き継ぎ、面外荷重を漸増載荷させ、せん断耐力を確認した（ケース1）。

ケース1のせん断耐力と、面内荷重を作用させずに面外荷重を漸増載荷させたケース（ケース2）のせん断耐力の比較を実施した。

- ・ ①の結果から、面外荷重載荷後に面内荷重を面内せん断ひずみ 750μ 程度まで作用させても、せん断補強鉄筋の軸方向ひずみは、ほぼ一定となり、面内荷重の増加は、せん断補強鉄筋の軸方向ひずみに影響を与えず、せん断補強鉄筋が面内荷重を負担しないこと及び面内荷重が作用しても Ccb により十分なせん断補強効果が得られることを確認した。
- ・ ②の結果から、ケース1とケース2のせん断耐力は同等であり、面内せん断ひずみが 750μ となる面内荷重を載荷させた後に面外荷重を載荷させても、Ccb のせん断補強効果に影響を与えないことを確認した。
- ・ 以上のことから、面外荷重と面内荷重が作用する部材は、面内せん断ひずみが 750μ までの範囲において Ccb 工法が適用可能であることを確認した。

泊 3 号炉におけるコンクリートの健全性の検討

1. はじめに

泊発電所の Ccb による耐震補強を行った構造物（取水ピットスクリーン室）において、Ccb のせん断補強効果を阻害するひび割れがなく、構造物が健全であることを確認する。

具体的には、Ccb の施工箇所におけるひび割れ状況及びひび割れの要因（乾燥収縮によるひび割れやコンクリートの劣化によるひび割れ（アルカリ骨材反応、凍結融解作用、中性化、塩害）等）を整理し、Ccb のせん断補強効果を阻害するひび割れがないことを確認する。

また、非破壊試験の結果から圧縮強度を推定し、Ccb のせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認する。

2. ひび割れ状況の確認

取水ピットスクリーン室の Ccb を施工した部材（頂版・側壁・隔壁）におけるひび割れ状況の確認結果を添付 2-1 表に示す。また、ひび割れ状況の一例として、頂版のひび割れ図を添付 2-1 図に示す。

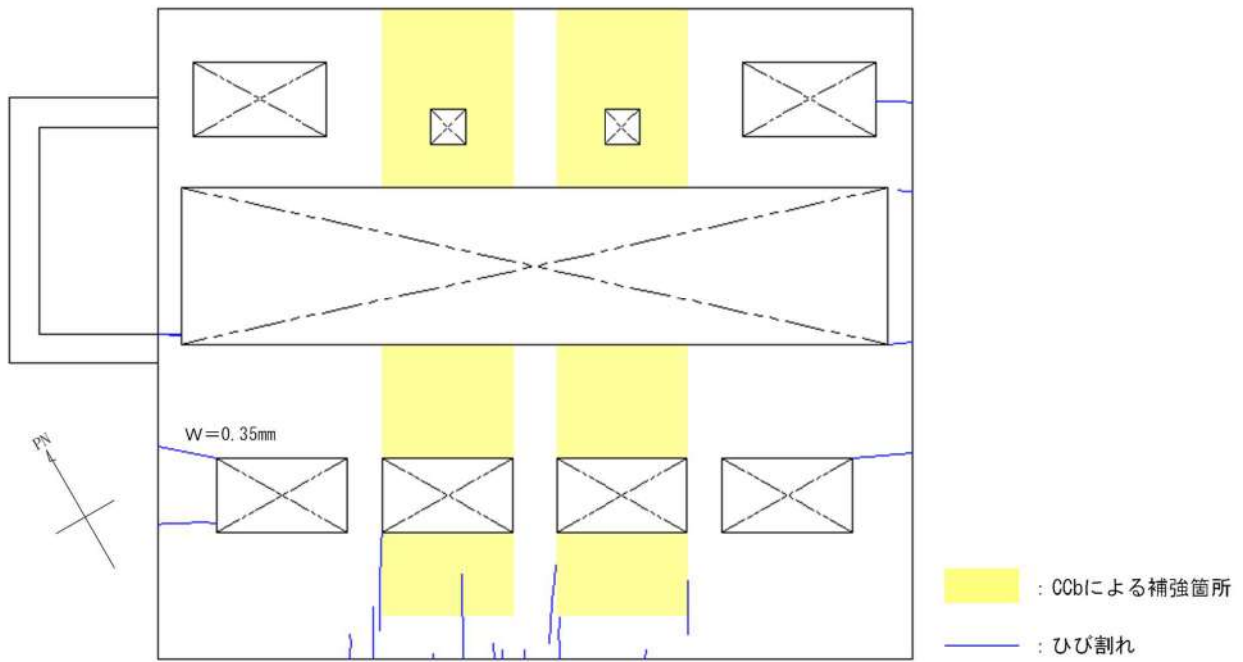
Ccb の施工箇所周辺に生じているひび割れは、最大でも 0.35mm 程度であり、主に乾燥収縮によるひび割れであることから、構造物の耐力に影響を与えるものではない。

よって、Ccb のせん断補強効果に影響を与えるひび割れはない。

なお、これらのひび割れについては、ただちに部材の耐力や Ccb の付着性能に影響を与えるものではないことから、継続監視のもと社内基準に基づき計画的に補修を実施していく。

添付 2-1 表 ひび割れ状況の確認結果

Ccb を施工した部材		ひび割れ幅
取水ピット スクリーン室	頂版	～0.35mm
	左側壁	0.3mm 未満
	左隔壁	ひび割れなし
	中央隔壁	0.3mm 未満
	右隔壁	0.3mm 未満
	右側壁	0.3mm 未満



(注) ひび割れ幅が0.30mm以上のひび割れについて、ひび割れ幅を記載している。

添付 2-1 図 ひび割れ図 (取水ピットスクリーン室頂版)

3. コンクリートの非破壊試験結果の確認

3.1 試験方法

CCbにより耐震補強を行った構造物において実施した非破壊試験は、リバウンドハンマーにより反発度Rを測定する試験であり、JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」に基づき実施した。

非破壊試験により測定された反発度から圧縮強度Fを推定し、劣化等による強度低下が発生していないことを確認する。圧縮強度の推定には、以下に示す日本材料学会の推定式を用いる。

$$\bullet \text{ 圧縮強度の推定式 } F = -18.0 + 1.27 \times R \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

3.2 試験結果

非破壊試験結果及び圧縮強度の推定結果を添付 2-2 表に示す。

推定した圧縮強度は、設計基準強度（24N/mm²）以上であることを確認している。

添付 2-2 表 非破壊試験結果及び圧縮強度の推定結果

測定箇所		反発度	圧縮強度（推定値） (N/mm ²)	
取水ピット スクリーン室	左側壁	48	43.0	
	左隔壁	左側	46	40.4
		右側	50	45.5
	中央隔壁	左側	48	43.0
		右側	50	45.5
	右隔壁	左側	46	40.4
		右側	49	44.2
	右側壁	51	46.8	

4. CCbを適用した部材のコンクリートの健全性確認結果

コンクリートのひび割れ状況により、CCbにより耐震補強を行った構造物にCCbのせん断補強効果に影響を与えるひび割れがないことを確認した。

また、非破壊試験による反発度から推定したコンクリートの圧縮強度が、設計基準強度（24N/mm²）以上であり、CCbのせん断補強効果に悪影響を及ぼす状態にないことを確認した。

以上より、泊3号炉のCCbにより耐震補強を行った構造物の既設コンクリートの状態が、CCbのせん断補強効果を発揮できる状況にあることを確認できた。

建設技術審査証明報告書の概要

1. Ccb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

本工法は、高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC^(注)」という。）により審査証明を受けており、試験データを用いて、Ccb が受け持つせん断耐力の算定方法において、Ccb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔及び Ccb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。なお、建設技術審査証明報告書では、片側からしか補強の施工ができない部材について、Ccb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく Ccb の配置、Ccb 配置位置での削孔方法、削孔内への Ccb の固定方法、Ccb 設置後の仕上げ等の施工性）を確認しており、それぞれの要素に対して施工上の考慮を示す等、施工性に関しても審査対象となっている。

また、建設技術審査証明報告書では、設計・施工マニュアルが添付され、材料及び施工に関する事項が示されている。

(注)：PWRC は、国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり、土木に関して、河川、道路、土質・地盤、施工、橋梁等、幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託、さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC では、建設技術審査証明事業を行っており、当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による審査証明委員会を設け、開発の趣旨、開発目標及び技術内容、既存の技術との対比、実績等について審査を行っており、高度な技術を有し、十分な信頼性を有した第三者機関である。

2. 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物等、背面に地盤等があり部材の片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。Ccb が受け持つせん断耐力は、鉄筋の材質（SD295A, SD295B, SD345）、径（D13～D32）ごとに定め、その値は、先施工のせん断補強鉄筋に Ccb のせん断耐力の向上への有効性を示す係数 β_{aw} を考慮することにより評価が可能である。

Ccb は、主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

また、両側から施工が可能な既設コンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

3. 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の設計方法

3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を以下にまとめた。

3.1.1 実験方法

本工法を用いた設計で Ccb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の交番載荷試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、Ccb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている（参考 1.3-1 図参照）。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を参考 1.3-1 表に、せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法を参考 1.3-2 図に、せん断耐力向上性能試験の加力要領を参考 1.3-3 図に示す。

3. 1. 2 「セラミックキャップバー (CCb)」後施工によるせん断耐力

梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験(せん断破壊モード試験体)を実施することにより、「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた後施工補強のせん断耐力の向上効果を確認する。梁試験体は、せん断補強鉄筋に D22 を用いたものが 3 体(シリーズ 1)、せん断補強鉄筋に D29 を用いたものが 2 体(シリーズ 2)、およびせん断補強鉄筋 D16 を用いたものが 10 体(シリーズ 3、4)である。

シリーズ 1 は、825×685mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.1-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.1-2) および「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.1-3) の 3 体である。なお、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 635mm である。

シリーズ 2 は、825×800mm の断面を有する RC 梁部材において、そのせん断スパンに通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.2-1) および「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.2-2) の 2 体である。なお、No.2-2 試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み深さは、削孔の先端が補強面と反対側のコンクリート表面から 50mm となる 750mm である。

シリーズ 3、4 は、600×500×4500mm の断面を有する RC 梁部材において、せん断スパンにせん断補強鉄筋のない試験体 (No.3-1)、通常のせん断補強鉄筋を配置した試験体 (No.3-2) および「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工してせん断補強を行った試験体 (No.3-3~3-6、4-1~4-4) の 10 体である。このうち、No.3-3~3-6 試験体は、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置が異なる。すなわち、埋込み側の先端位置は、主鉄筋の図心位置、主鉄筋の手前、または配力鉄筋の手前である。No.3-4 と No.3-5 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。No.4-1~4-3 試験体は両端に先端型定着体を用いた両端先端型、No. 4-4 試験体は両端に後端型定着体を用いた両端後端型であり、定着体は両端とも、コンクリート表面に一致している。なお、No.4-1 と No.4-2 については、ばらつきを確認するため同条件の試験体である。

各ケースの試験体の種類を表 II-3.2~3.5 に、試験体図を図 II-3.6~3.8 に示す。また、載荷装置図を図 II-3.9 に示す。載荷は、規格強度に基づいた各試験体のせん断耐力の計算値に達するまでは、段階的に荷重制御により加力を行い、以後は、その時点の加力点変位を基準とする同一振幅における繰返し回数 1 回の振幅漸増型の変位制御による交番加力を行った。

参考 1.3-1 図 実験方法

(建設技術審査証明報告書より抜粋)

参考 1.3-1 表 各ケースの試験体の諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

表 II-3.2 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 1)

	No.1-1	No.1-2	No.1-3
断面寸法 $b \times h$	825 × 685 mm		
せん断スパン長 a	1,640 mm		
せん断スパン比 a/d	2.78		
実験時の コンクリート圧縮強度 f'_c	32N/mm ²	33N/mm ²	34 N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミックキャ ップバー (CCb)
せん断補強鉄筋比 p_w	0	0.29 %	
試験の目的	コンクリート負担分 V_c の評価	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	

表 II-3.3 各ケースの試験体の諸元 (シリーズ 2)

	No.2-1	No.2-2
断面寸法 $b \times h$	825 × 800 mm	
せん断スパン長 a	1,960 mm	
せん断スパン比 a/d	2.78	
実験時の コンクリート圧縮強度 f'_c	37N/mm ²	38N/mm ²
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	SD345 D29 両端フック	SD345 D29 セラミックキャ ップバー (CCb)
せん断補強鉄筋比 p_w	0.48 %	
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価	

参考 1.3-1 表 各ケースの試験体の諸元
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

	No.3-1	No.3-2	No.3-3	No.3-4	No.3-5	No.3-6
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm					
せん断スパン長 a	1,195mm					
せん断スパン比 a/d	2.78					
実験時のコンクリート 圧縮強度 f'_c [N/mm ²]	41.2	40.6	42.4	42.6	42.9	42.6
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	—	SD345 D16 両端フック	SD345 D16 セラミックキャップバー (CCb)			
せん断補強鉄筋比 p_w	0.33%					
セラミックキャップ バー (CCb) の埋込み 側先端位置	—	—	主鉄筋の 図心	主鉄筋の表面 から 5mm 手前	配力鉄筋の 表面から 5mm 手前	
定着体の組合せ	—	—	標準型			
試験の目的	試験体諸元の 妥当性検討		後施工せん断補強鉄筋による 有効率 β_{aw} の評価			

	No.4-1	No.4-2	No.4-3	No.4-4
断面寸法 $b \times h$	600×500 mm			
せん断スパン長 a	1,195mm			
せん断スパン比 a/d	2.78			
実験時のコンクリート 圧縮強度 f'_c [N/mm ²]	34.0	34.3	35.5	33.9
帯鉄筋・補強鉄筋の 材質、および形状	SD345 D16 セラミックキャップバー (CCb)			
せん断補強鉄筋比 p_w	0.33%			
セラミックキャップ バー (CCb) の埋込み 側先端位置	主鉄筋の表面から 5mm 手前		配力鉄筋の表面か ら 5mm 手前	—
定着体の組合せ	両端先端型			両端後端型
試験の目的	後施工せん断補強鉄筋による有効率 β_{aw} の評価			

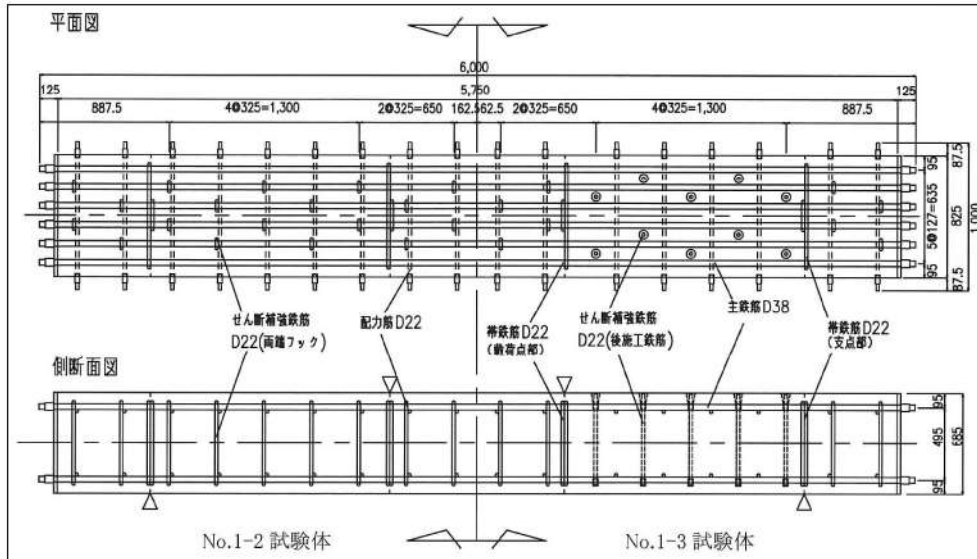


図 II-3.6 試験体図 (シリーズ 1)

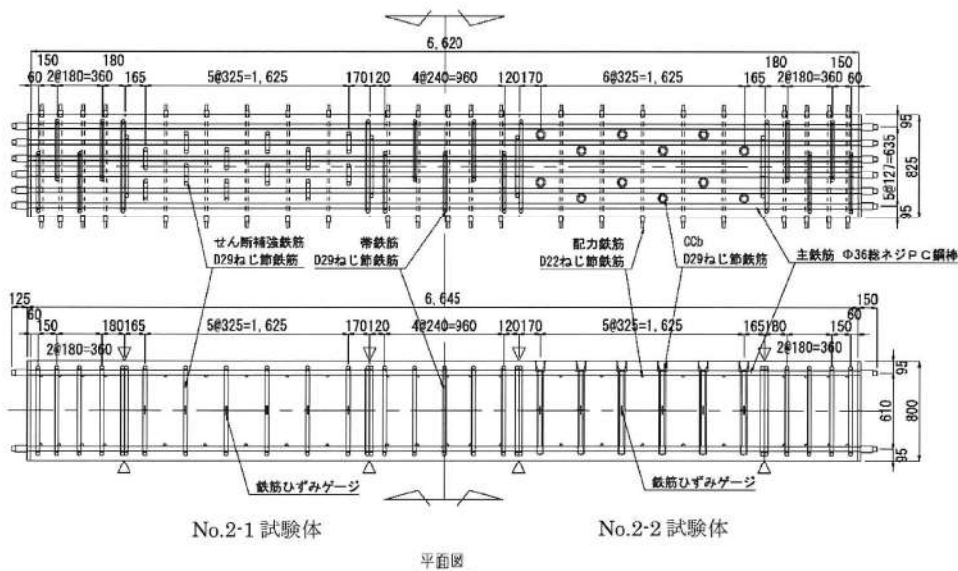


図 II-3.7 試験体図 (シリーズ 2)

参考 1.3-2 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

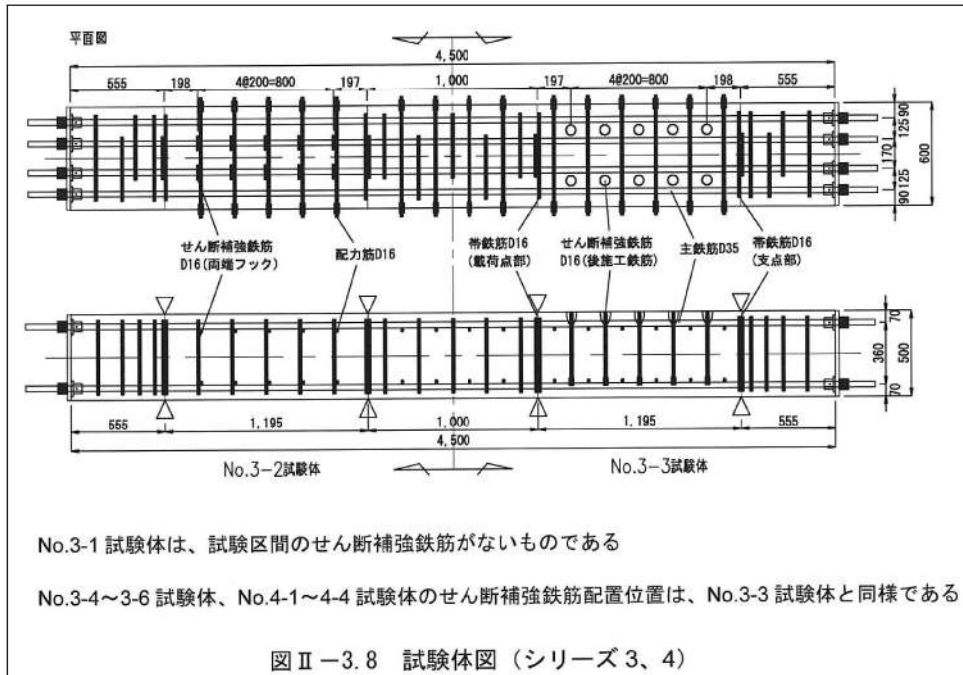


図 II - 3. 8 試験体図 (シリーズ 3、4)

参考 1. 3-2 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

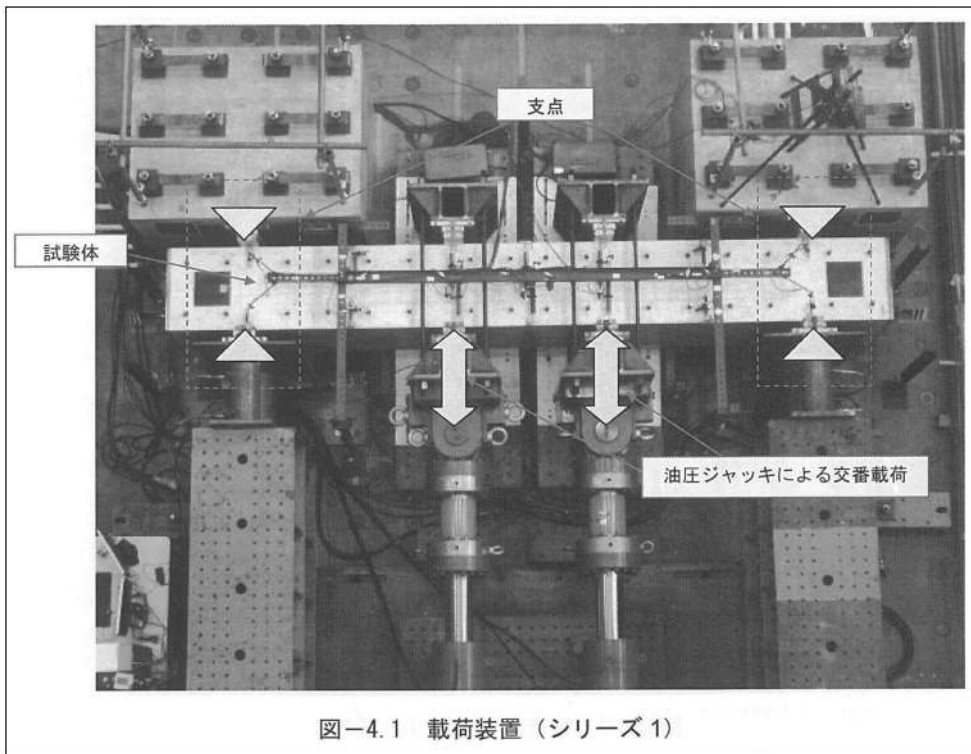


図-4.1 載荷装置 (シリーズ 1)

参考 1.3-3 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

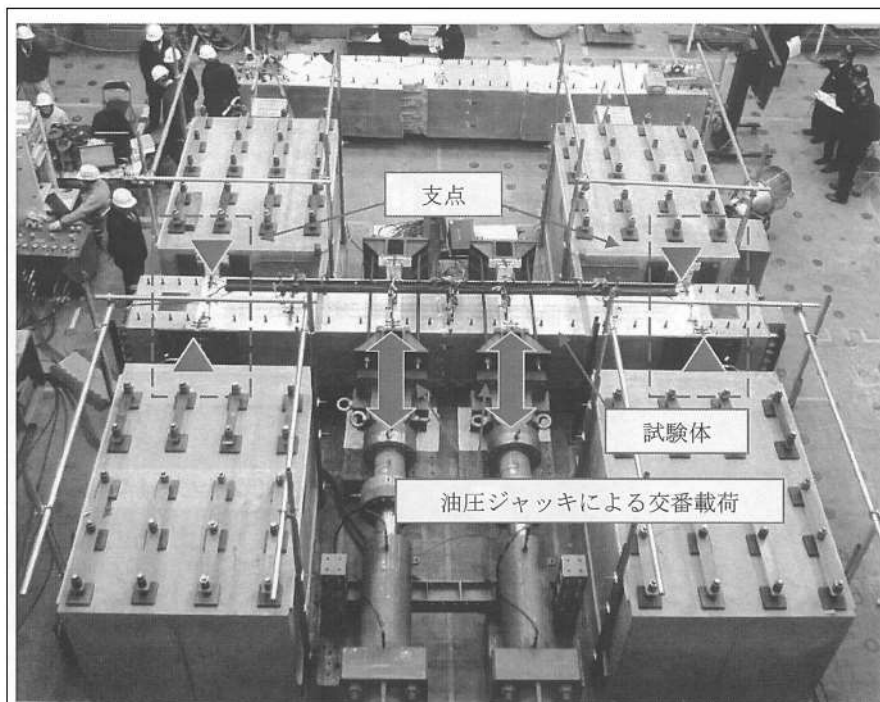


図-4.2 载荷装置 (シリーズ2)

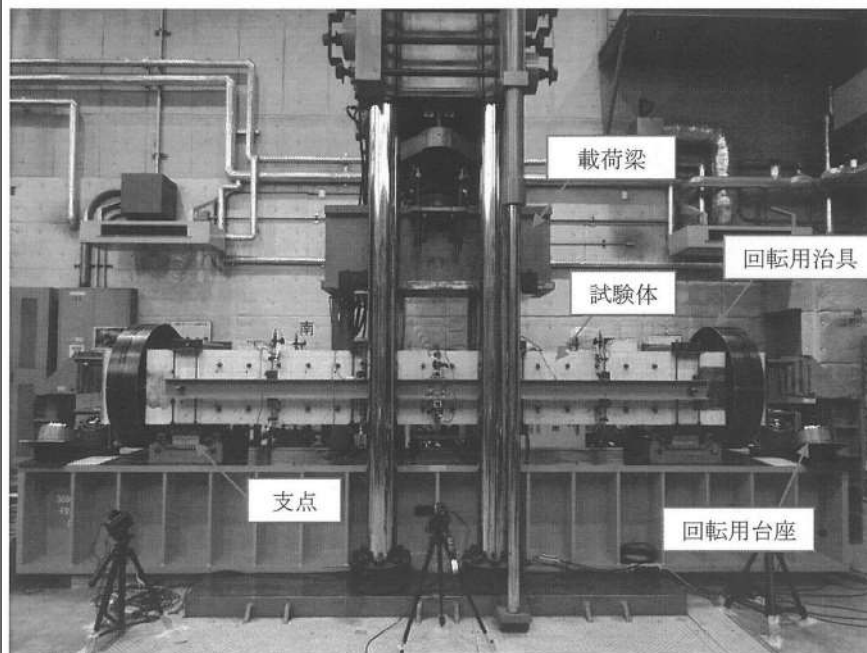


図-4.3 载荷装置 (シリーズ3、4)

参考 1.3-3 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.1.2 実験結果

3.1.1の実験結果を参考1.3-2表に示す。

参考1.3-2表 実験結果の一覧
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備考
せん断補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V_c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値。
	V_s	0 kN	644 kN	647 kN	$V_s = V - V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を1.0として算出した値。
	$V_{c cal}$	396 kN	401 kN	403 kN	
	$V_{s cal}$	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値。
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}				647 / 644 = 1.00	No.1-2試験体とNo.1-3試験体の比較による値。

		No.2-1	No.2-2	備考	
せん断補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1168kN	1164kN	$V_s = V - V_c$ として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1148kN	1064kN	$V_s = V - V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を1.0として算出した値	
	$V_{c cal}$	429kN	434kN		
	$V_{s cal}$	943kN	829kN	No.2-2は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}		正側	1164/1168=1.00	No.2-1試験体とNo.2-2試験体の比較による値	
		負側	1064/1148=0.93		

参考 1.3-2 表 実験結果の一覧
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

表-8.4 実験結果の一覧 (シリーズ 3、4)

試験 ケース	「セラミックキャップバー (CCb)」の仕様		実験での最大 せん断耐力(kN)		算定式による せん断耐力(kN) $V_{cal}=V_{ed}+V_s$			「セラミックキャップ バー(CCb)」が負担 するせん断力(kN)		せん断補強鉄筋の 有効率 β_{sw} (V_{CCb}/V_s)			有効率の 設計値 β_{sw}
			正側	負側	V_{ed}	V_{cd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の 組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}				V_{CCb}	V_{CCb}				
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<i>499</i>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.89
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>515</u>	<i>570</i>	543	254	289	261	316	<u>0.90</u>	<i>1.09</i>	1.00	0.83
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.96</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>497</u>	<i>526</i>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<i>0.94</i>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>532</u>	<i>520</i>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<i>0.98</i>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面 より5mm手前	<u>520</u>	<i>535</i>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<i>1.02</i>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面 より5mm手前	<u>539</u>	<i>546</i>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<i>1.08</i>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<i>661</i>	<u>568</u>	525	235	290	426	333	<i>1.47</i>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番載荷で最初にせん断破壊したことを示す
 ※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その載荷方向での最大荷重を示す

3.1.3 Ccb のせん断補強の考え方

Ccb のせん断補強の考え方を参考 1.3-4 図に示す。

(5) 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断補強効果の考え方

「セラミックキャップバー (CCb)」は通常の方法でせん断補強せず、既設構造物を後からせん断補強するために、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕のせん断耐方式におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_{sd} を全て見込むことは困難であると考えられる。そこで「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果を、アルカリ骨材反応を受けて破断したせん断補強鉄筋のせん断耐力評価と同じ方法（参考文献：土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、2005.9）により検討した。

せん断補強鉄筋が破断した場合は、せん断ひび割れ箇所から破断箇所までの付着長さが短くなることにより、せん断ひび割れを架橋する箇所でせん断補強鉄筋が全強度を発揮できなくなり、せん断補強効果が低下すると考えられる。この効果を以下のように考慮し、定着不良が生じた場合のせん断耐力をトラス理論により評価する。

せん断ひび割れを架橋するせん断補強鉄筋を考えたとき、せん断ひび割れが破断位置にある場合は、そのせん断補強鉄筋はせん断力を負担することができず、一方、破断位置から定着長さ l_y 以上離れた位置にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋では、付着により十分な定着性能が確保されていると判断され、降伏強度相当のせん断力を負担することができる。また、破断位置から定着長さ l_y 以下の範囲にせん断ひび割れがあるせん断補強鉄筋は、ある程度のせん断力は負担できるが定着性能が低下しているため、降伏強度相当より小さなせん断力のみが負担できるとした。その場合について、せん断ひび割れからのせん断補強鉄筋の定着長さにしたがって負担できるせん断力を線形で仮定したのが、図 II-4.33 に示す概念図である。この仮定によれば、平均化した破断した鉄筋の負担応力の低下率 η は次式で表すことができる。

$$\eta = (d-d')/(4l_y) \quad \text{if } (d-d') \leq 2l_y \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta = 1 - l_y/(d-d') \quad \text{if } (d-d') > 2l_y \dots\dots\dots (2)$$

一部のせん断補強鉄筋のみが破断している場合には、その破断割合 α を考慮すると、破断したせん断補強鉄筋を含む有効せん断補強効果割合 β は式(3)となる。

$$\beta = \eta \alpha + (1 - \alpha) \dots\dots\dots (3)$$

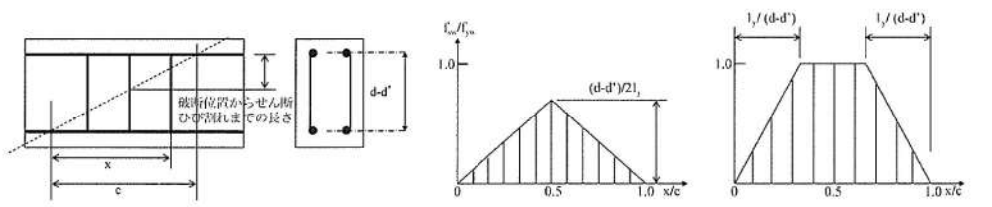


図 II-4.33 斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力

参考 1.3-4 図 Ccb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

すなわち、全てのせん断補強鉄筋が有効であるとして、トラス理論に基づきコンクリート標準示方書式で算出したせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力分に、有効せん断補強効果割合 β を乗じることにより、定着が不良であるものを含ません断補強鉄筋のせん断耐力負担分を評価することができる。

以上の考え方に「セラミックキャップバー (CCb)」の定着性能を適用することにより、「セラミックキャップバー (CCb)」工法のせん断補強効果を評価することができる。「セラミックキャップバー (CCb)」の定着性能については、引抜き試験により以下について明らかとなっている。

- ・ 先端型定着体が、「セラミックキャップバー (CCb)」の規格降伏強度相当以上の定着力を確保するための必要定着長は、定着体の先端から $5D$ (D : 鉄筋の直径) である。
- ・ 後端型定着体は、単体で「セラミックキャップバー (CCb)」の規格引張強度相当以上の定着力を発揮できる。

「セラミックキャップバー (CCb)」の定着長 l_y が $5D$ であることと、「セラミックキャップバー (CCb)」工法の適用部材における主鉄筋間隔が $2l_y$ 以上であるとする、と、「セラミックキャップバー (CCb)」の応力低下率 η の算出では、式(2)を基本とすることができる。また、後端型定着体部においては、せん断補強鉄筋の材端までせん断耐力に対して有効に作用することから、式(2)の第2項の $l_y/(d-d')$ には、係数 $1/2$ が乗じられる (式(4))。さらに、式(3)において破断している鉄筋は無いことから $\alpha=1$ とすると、「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断補強の有効率 β_{av} は、式(5)により算出できる。

$$\eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_{av} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d-d')} \dots\dots\dots (5)$$

参考 1.3-4 図 CCb のせん断補強の考え方
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.1.4 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価

実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価について、参考 1.3-5 図に示す。

(6) 実験結果に基づく「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

i) 「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断補強効果の評価

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ 1 の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(6)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-3}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(7)に示すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 $V_{exp,no1-2}$ から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/9)

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、本実験においては、No.1-2 試験体におけるせん断補強鉄筋が負担するせん断力 V_s と、No.1-3 試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(8)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp,no1-3} - V_{c,no1-3} \dots\dots\dots(6)$$

$$V_s = V_{exp,no1-2} - V_{c,no1-2} \dots\dots\dots(7)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

- V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力
- $V_{exp,no1-2}$: 実験で得られた No.1-2 試験体のせん断耐力
- $V_{exp,no1-3}$: 実験で得られた No.1-3 試験体のせん断耐力
- $V_{c,no1-2}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-2 試験体のせん断耐力の計算値
- $V_{c,no1-3}$: せん断補強鉄筋を用いない場合の No.1-3 試験体のせん断耐力の計算値
- V_s : 通常のせん断補強鉄筋に負担されるせん断耐力の計算値
- β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.1 に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に基づいて算出した設計計算値を示す。なお、No.1-2、1-3 試験体のコンクリート負担分 V_c は、実験時のコンクリート強度を用いて土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に基づいて算出した。また、表中の計算値は、土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に基づいて算出したものであり、No.1-3 試験体のせん断耐力については、有効率 β_{aw} を式(5)により以下のように算出し、No.1-2 試験体のせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の計算値に乗じている。

$$d - d' = 495\text{mm}, l_y = 110\text{mm} \quad (5D, D = 22\text{mm}) \text{ より}$$

$$\beta_{aw} = 1 - 1/2 \cdot l_y / (d - d') = 1 - 1/2 \cdot (110/495) = 0.88$$

表Ⅱ-4.1 より、各試験体の実験結果に基づいて算出される「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 β_{aw} が、コンクリート負担分を計算値に基づいた場合で 1.00 であり、式(5)による有効率 0.88 以上であることが分かる。また、各試験体の設計計算値と実験結果との比較においても、全ての試験体の実験結果は設計計算値よりも大きくなっている。

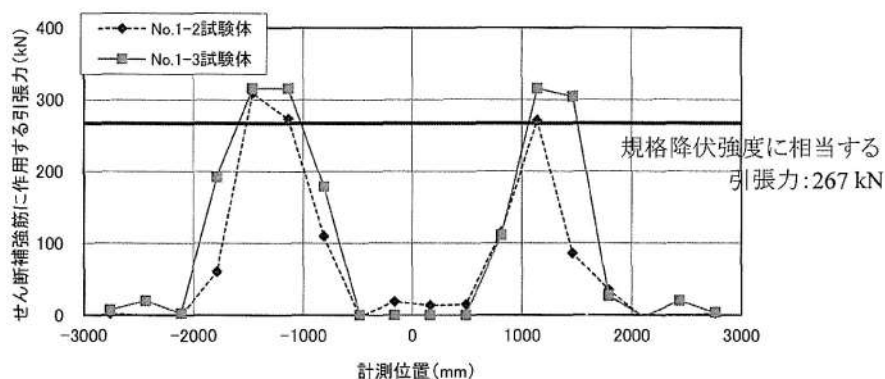
次に、図Ⅱ-4.34 に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。なお、図Ⅱ-4.34 におけるせん断補強鉄筋の引張力

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/9)

は、せん断補強鉄筋のひずみゲージの測定値を材料試験による応力-ひずみ関係に基づいて引張応力に換算し、断面積を乗じた値である。図Ⅱ-4.34より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した No.1-3 試験体においても、通常のせん断補強を行った No.1-2 試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップバー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.1 実験結果の一覧 (シリーズ1)

		No.1-1	No.1-2	No.1-3	備考
補強鉄筋の種類・形状		せん断補強鉄筋なし	SD345 D22 両端フック	SD345 D22 セラミック定着体	
せん断耐力の実験値	V	454 kN	1,045 kN	1,050 kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
	V_c	454 kN	401 kN	403 kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
	V_s	0 kN	644 kN	647 kN	$V_s=V-V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	396 kN	898 kN	837 kN	計算値は、コンクリート標準示方書 [設計編] に基づき、安全係数を 1.0 として算出した値
	$V_{c cal}$	396 kN	401 kN	403 kN	
	$V_{s cal}$	0 kN	497 kN	437 kN	No.1-3 は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}				647 / 644 = 1.00	No.1-2 試験体と No.1-3 試験体の比較による値



図Ⅱ-4.34 せん断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ1)

また、シリーズ2のD29の「セラミックキャップバー (CCb)」においても、セラミック定着体および周囲へ充てんされたグラウトによって、両端フックを有するせん断補強鉄筋

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/9)

と同様なメカニズムでせん断補強鉄筋として機能することが確認された。そこで、シリーズ1と同様に「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率を実験に基づいて評価する。

表Ⅱ-4.2に各試験体の実験結果、および土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいて算出した設計計算値を示す。載荷方向正側と負側でせん断耐力が若干異なるものの、「セラミックキャップバー(CCb)」による補強効果が小さい方である負側の有効率は0.93であった。これに対し、No.2-2の試験体の諸元から式(5)に基づいて以下の様に算出される有効率の設計計算値は0.88 ($d-d' = 610\text{mm}$ 、 $l_y = 145\text{mm}$ (5D、 $D = 29\text{mm}$))である。つまり、D29のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合でも、式(5)から算出される有効率以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

次に、図Ⅱ-4.35に最大せん断耐力経験時におけるせん断補強鉄筋に作用する引張力の分布について、比較したものを示す。同図より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強したNo.2-2試験体においても、通常のせん断補強を行ったNo.2-1試験体と同様に、1つの斜めひび割れに対して複数本の「セラミックキャップバー (CCb)」が規格降伏強度以上の引張力を負担していることが確認できる。

表Ⅱ-4.2 実験結果の一覧 (シリーズ2)

		No.2-1	No.2-2	備考	
補強鉄筋の種類・形状		SD345D29 両端フック	SD345D29 セラミック定着体		
せん断耐力の実験値	正側	V	1597kN	1598kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1168kN	1164kN	$V_s = V - V_c$ として
	負側	V	1577kN	1498kN	実験における正側破壊時の載荷荷重として
		V_c	429kN	434kN	実験時のコンクリート強度に基づく計算値
		V_s	1148kN	1064kN	$V_s = V - V_c$ として
せん断耐力の計算値	V_{cal}	1372kN	1263kN	計算値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づき、安全係数を1.0として算出した値	
	$V_{c cal}$	429kN	434kN		
	$V_{s cal}$	943kN	829kN	No.2-2は示方書による V_s に有効率 $\beta = 0.88$ を乗じた値	
せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw}	正側		1164/1168=1.00	No.2-1試験体とNo.2-2試験体の比較による値	
	負側		1064/1148=0.93		

参考 1.3-5 図 実験結果に基づくCCbによるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/9)

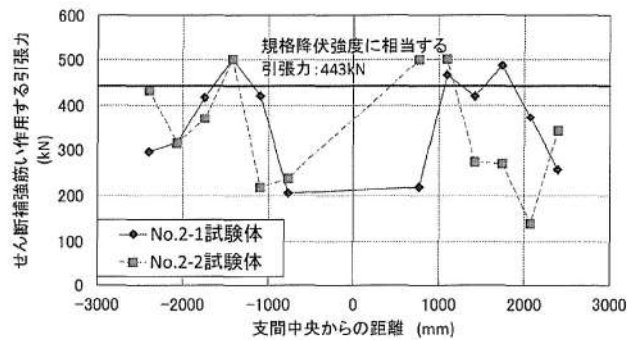


図 II-4.35 せん断補強鉄筋に作用する引張力の比較 (シリーズ 2)

以上より、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

ii) 「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置および定着体の組合せによるせん断補強効果の評価

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} に対して、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが及ぼす影響をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

前述の結果より、式(5)による有効率 β_{aw} を乗じて「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を評価できる。シリーズ 3、4 における実験結果より、斜めひび割れ発生状況およびせん断補強鉄筋のせん断力負担はシリーズ 1、2 とほぼ同様であることが確認されている。つまり、埋込み位置の先端が主鉄筋の図心より手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」や、定着体の組合せが標準型、両端先端型、両端後端型である「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力負担分を、シリーズ 1、2 と同様の手法で評価できると考えられる。

ここで、各種条件に応じた「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率算定における概念図を図 II-4.36 に示す。検討ケースは、表 II-4.3 に示すとおりである。

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/9)

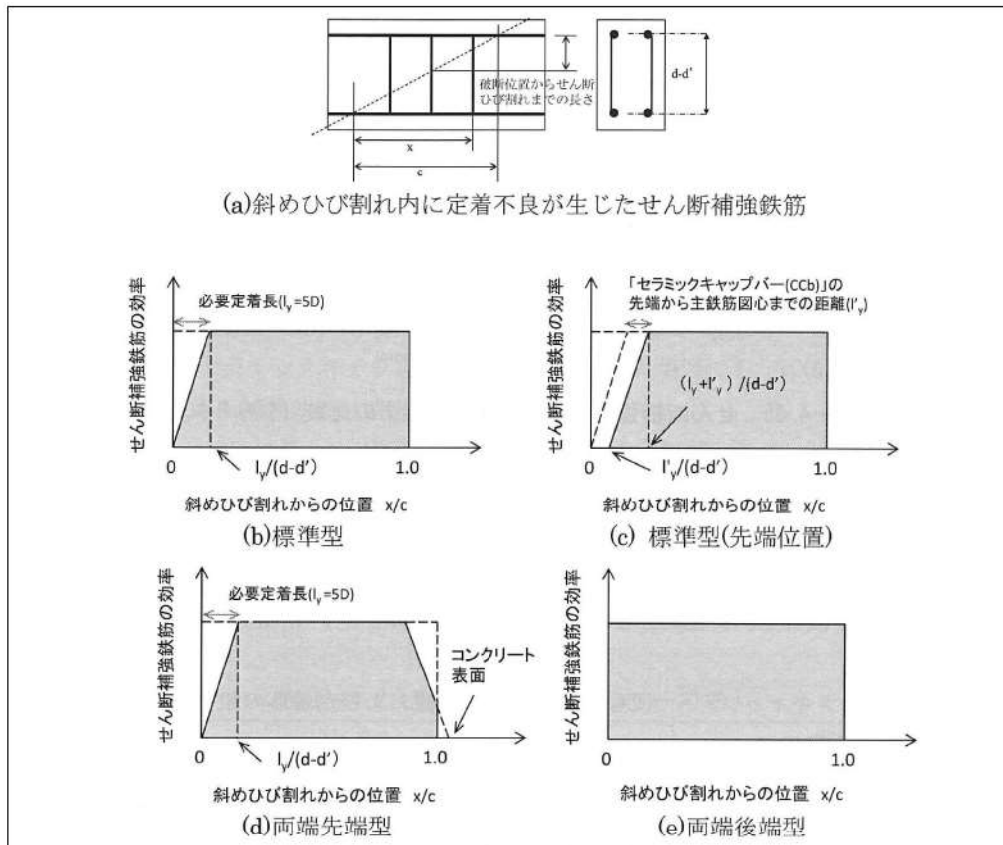


図 II-4.36 有効率算定の概念図

表 II-4.3 検討ケースの一覧

検討ケース	埋込側の定着体タイプ	差込側の定着体タイプ	埋込み位置
(b) 標準型	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心
(c) 標準型 (先端位置)	先端型定着体	後端型定着体	主鉄筋の図心より手前
(d) 両端先端型	先端型定着体	先端型定着体	主鉄筋の図心
(e) 両端後端型	後端型定着体	後端型定着体	—

先端型定着体の先端位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率は、図 II-4.36(c) に示すように、実際の埋込み位置から差込側の主鉄筋の図心までの範囲の有効率 (β_{awxd-t}) のみを考慮することで算出できると考えられる。

両端ともに先端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」の有効率 (β_{awxx}) は、差込側においても埋込側と同様に、必要定着長に応じた有効率の低減を考慮すること

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/9)

で評価できる。ただし、差込側の定着体は、コンクリートの表面に定着されていることを考慮して、図Ⅱ-4.36(d)に示すような有効率を算出することとする。

両端ともに後端型定着体を設置した「セラミックキャップバー (CCb)」では、両側で標準フックと同等の定着性能が期待できる。そのため、その補強効果も両端フックのせん断補強鉄筋と同様となり、有効率 (β_{awdd}) は 1.0 であると考えられることができる。

図Ⅱ-4.36 を参考に式(5)を拡張すると、それぞれのせん断補強有効率は式(9)~(11)と表すことができる。なお、両端先端型を用いて、かつ埋込み位置が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前となる場合は、式(10)に対して式(9)の算出方法を組み合わせることで式(12)により有効率 (β_{awxx-f}) を評価することができる。

$$\beta_{awdd-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta_{awxx-f} = \eta = 1 - \frac{(l_y + 2l'_y)}{2(d - d')} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y(d - d')} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

β_{awdd-f} : 標準型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awdd} : 両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

β_{awxx-f} : 両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を用いて、その埋込み位置の先端が埋込側の主鉄筋の図心よりも手前である場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数

d' : 差込側の部材表面から圧縮鋼材図心までの距離

l'_y : 埋込側の主鉄筋の図心から「セラミックキャップバー (CCb)」の先端までの距離

上記の考え方の適用性を検討するために、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効率 β_{aw} をシリーズ 3、4 の実験結果に基づいて評価する。

「セラミックキャップバー (CCb)」によって負担されるせん断耐力 V_{CCb} は、式(13)に示

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (7/9)

すように、梁の交番載荷実験によって求められたせん断耐力 V_{exp} から、コンクリートのみにより受け持つせん断耐力 V_{cd} を差し引いて求められる。また、せん断補強鉄筋によって負担されるせん断耐力 V_s は、式(14)に示すように、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なすことで求めることができる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の鉄筋配置が決まれば、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕のせん断耐力式と同様に求められる。なお、安全係数は 1.0 とした。

「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の有効性は、前述のように有効率 β_{aw} により評価される。有効率 β_{aw} は、「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なした場合のせん断耐力負担分に対する有効率である。すなわち、各試験体諸元を基に通常のせん断補強鉄筋と仮定して算出されるせん断耐力 V_s と、その試験体の「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力 V_{CCb} との比として式(15)のように評価することができる。

$$V_{CCb} = V_{exp} - V_{cd} \dots\dots\dots(13)$$

$$V_s = [A_{aw} f_{awyd} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / s_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots(14)$$

$$\beta_{aw} = V_{CCb} / V_s \dots\dots\dots(15)$$

ここで、

V_{CCb} : 「セラミックキャップバー (CCb)」による負担されるせん断耐力

V_{exp} : 実験で得られたせん断耐力

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない場合のせん断耐力の計算値

V_s : 「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力の計算値

A_{aw} : 単位長さあたりの区間 s_{aw} におけるセラミックキャップバー (CCb) の総断面積

f_{awyd} : 「セラミックキャップバー (CCb)」の降伏強度で 400N/mm^2 以下とする

α_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」が部材軸となる角度

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に $d/1.15$ としてよい

γ_b : ここでは、1.0

β_{aw} : 「セラミックキャップバー (CCb)」のせん断耐力の補強効果を示す有効率

表Ⅱ-4.4 にシリーズ 3、4 における実験結果の一覧を示す。有効率 β_{aw} は、正側載荷時および負側載荷時についてそれぞれ算出した。また、梁の正負交番載荷実験において、最初にせん断破壊した載荷方向におけるせん断力に表中に下線で示す。実験から得られた最初にせん断破壊した側の有効率 β_{aw} は、式(9)~(12)で算出される有効率 β_{aw} よりも、い

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (8/9)

れの試験ケースにおいても大きな値であることが分かる。つまり、「セラミックキャップバー (CCb)」の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、式(9)~(12)から算出される有効率 β_{aw} 以上のせん断補強効果が期待できることが確認された。

以上より、鉄筋の埋込み位置の先端および定着体の組合せが異なる場合においても、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強された RC 部材のせん断補強効果を、トラス理論に基づいて算出した「セラミックキャップバー (CCb)」を通常のせん断補強鉄筋と見なして求められるせん断耐力負担分に、式(9)~(12)による有効率 β_{aw} を乗じて算出することは、設計上、安全側となることが分かる。

表 II-4.4 実験結果の一覧 (シリーズ 3、4)

試験ケース	「セラミックキャップバー (CCb)」の仕様		実験での最大せん断耐力(kN)		算定式によるせん断耐力(kN) $V_{cal}=V_{ed}+V_s$			「セラミックキャップバー (CCb)」が負担するせん断力(kN)		せん断補強鉄筋の有効率 β_{aw} (V_{CCb}/V_s)			有効率の設計値 β_{aw}
			正側	負側	V_{ed}	V_{sd}	V_s	正側	負側	正側	負側	平均	
	定着体の組合せ	先端位置	V_{exp}	V_{exp}				V_{CCb}	V_{CCb}				
No.3-3	標準型	主鉄筋位置	<u>563</u>	<i>499</i>	542	253	289	310	246	<u>1.07</u>	0.85	0.96	0.83
No.3-4	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>515</u>	<i>570</i>	543	254	289	261	316	<u>0.90</u>	<i>1.09</i>	1.00	
No.3-5	標準型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>531</u>	509	543	254	289	277	255	<u>0.96</u>	0.88	0.92	
No.3-6	標準型	配力鉄筋の表面より5mm手前	<u>497</u>	<i>526</i>	543	254	289	243	272	<u>0.84</u>	<i>0.94</i>	0.89	0.78
No.4-1	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>532</u>	<i>520</i>	525	235	290	297	285	<u>1.02</u>	<i>0.98</i>	1.00	0.82
No.4-2	両端先端型	主鉄筋の表面より5mm手前	<u>520</u>	<i>535</i>	526	236	290	284	299	<u>0.98</u>	<i>1.03</i>	1.01	0.82
No.4-3	両端先端型	配力鉄筋の表面より5mm手前	<u>539</u>	<i>546</i>	524	234	290	305	312	<u>1.05</u>	<i>1.08</i>	1.06	0.78
No.4-4	両端後端型	—	<u>661</u>	<u>568</u>	525	235	290	426	333	<u>1.47</u>	<u>1.15</u>	1.31	1.00

※1 下線は正負交番荷重で最初にせん断破壊したことを示す

※2 斜体はせん断破壊をしていない場合、その荷重方向での最大荷重を示す

参考 1.3-5 図 実験結果に基づく CCb によるせん断補強効果の評価

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (9/9)

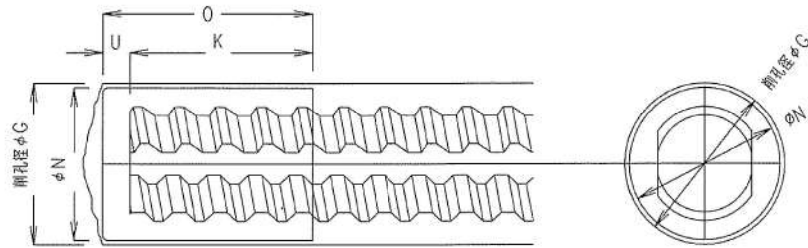
3.2 使用材料・強度

実験を元にした本設計法では、参考 1.3-6 図に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも、これらに適合する使用材料・強度を用いる。

- (1) セラミックキャップバー（CCb）工法は、使用の目的に対してせん断耐力が不足する部材のせん断補強および地震時のじん性が不足する部材のじん性確保などの目的に使用する。
- (2) セラミックキャップバー（CCb）工法の適用範囲は、以下の条件に該当するものとする。
 - ・主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
 - ・両側からの施工が可能な既設のコンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

参考 1.3-6 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/6)

セラミックキャップバー（CCb）は、D32、D29、D25、D22、D19、D16、D13のねじ鉄筋の両端に高純度アルミナ系セラミック製のキャップを設け定着体をなす構造とする。先端型・後端型の定着体の例、およびねじ鉄筋の寸法を図-2.1~2.3に示す。



呼び名	削孔寸法	
	削孔径φG mm	継手仕様時 削孔寸法 削孔径φG mm
D13	30.0	30.0
D16	30.0	34.0
D19	34.0	36.0
D22	36.0	40.0
D25	46.0	46.0
D29	50.0	50.0
D32	55.0	55.0

呼び名	定着体の寸法			
	φN mm	O mm	ねじ深さK mm	U mm
D13	25.0	36.0	30.0	6.0
D16	27.0	46.0	40.0	6.0
D19	30.0	46.0	40.0	6.0
D22	33.0	46.0	40.0	6.0
D25	42.0	52.0	46.0	6.0
D29	45.0	59.0	53.0	6.0
D32	50.0	64.0	58.0	6.0

【先端型定着体(CX)】

図-2.1 セラミック定着体、ねじ鉄筋の例（その1）

参考 1.3-6 図 使用材料・強度
 (建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/6)

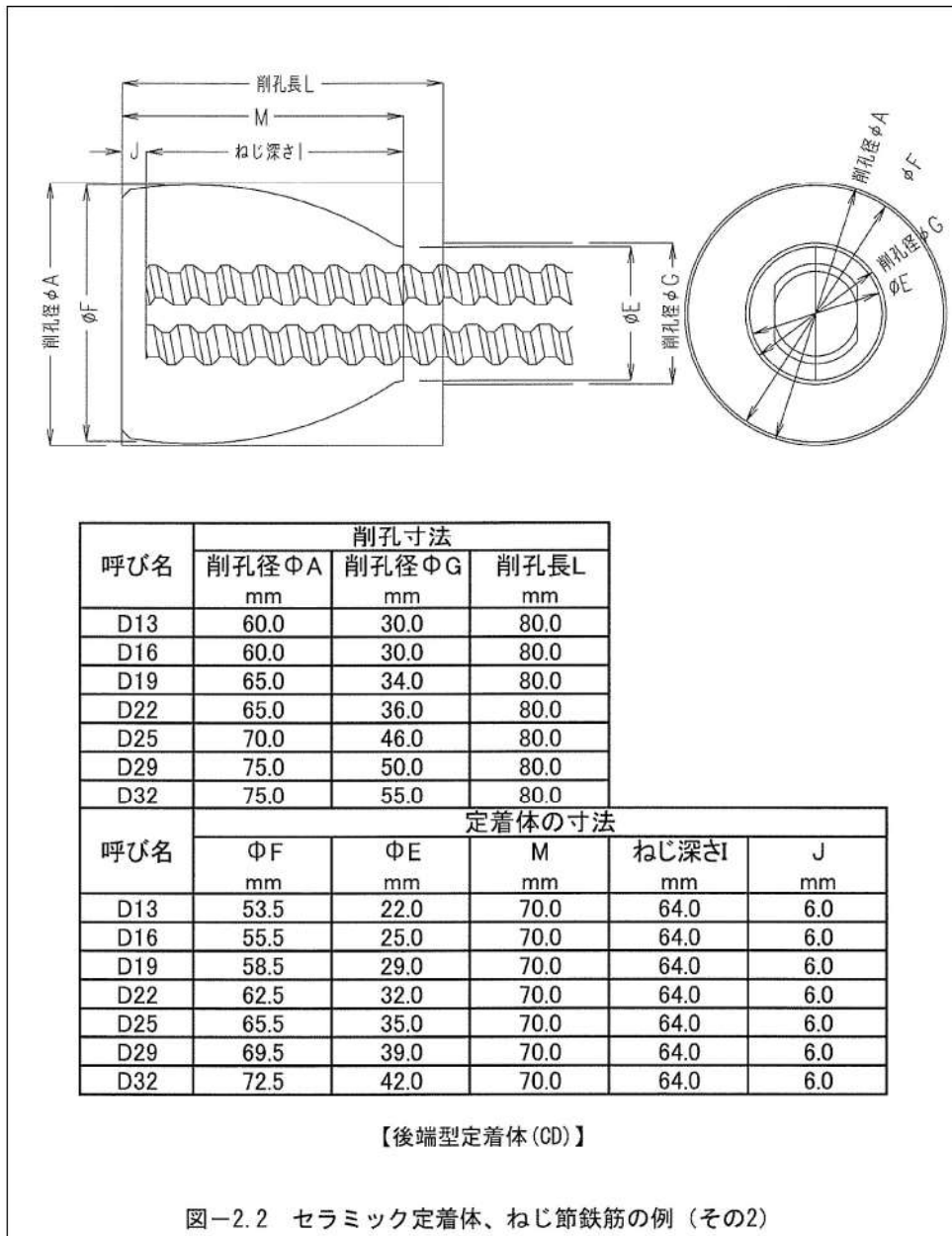
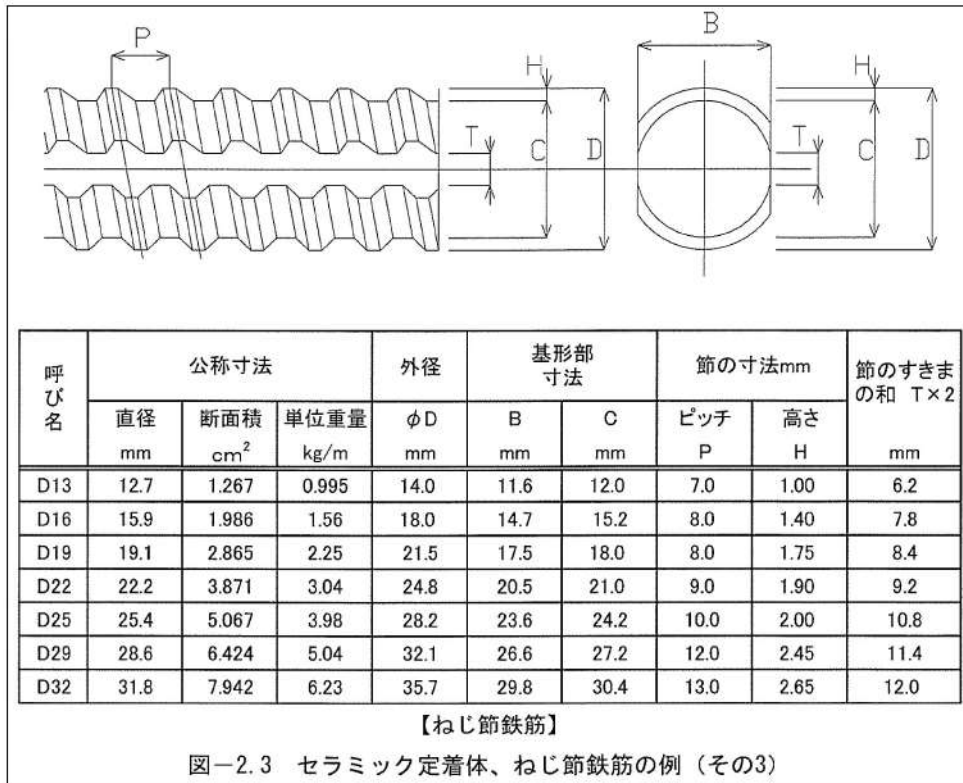


図-2.2 セラミック定着体、ねじ筋鉄筋の例 (その2)

参考 1.3-6 図 使用材料・強度

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/6)



参考 1.3-6 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/6)

セラミック定着体は、JIS R 1600 に示すファインセラミックスに分類されるセラミックにて製作されており、顆粒物性においてアルミナ純度 96%以上のアルミナ材で、焼成体物性において 300N/mm²以上の曲げ強度（JIS R 1601）を製造会社が保証するものを用いることを原則としている。

セラミック定着体の寸法、ねじ筋強度及び密度については、以下のとおり品質管理基準を定めている。

・セラミック定着体			
解説表-3.4 セラミック定着体の品質管理基準			
管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
最外径	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±0.8mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体)ご とに 10 体。
全高	ノギスによる計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.2mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体)ご とに 10 体。
ねじ部長さ	測定治具による計測	(D13~D25) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内 (D29、D32) 先端型：設計値±1.0mm 以内 後端型：設計値±1.0mm 以内	1 焼成ロット (最大 2,000 体)ご とに 10 体。
ねじ筋強度	ねじ筋強度試験	母材となるねじ筋鉄筋の 規格降伏強度相当以上	1 焼成ロット (最大 2,000 体)ご とに 3 体。
密度	密度試験	・製造者から発行される材料 証明書の密度との誤差が ±0.05g/cm ³ 以内 ・各試験値が平均値の ±1.5% 以内 ・各試験値が 3.75 g/cm ³ 以上	1 焼成ロット (最大 2,000 体)ご とに 10 体。

参考 1.3-6 図 使用材料・強度
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/6)

(1) セラミックキャップバー (CCb)

セラミックキャップバー (CCb) を構成するねじ鉄筋は、JIS G 3112に準拠したネジテツコン (東京鐵鋼株式会社製ねじ鉄筋) で、種類はSD295A、SD295B、SD345とし、呼び名はD32、D29、D25、D22、D19、D16、D13とする。特性値 f_{yk} および f_{uk} はJIS G 3112の下限值としてよい。また、限界状態の検討に用いる異形鉄筋の断面積は、JIS G 3112による各呼び名の公称断面積としてよい。

(2) 充てん材

充てん材は補強する構造体コンクリートと同等な性能であるとする。

参考 1.3-6 図 使用材料・強度

(建設技術審査証明報告書より抜粋) (6/6)

3.3 構造部材の評価

3.1 で示した基本的考え方に基づき、参考 1.3-7 図で示すコンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012) (以下「コンクリート標準示方書 2012」という。)の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

セラミックキャップバー (CCb) により補強された壁部材のせん断耐力が作用するせん断力より大きいことを確認することにより、補強後の構造物の安全性の照査を行う。

セラミックキャップバー (CCb) により補強された壁部材の単位長さ当たりのせん断耐力 V_{pyd} は、式(1)と式(2)によりセラミックキャップバー (CCb) のせん断耐力への寄与を考慮し、2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準] 3編 2.4.3.2に準じて、以下のように求めてよい。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{CCbd} \dots\dots\dots(1)$$

$$V_{CCbd} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = \beta_{aw} [A_{aw} \cdot f_{awy} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw}] z / \gamma_b \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta_{awcd} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\beta_{awxx} = \eta = 1 - \frac{l_y}{2S_{rb}} - \frac{(l_y - d')^2}{2l_y S_{rb}} \dots\dots\dots(4)$$

$$\beta_{awdd} = \eta = 1 \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 V_{cd} ：せん断補強鋼材を用いない壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{sd} ：既存のせん断補強鋼材により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{CCbd} ：セラミックキャップバー (CCb) により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 V_{awd} ：セラミックキャップバー (CCb) を通常のスターラップとみなして求められる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
 β_{aw} ：セラミックキャップバー (CCb) のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awcd} ：標準型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awxx} ：両端先端型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 β_{awdd} ：両端後端型のセラミックキャップバー (CCb) を用いた場合のせん断耐力の向上への有効性を示す係数
 A_{aw} ：単位長さあたりの区間 S_{aw} におけるセラミックキャップバー (CCb) の総断面積
 f_{awy} ：セラミックキャップバー (CCb) の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする

参考 1.3-7 図 せん断に対する安全性照査
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/2)

α_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) が部材軸となす角度
 S_{aw} : セラミックキャップバー (CCb) の配置間隔
 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい
 γ_b : 部材係数 (一般に 1.10 としてよい)
 l_y : セラミックキャップバー (CCb) の先端型定着体の定着長 (5D としてよい)
 S_{rb} : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔

参考 1.3-7 図 せん断に対する安全性照査
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/2)

3.4 構造細目

本設計方法では、想定外の破壊形式をとらないように、参考 1.3-8 図に示す構造細目を定めている。

- (1) セラミックキャップバー (CCb) によって補強された壁部材では、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋とセラミックキャップバー (CCb) を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が0.15%以上になるように、セラミックキャップバー (CCb) を配置する。
- (2) セラミックキャップバー (CCb) を配置する最大の間隔は、補強前に配置されていたせん断補強鉄筋の位置も含めて、壁部材の有効高さの1/2でかつ300mm以下としなければならない。また、計算上でセラミックキャップバー (CCb) による補強を必要とする区間の外側の有効高さに等しい区間にも、これと同量のセラミックキャップバー (CCb) を配置しなければならない。
- (3) 差込側のセラミック定着体は、差込側のコンクリート表面に配置することを標準とする。
- (4) 埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。ただし、掘削孔の先端から埋込側の表面まで厚さは50mm以上とする。

参考 1.3-8 図 構造細目 (建設技術審査証明報告書より抜粋)

4. 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

建設技術審査証明報告書では、施工性に関して、施工の確実性及び施工の容易性について確認している。

4.1 施工の確実性

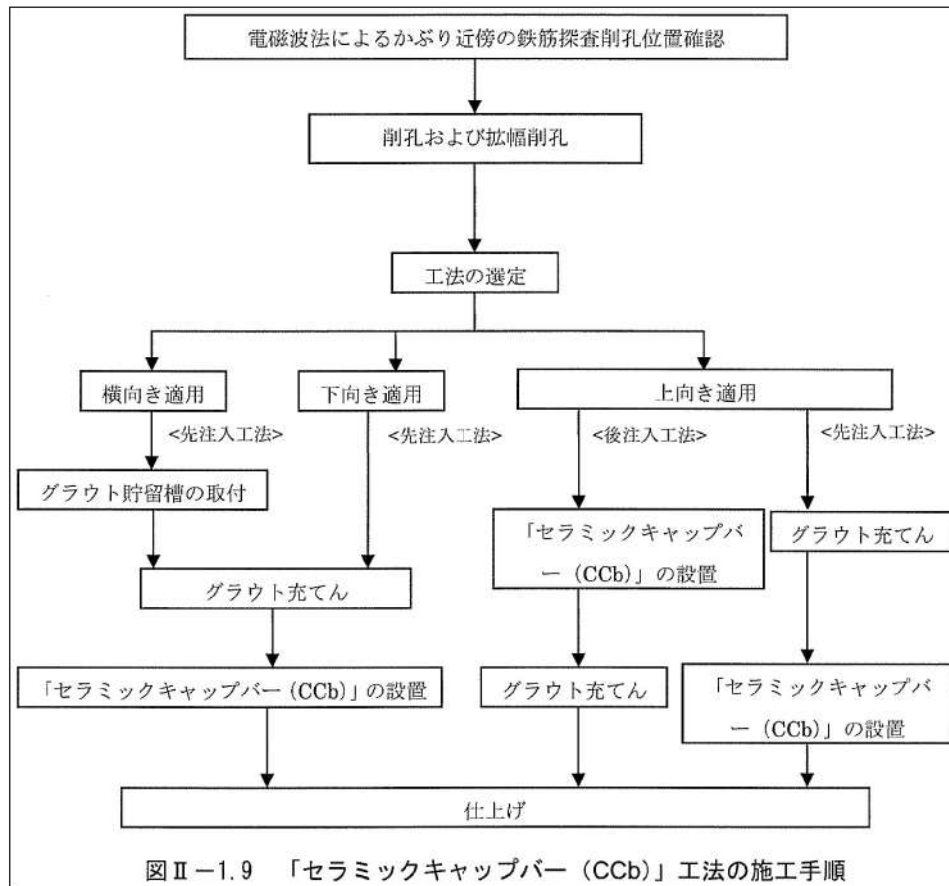
建設技術審査証明報告書において確認されている、CCb の施工の確実性について、参考 1.4-1 図に示す。

背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない RC 部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できることが確認された。

両側からの施工が可能な既設鉄筋コンクリート部材に対し、両端に後端型定着体を設置する場合、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、施工が確実に進められることが確認された。

参考 1.4-1 図 施工の確実性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

施工の確実性に当たっては、CCb の施工手順を設定し、施工試験等に基づき確認している。CCb の施工手順を参考 1.4-2 図に示す。



図Ⅱ-1.9 「セラミックキャップバー (CCb)」工法の施工手順

参考 1.4-2 図 CCb の施工手順の設定
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

4.2 施工の容易性

建設技術審査証明報告書において確認されている、CCbの施工の容易性について、参考1.4-3図に示す。

狭あいな空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できることが確認された。

挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭あいな空間での施工においても、カプラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できることが確認された。

参考 1.4-3 図 施工の容易性
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

施工の容易性の確認に当たっては、ボックスカルバート等の側壁及び頂版を想定した施工歩掛と想定工費の検討を行い、狭あいな空間や複雑な部位における補強工事に十分適用できることを確認している。

CCb の施工精度に影響を与える項目の確認

1. CCb の施工精度に影響を与える項目の抽出

CCb 工法によるせん断補強においては、施工精度の低下により計画どおり施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、施工精度に影響を与える項目を抽出し、施工精度の低下やせん断補強効果に大きな影響を与えないことを確認する。以下に、抽出した項目を示す。

- ① 削孔方法
- ② 削孔角度
- ③ 削孔位置
- ④ グラウトの充てん性

2. 削孔方法

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、その削孔方法としてはレッグハンマードリル又はコンクリートコアドリルの使用が主となっている。コンクリートコアドリルは設置面に強固に固定でき、掘削方向と掘削深さを精度良く確保することが容易であることから、原子力発電所施設では主にコンクリートコアドリルでの削孔を採用している。

また、削孔時に既存鉄筋の切断を回避するため、既存鉄筋干渉時にコンクリートコアドリルの回転を停止させる鉄筋センサーの使用を標準装備としている（参考 2-1 図参照）。

なお、削孔においては参考 2-1 表のとおり、施工精度を確保するために管理基準を設けている。



参考 2-1 図 削孔状況

参考 2-1 表 削孔に関する品質管理基準

管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
一般部の削孔長	メジャーによる計測	0mm ≤ 設計値 ≤ 20mm かつ、削孔先端から埋 込側表面までの厚さ 50mm 以上	全数
一般部の削孔径 拡幅部の削孔長及び 削孔径	セラミックキャッ パー (CCb) による計測	CCb が完全に 挿入できること	

3. 削孔角度

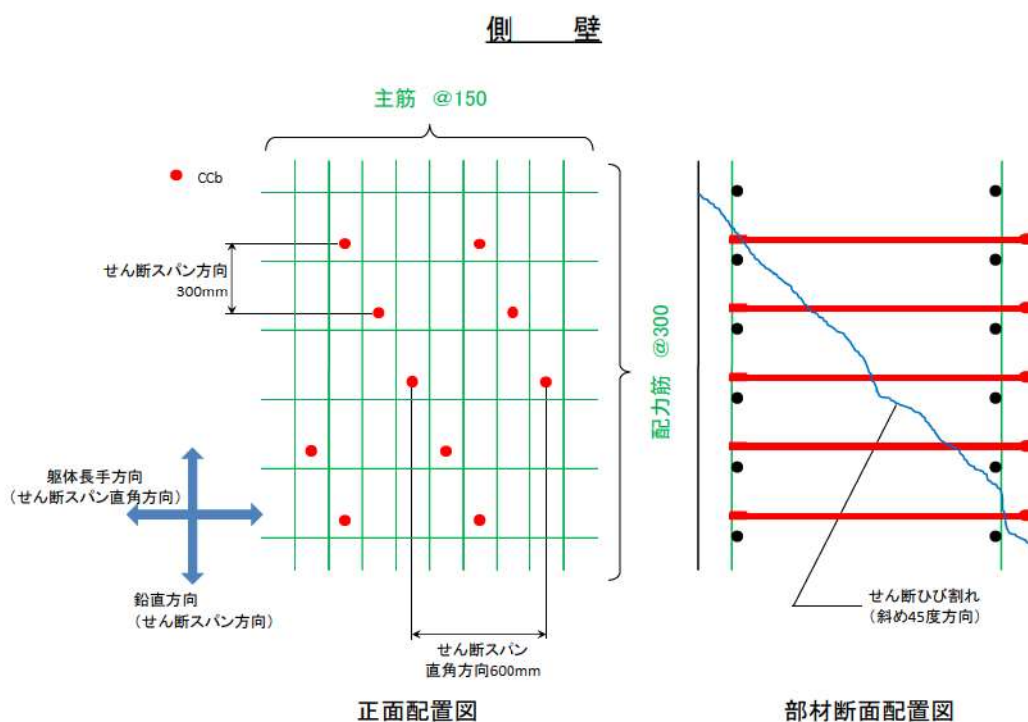
CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、CCb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そのため、コンクリートコアドリルを専用架台に設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるよう水平器、金尺等で確認し削孔することにより、削孔角度のばらつきが生じる可能性を低減させる。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」(建技審証第 1203 号)」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1200mm × 高さ 600mm × 長さ 1200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験の結果、削孔角度誤差を換算すると、長さ 1200mm, 2400mm は 0.72° , 長さ 3600mm で 0.66° となり、泊 3 号炉の CCb により耐震補強を行った構造物の最大部材厚 2000mm に対しても、コアドリルによる長尺削孔は十分精度があることが示されている。

4. 削孔位置

CCb の配置は主筋や配力筋の配筋ピッチを考慮して決めているが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず CCb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し CCb を挿入することで設計上必要な鉄筋量を確保する。なお、参考 2-2 図に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。再削孔の際、新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性があることから、孔を隣接させて削孔することが可能なコンクリートコアドリルを使用し、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置に変更が生じて必要鉄筋量を確保できるため、せん断補強効果に影響を及ぼさない。



参考 2-2 図 取水ピットスクリーン室のせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図 (例：側壁)

5. グラウトの充てん性

グラウトの充てん性については、グラウト充てん性確認実験により、削孔内に設置した Ccb の先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、Ccb とコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。以下に、建設技術審査証明報告書に記載されているグラウト充てん性確認実験の内容を示す。

グラウト充てん性確認実験は、①先充てん工法（横向き）、②先充てん工法（下向き）、③先充てん工法（上向き）、④後充てん工法（上向き）にて実施されている（参考 2-3 図参照）。

なお、グラウト充てんでは残留エアが施工品質に影響を与えることから、高流動グラウトを使用する横向き施工においては、残留エアの有無をかき出しにより確認しており、残留エアが無いことを全数確認している。

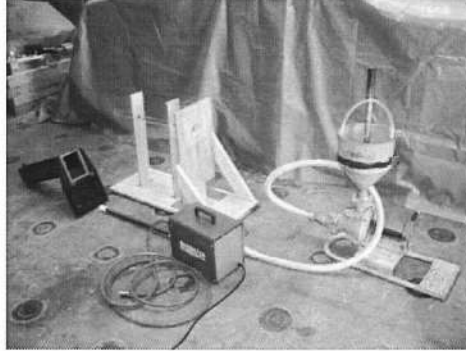
① 先充てん工法（横向き）

先充てん工法（横向き）の場合、コンクリート躯体面に養生用治具を止水剤、接着剤等で設置し、グラウト貯留槽を真空ポンプと吸盤で固定する。そして、グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんし、削孔部分およびグラウト貯留槽部分にグラウトを満たす。その状態で「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入することにより、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

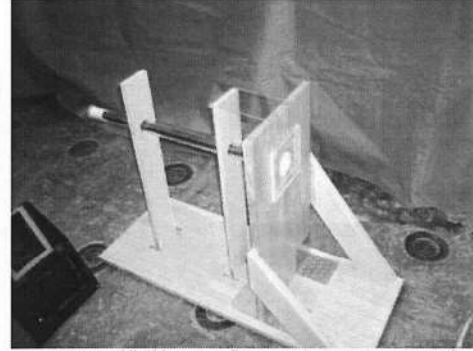
写真Ⅱ-4.9～写真Ⅱ-4.11 に示すように、グラウトが充てんされた削孔内に「セラミックキャップバー（CCb）」を抵抗無く挿入でき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型および RC 部材を用いた施工試験により確認した。また、実際の施工では、ほぼ水平となるように削孔することが可能であるが、アクリル模型の先端を 2°以上、上に傾けた状態でのグラウトの充てん確認試験を実施し、孔内後端部の上部の角部にエアが残留した場合でも、エア抜き工具を用いて残留エアの有無の確認と除去が可能であることを確認している（写真Ⅱ-4.10）。

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (1/10)

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できるので、最小限の設備と人員での「セラミックキャップバー (CCb)」の横向き設置が可能である。



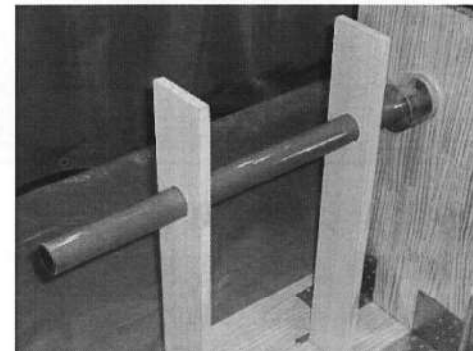
試験器具一式



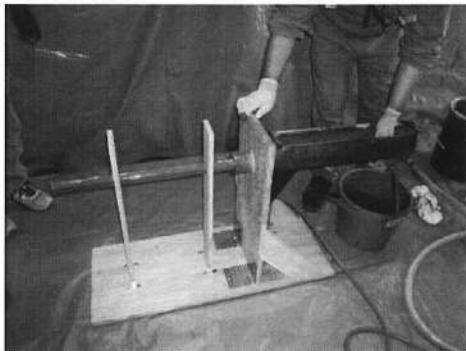
亚克力模型への「セラミックキャップバー (CCb)」の仮設置



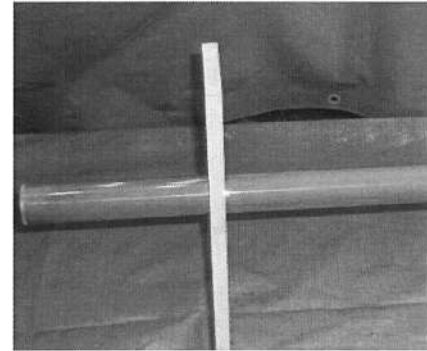
グラウトの充てん状況



グラウトの充てん状況 (先端)



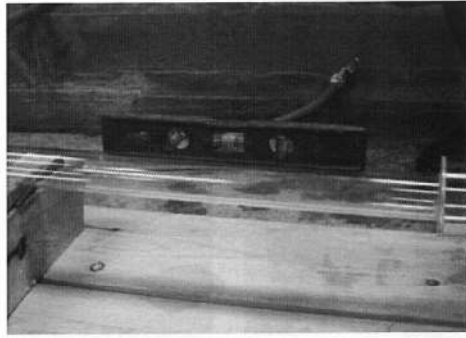
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



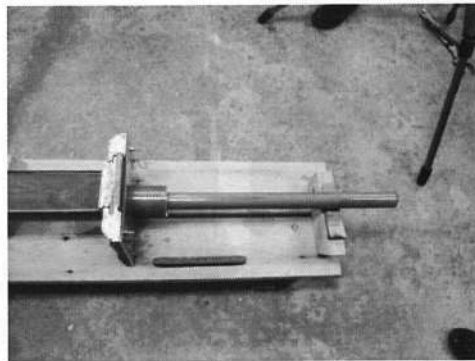
先端部の充てん状況

写真Ⅱ-4.9 亚克力模型によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

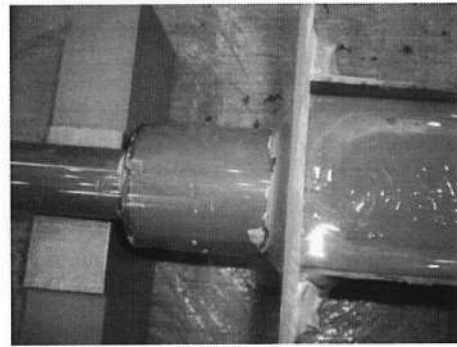
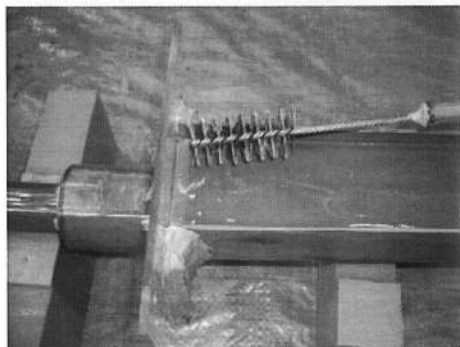
参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (2/10)



上傾き充てん確認試験



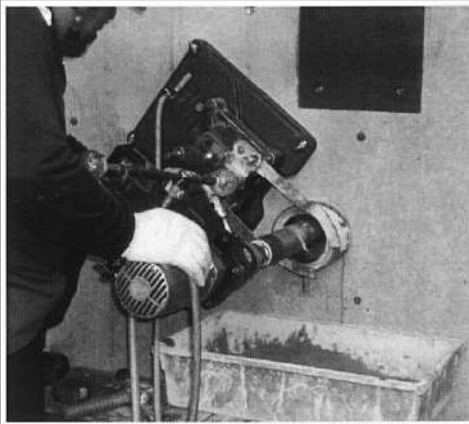
上傾き充てん状況



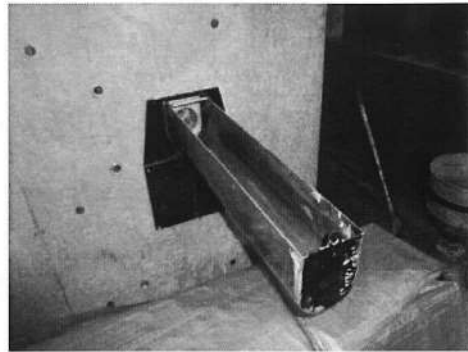
後端部エア抜き確認試験

写真Ⅱ-4.10 アクリル模型によるグラウト充てん性確認実験(先端が上に傾いた場合)

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (3/10)



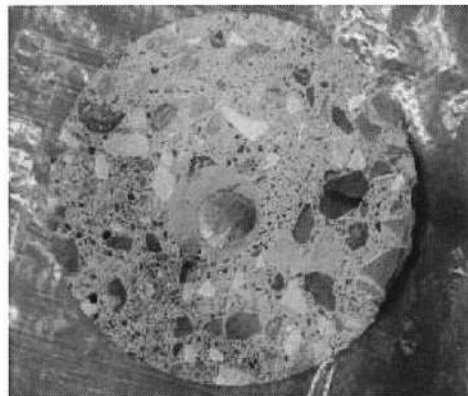
RC 部材への削孔



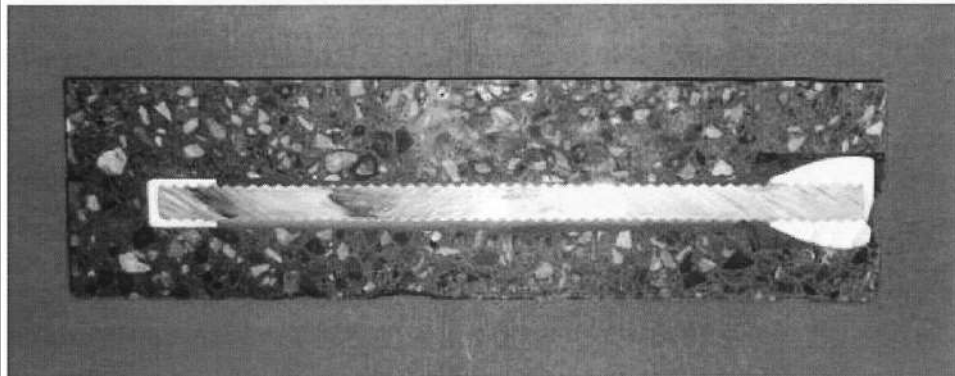
グラウト貯留槽の設置



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



グラウトの注入状況 (鉄筋部)
「セラミックキャップバー (CCb)」挿入
部を切断したもの



グラウトの注入状況 (全体)
「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入部

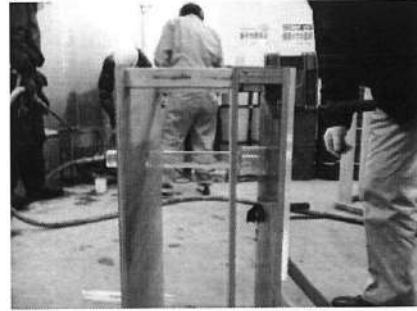
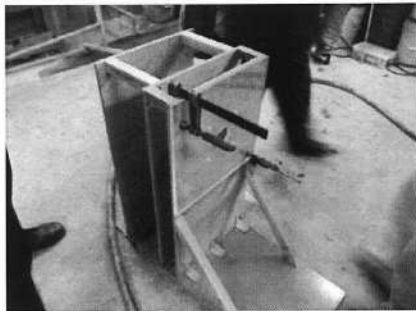
写真Ⅱ-4.11 RC 部材によるグラウト充てん性確認実験 (横向き)

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (4/10)

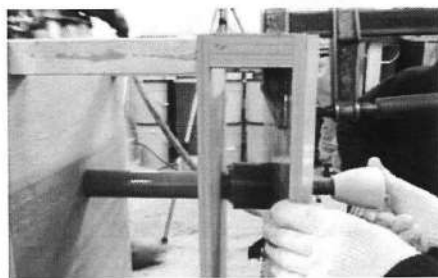
ハンチ部の施工や、支障物が近傍にあるために、グラウト貯留槽が使用できない箇所は、表Ⅱ-1.4に示す可塑性グラウトを用いて作業を行うことにより、グラウト貯留槽を用いた時と同様の充てん性能を有していることをアクリル模型の施工試験で確認している。

グラウトポンプを用いて、掘削孔の先端からエアを追出すようにグラウトを充てんする。その後に「セラミックキャップバー (CCb)」をゆっくり挿入することにより、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入およびその周囲へのグラウトの充てんを行う。

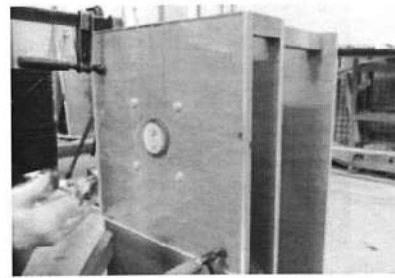
グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑性剤を添加して再度練り混ぜて使用する。



アクリル模型試験体



「セラミックキャップバー (CCb)」の挿入



「セラミックキャップバー (CCb)」の設置

写真Ⅱ-4.12 アクリル模型による可塑性グラウト充てん性確認試験 (横向き)

表Ⅱ-1.4 可塑性グラウトの性能

水セメント比 (%)	添加率 (%)	テーブルフロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)		
					3日	7日	28日
33.0~39.0	0.28%~0.32%	(静止) 105mm~120mm (15回打撃) 150mm~200mm	0.0	0.12%~0.18%	35.9	45.5	56.4

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
(建設技術審査証明報告書より抜粋) (5/10)

② 先充てん工法（下向き）

先充てん工法（下向き）の場合、削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップパー（CCb）」を上方から差し込むだけで配置を完了する。削孔内面は、グラウトを充てんする前に湿潤状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。

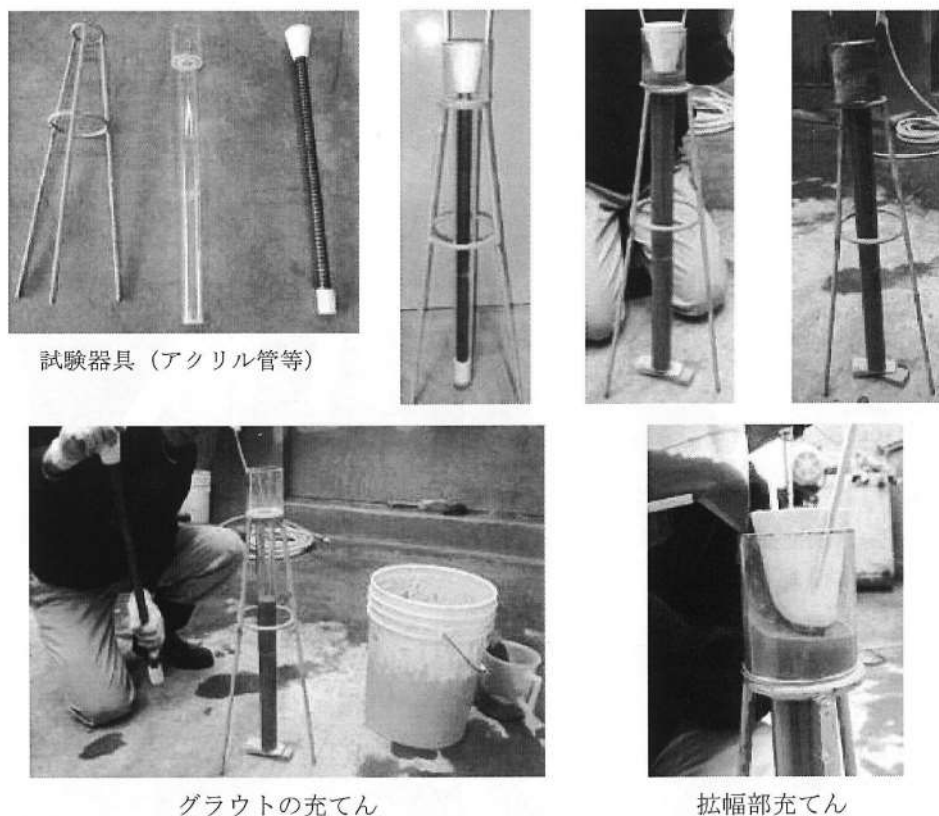
写真Ⅱ-4.8 に示すように、グラウトが表Ⅱ-1.2 に示すものであれば、「セラミックキャップパー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんすることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

表Ⅱ-1.3 グラウトの性能

水セメント 比 (%)	JA ロート 流下時間 (秒)	ブリーディ ング率 (%)	膨張収縮率 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
				1日	3日	7日	28日
33.0~39.0	15~30	0.0	0.14~0.23	22.2	38.6	58.3	65.3

圧縮強度は現場封緘養生による結果である。



写真Ⅱ-4.8 グラウト充てん性確認実験（下向き）

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験

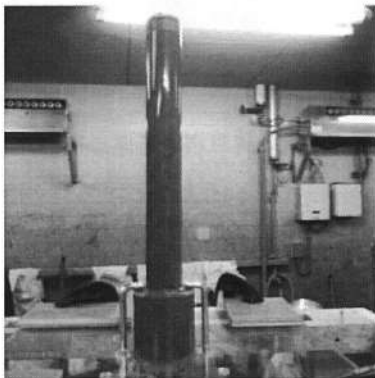
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（6/10）

③ 先充てん工法（上向き）

先充てん工法（上向き）の場合、可塑性グラウトを削孔内にグラウトを充てんし、「セラミックキャップバー（CCb）」を下方から差込むだけで配置を完了する。

写真Ⅱ-4.14、写真Ⅱ-4.15 に示すように、可塑性グラウトであればグラウトで充てんされた削孔内に、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入でき、エア抜きホースを残置すること無く、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部までグラウトが充てんできることを、アクリル模型および RC 部材を用いた施工試験、専用エアメータを用いた上向き充てん試験により確認した。

グラウトは、セメントに所定の水を加えてハンドミキサで練り混ぜ、その後に所定の可塑性剤を添加して再度練り混ぜて使用できる。



グラウトの充てん



「セラミックキャップバー（CCb）」の設置



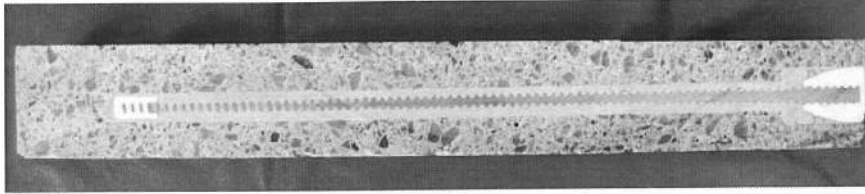
グラウトの充てん



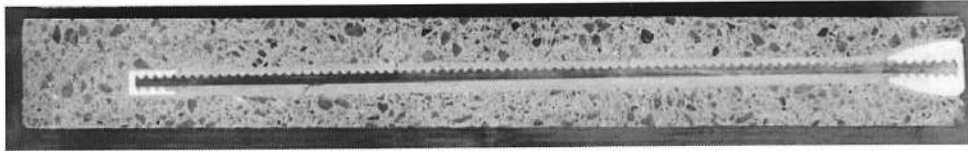
「セラミックキャップバー（CCb）」の挿入

写真Ⅱ-4.14 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験（上向き）（その1）

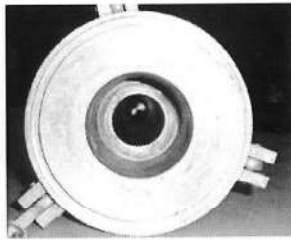
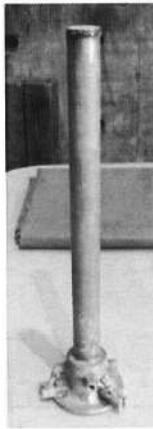
参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
（建設技術審査証明報告書より抜粋）（7/10）



拡幅部通常コア



拡幅部親子ビット
グラウトの注入状況（全体）



CCb 工法仕様上向き空気量測定

写真Ⅱ-4.15 先充てん後挿入工法グラウト充てん性確認実験（上向き）（その2）

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験

（建設技術審査証明報告書より抜粋）（8/10）

④ 後充てん工法（上向き）

後充てん工法（上向き）の場合、写真Ⅱ-4.13に示すように、「セラミックキャップバー（CCb）」の先端定着部にエア抜きホースを設置した養生治具を用意し、「セラミックキャップバー（CCb）」を挿入した削孔口部分に設置する。

そして、高流動性のグラウトを下方から注入し、エア抜きホースから掘削孔内の空気を排出して充てんする。この時、あらかじめ配置した「セラミックキャップバー（CCb）」が削孔の中心部に配置されるように、差込側の定着体に対し、注入治具側にスペーサ等を設置し位置を調整する。削孔内面は、グラウトの注入前に湿潤状態にするか、あるいはドライアウト防止剤を散布し、グラウトが吸湿されないようにする。グラウトの充てん状況は、グラウト注入時におけるエア抜きホースからの空気の排出と、グラウトの流失を確認することによって把握する。そして、グラウトの注入圧を保ったまま、エア抜きホースを養生治具の位置まで引き抜き、その口を閉じる。

写真Ⅱ-4.13に示すように、上向き施工でも「セラミックキャップバー（CCb）」の先端までグラウトを充てんでき、エア抜きホースを残置することなく、「セラミックキャップバー（CCb）」設置できることを、アクリル模型を用いた施工試験により確認した。

グラウトはプレミックス材料であり、施工現場では、所定量の水を加えてハンドミキサーで練り混ぜるだけで所定の性質のものが使用できる。

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験

（建設技術審査証明報告書より抜粋）（9/10）



写真Ⅱ-4.13 グラウト充てん性確認実験（上向き）

参考 2-3 図 グラウトの充てん性確認実験
 （建設技術審査証明報告書より抜粋）（10/10）

2～5 に示すとおり、施工上の配慮により、せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下が生じる可能性は低いことが確認できる。

しかし、現時点では後施工による施工精度に対して、施工実績に基づく十分な統計がとれていないため、施工精度の低下による影響が生じる可能性を否定することはできない。

以上を踏まえて、適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工精度の低下への設計上の配慮として、耐震評価上の裕度（例えば照査値を8割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

施工実績・研究事例

1. 後施工せん断補強筋に関する施工実績

1.1 Ccbの施工実績

Ccbの施工実績は、参考3-1表に示すように2022年7月31日までに、道路・地下街、浄化センター、鉄道、浄水場、水門、排水機場、排水路、発電所・プラント等、施工中案件を含め369件の工事に適用され、59.0万本以上が施工されている。

参考3-1表 Ccbの施工実績（2022年7月31日現在）

対象施設		施工件数
道路・地下街	道路橋他	
浄化センター	最終沈殿池、ポンプ室他	
鉄道	地下駅舎、トンネル部	
浄水場	配水池他	
水門	防潮水門他	
排水機場	排水機場他	
排水路	地下排水路	
発電所・プラント	貯水池、水路他	
ダム	ダム	
空港	空港	
護岸	防潮堤他	
栈橋	栈橋	

Ccbの施工実績を部材厚、鉄筋径及び使用環境ごとに整理する。部材厚ごとに整理した結果を参考3-2表に、鉄筋径ごとに整理した結果を参考3-3表に、使用環境（気中又は水中）ごとに整理した結果を参考3-4表に示す。なお、カウントする際は、1件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている（例：同一工事内でD13、D16、D19の鉄筋を用いている場合はD13、D16、D19のすべてにカウント）。

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

参考 3-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）（1/4）^{（注）}

部材厚（mm）	件数
～500	154
501～1000	267
1001～1500	164
1501～2000	79
2001～3000	24
3000～	12

（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

参考 3-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）^{（注）}

（上記実績のうち横向き施工）（2/4）

部材厚（mm）	件数
～500	112
501～1000	176
1001～1500	95
1501～2000	40
2001～3000	11
3000～	5

（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

参考 3-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）^{（注）}

（上記実績のうち下向き施工）（3/4）

部材厚（mm）	件数
～500	66
501～1000	153
1001～1500	102
1501～2000	51
2001～3000	16
3000～	7

（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

参考 3-2 表 Ccb の施工実績（部材厚）^(注)

（上記実績のうち上向き施工）（4/4）

部材厚（mm）	件数
～500	15
501～1000	40
1001～1500	32
1501～2000	3
2001～3000	0
3000～	0

（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

参考 3-3 表 Ccb の施工実績（鉄筋の種類）^(注)

補強鉄筋の種類	件数	
SD345	D13	108
	D16	141
	D19	179
	D22	172
	D25	111
	D29	72
	D32	67

（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

参考 3-4 表 Ccb の施工実績（使用環境）^(注)

施工場所	件数
気中	107
水中	262


（注）：ハッチング箇所は、泊 3 号炉の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

1.2 過去の地震の経験事例

CCbにより耐震補強を行った構造物は、過去に多くの地震を受けている（参考 3-5 表）。その中には、震度 5 強の地震を受けた事例もあり、CCb 工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では被害・不具合が発生したという報告はない。

参考 3-5 表 震度 4 以上の地震を受けた構造物



 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

4 条-別紙 7-参考 3-4

1.3 レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法RMA工法）を適用したせん断補強事例が報告されている^(注)。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したことによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に20m弱の盛土をおこなった構造物である。構造形式等の詳細については、2.④に記載する。

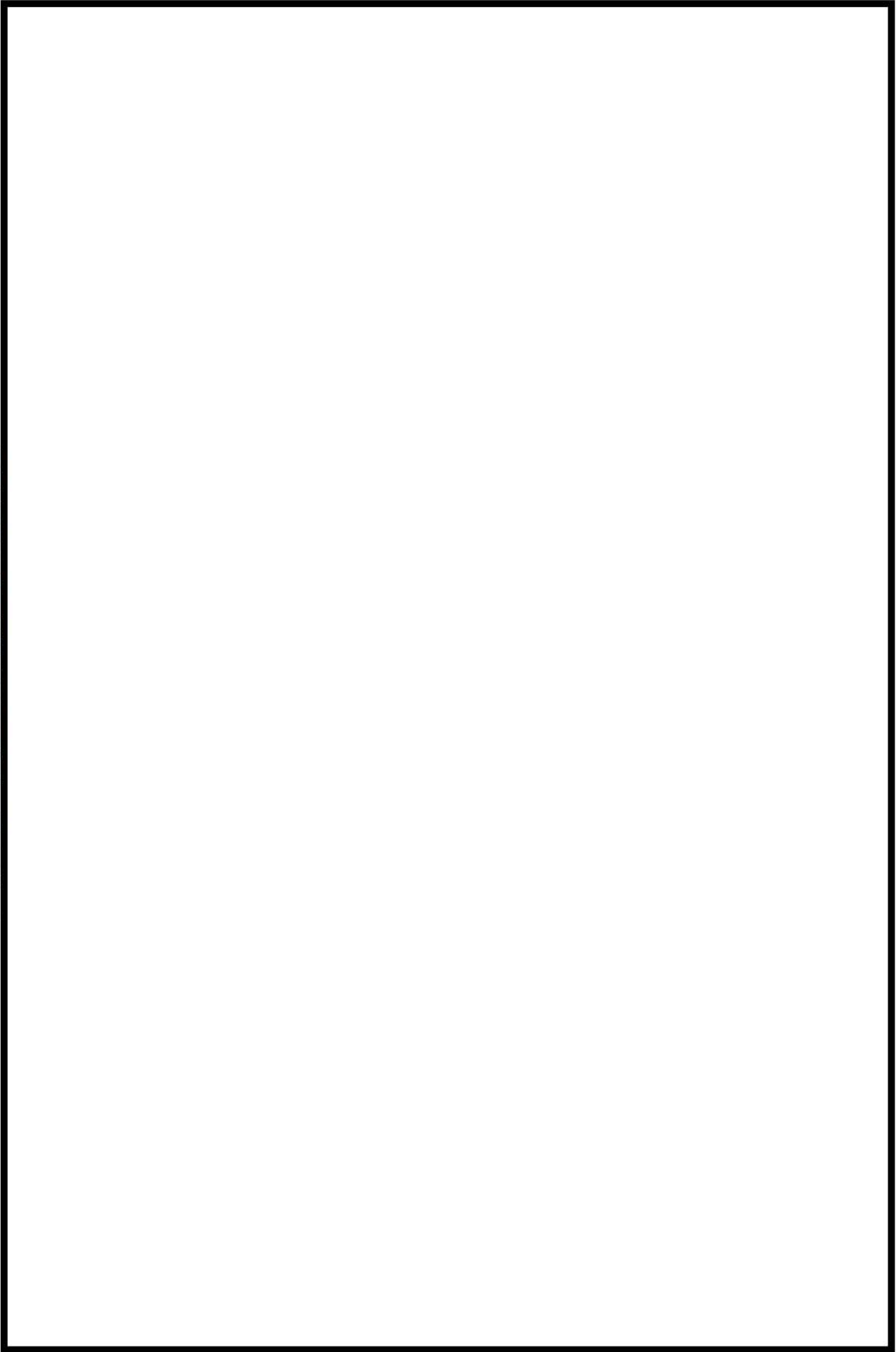
(注)：参考文献

後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について（岡崎大宜）


1.4 後施工せん断補強工法の比較

CCb工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強工法の比較結果を参考3-6表に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するものの、おおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

参考 3-6 表 後施工せん断補強工法の比較 (1/2)



※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

4 条-別紙 7-参考 3-6

参考 3-6 表 後施工せん断補強工法の比較 (2/2)

※土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成



枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

4 条-別紙 7-参考 3-7

2. 後施工せん断補強筋に関する研究事例

① コンクリート構造物の後施工せん断補強技術

◆ 文献の要旨

既存のコンクリート構造物の耐震補強技術のうち、カルバートや地下貯水槽の壁（地下壁構造）に用いられるせん断補強（後施工せん断補強）技術について述べられたものである。

◆ 着目すべき事項

- ・後施工せん断補強筋の定着性能の確認試験として、鉄筋の引抜き試験が例示されている。
- ・標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されている。
- ・後施工せん断補強効果の確認試験として、梁試験体の正負交番載荷試験が例示されている。
- ・「マルチプルナット」、「セラミックキャップバー（CCb）」、「Post-Head-bar（PHb）」の建設技術審査証明報告書を参考文献としている。

◆ 泊3号炉におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・後施工せん断補強技術が地下壁構造に対して効果的であることを確認した。
- ・CCb工法の建設技術審査証明報告書には、本文献と同様の引抜き試験、梁試験体の正負交番載荷試験が実施され、それら試験結果に基づいた有効係数による評価手法が明記されていることを確認した。

② 耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

◆ 文献の要旨

既設の地中構造物を後施工によりせん断補強する工法として RMA 工法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・後施工せん断補強筋の性能確認実験として、引抜き試験による定着性能の確認、梁試験体の正負交番載荷によるせん断補強効果の確認を実施している。
- ・後施工せん断補強において、せん断補強筋の定着長を考慮した有効係数によるせん断補強効果の評価手法が示されている。なお、この評価手法は参考文献として示されている「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」（土木学会，2005）に準じている。
- ・RMA 工法により補強が実施された構造物は、東日本大地震においても損傷がなかったことが報告されている。

◆ 泊 3 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・本文献の工法（RMA 工法）と同様の性能確認試験を CCb 工法でも実施していることを確認した。
- ・本文献の工法（RMA 工法）と CCb 工法とでは、定着方法の差異により定着長が異なるが、有効係数の算出方法は同様であり、CCb 工法の建設技術審査証明報告書に示される有効係数の算出方法が一般的であることを確認した。
- ・CCb により耐震補強を行った構造物において、現時点で地震による被害・不具合が発生していないことを確認した。

③ 論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

◆ 文献の要旨

既存のボックスカルバート等の連続壁に異形鉄筋を埋込みせん断補強を行う方法に対し、その有効性を確認するために梁供試体を用いたせん断試験が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・後施工せん断補強した供試体のせん断耐力を実験で確認した結果、先施工として算出したせん断耐力（設計値）とほぼ同等のせん断耐力が得られている（実験値／設計値＝0.93～1.12）。
- ・後施工によりせん断補強した供試体のせん断耐力は、先施工した供試体のせん断耐力と同等のせん断耐力を有している（後施工／先施工＝0.85～1.07）。

◆ 泊3号炉におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・先施工のせん断補強に対するCCb工法の有効係数は、建設技術証明報告書に記載されている梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

④ 後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

◆ 文献の要旨

広島空港の滑走路及び誘導路直下の地下構造物（用倉トンネル）が、レベル2地震動に対する耐震性能照査においてせん断耐力が不足していることが確認された。用倉トンネル（アーチカルバート）に対し耐震補強工法の選定・検討を実施し、RMA 工法による後施工せん断補強が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・重要施設である空港滑走路及び誘導路直下の地下構造物（アーチカルバート）に対して、後施工型せん断補強工法（RMA 工法）による耐震補強が実施されている。
- ・アーチカルバートの補強には、増厚工法，後施工せん断補強工法（鉄筋差込工法），接着工法，巻立て工法の中から，施工後においても現況の内空断面を確保でき，坑内からの施工も可能である後施工せん断補強工法が選定されている。
- ・補強対象のアーチカルバートの部材厚は 1600mm である。

◆ 泊3号炉におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・地下構造物の補強工法として，後施工せん断補強工法が効果的であることを確認した。
- ・泊3号炉取水ピットスクリーン室の部材厚（隔壁：1500mm）相当の構造物に対して後施工せん断補強工法の施工実績があることを確認した。

⑤ 地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

◆ 文献の要旨

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い、先施工せん断補強と後施工せん断補強との耐力比較及び後施工せん断補強筋の埋込長の違いによる耐力比較が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定については、新設構造物を対象とした乾燥収縮等によるひび割れを防ぐためのものであることから考慮せず、有効高さの 1/2 としている。
- ・先端を 45 度にカットした後施工によるせん断補強の場合、先施工の設計耐力に対して最低でも 80% 程度のせん断耐力が実験で得られている。

◆ 泊 3 号炉における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・泊 3 号炉において Ccb により耐震補強を行った構造物は建設後 15 年以上経過しており乾燥収縮は終了していることから、せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定は除外した。
- ・先施工のせん断補強に対する Ccb 工法の有効係数は、建設技術審査証明報告書に記載される梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

⑥ 地下道における PHb(ポストヘッドバー)工法の採用と積雪寒冷地の施工について

◆ 文献の要旨

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

・ 充てん材の温度と強度の関係を把握するための試験施工が実施されており，充てん材料が 0℃以下の履歴を受けた場合，強度発現が低下することが確認されている。

◆ 泊 3 号炉における Ccb 工法への反映事項の確認

・ Ccb 工法においては充てん材料が 0℃以下とならないように練上がり温度を計測し，0℃以上であることを確認した上で施工を実施した。

⑦ せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

◆ 文献の要旨

東京都港湾局が後施工せん断補強工法における補強効果確認のために行った室内せん断実験の概要，その実験結果の設計への反映，実施工への適用及びその施工結果についての考察が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じている。

◆ 泊 3 号炉における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・Ccb 工法は第三者機関による審査証明が行われており，その中で施工の確実性についても審査対象となっていることから，本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はない。なお，参考資料 2 にて施工精度の向上に向けた方策を記載している。

⑧ セラミック定着型せん断補強鉄筋（CCb 工法）による既設地下コンクリート構造物の耐震補強

第 57 回 電力土木講習会テキスト 平成 27 年 2 月

一般社団法人 電力土木技術協会

◆ 文献の要旨

CCb 工法の設計法及び施工法の概要と、電力分野での実績を含む施工実績が紹介されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ CCb 工法の施工実績は、下水道処理場のポンプ棟、分水槽、重力濃縮槽、汚泥処理槽、ポンプ室及び放流渠等が多い。
- ・ CCb 工法の定着体は、アンカーやインサートにも広く用いられている高い耐食性を有する高純度アルミナ系セラミックス製であるため、塩害や硫酸等の影響を受ける厳しい環境（海水に接する発電所の取・放水路や腐食環境にある下水道施設）においても、耐久性を確保できる。

◆ 泊 3 号炉における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法が様々な施設で施工実績があることを確認した。
- ・ 塩害や硫酸等の影響を受ける厳しい環境下においても CCb 工法が使用されていることを確認した。

後施工せん断補強筋に関する施工実績及び各研究事例を踏まえて、設計及び施工へ反映している事項を以下に示す。

- ・ 硫酸等の影響を受ける腐食環境下である浄化センター（下水道処理施設）での実績もあり、泊 3 号炉で採用する環境よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。
- ・ 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、定着性能の確認、梁試験体の正負交番载荷によるせん断補強効果の確認を実施しており、CCb 工法においても同様の確認を行っている。
- ・ 標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する、後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されており、CCb 工法においても同様の評価手法であることを確認した。

泊発電所3号炉

屋外重要土木構造物等の耐震評価における
断面選定について

1. 方針

本資料では、屋外重要土木構造物等^(注)の耐震評価における断面選定の考え方について示す。
なお、津波防護施設については「泊発電所3号炉 津波による損傷の防止」に示す。


(注)：以下のいずれかに該当するか、又は兼務する構造物を「屋外重要土木構造物等」という。

- ・屋外重要土木構造物
- ・常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備のうち土木構造物
- ・常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設
(特定重大事故等対処施設を除く)のうち土木構造物

本資料で記載する屋外重要土木構造物等に設置される主要な設備の一覧を第8-1-1表に、全体配置図を第8-1-1図に示す。



第8-1-1図 全体配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第8-1-1表 屋外重要土木構造物等に設置される設備一覧

名称	屋外重要土木構造物	常設重大事故等対処設備	常設重大事故等対処施設	設置される設備			
				名称	耐震	耐津波	常設重大事故等対処設備
取水口	○	○ (注)	○	貯留堰	-	○	○
取水路	○	○ (注)		-	-	-	-
原子炉補機冷却海水管ダクト	○		○	原子炉補機冷却海水設備配管	○	-	○
B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯槽トレンチ	○		○	ディーゼル発電機燃料油移送配管	○	-	○
取水ピットスクリーン室	○	○ (注)		潮位計	-	○	-
				取水ピット水位計	-	○	-
				3号炉取水ピットスクリーン室防水壁	-	○	-
				原子炉補機冷却海水ポンプ	○	-	○
				原子炉補機冷却海水設備配管	○	-	○
取水ピットポンプ室	○	○ (注)	○	浸水防止蓋	-	○	-
				ドレンライン逆止弁	-	○	-
				貫通部止水処置	-	○	-
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室	○		○	原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ	○	-	○
				原子炉補機冷却海水設備配管	○	-	○

屋外重要土木構造物 : 耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能, 若しくは非常時における海水の通水機能を求められる土木構造物

常設重大事故等対処設備 : 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備

常設重大事故等対処施設 : 常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設 (特定重大事故等対処施設を除く)

耐震 : 耐震重要施設 (津波防護施設, 浸水防止設備, 津波監視設備を除く)

耐津波 : 津波防護施設, 浸水防止設備, 津波監視設備

(注) : 非常用取水設備

1.1 基本的な考え方

泊発電所の屋外重要土木構造物等は、護岸構造物、線状構造物及び箱型構造物の3つの構造形式に分類される。以下に、構造形式ごとの構造的特徴を踏まえた断面選定の基本的な考え方を示す。

① 護岸構造物（取水口）

海水を取水するため護岸コンクリートで海水の流路を形成している構造物（以下「護岸構造物」という。）は、延長方向（通水方向）におおむね同一構造が連続している。また、横断方向（延長方向に直交する方向）は、前面に海水があり、背面には埋戻土が分布している。

護岸構造物は、前面側から海水による水圧を受けるものの、背面側からの土圧の方が大きく、横断方向加振に対して前面側（海水側）に滑動・転倒しやすい構造であることから、横断方向が明確に弱軸となるため、横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う。

よって、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を横断方向から評価対象断面として選定する。

② 線状構造物（取水路，原子炉補機冷却海水管ダクト，B1，B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ）

延長方向への海水の通水機能や配管等の支持機能を維持するため、延長方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置される構造物（以下「線状構造物」という。）は、横断方向（延長方向に直交する方向）に設置される構造部材が少なく、横断方向が明確に弱軸となることから、横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う。

よって、構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を横断方向から評価対象断面として選定する。

③ 箱型構造物（取水ピットスクリーン室，取水ピットポンプ室，原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレナ室）

加振方向と平行に配置される妻壁や隔壁等を有する構造物（以下「箱型構造物」という。）は、加振直交方向の構造物長さと同様に配置される壁の総厚との比が小さい方が弱軸となり、大きい方が強軸となる。

箱型構造物のうち取水ピットスクリーン室は、横断方向（延長方向に直交する方向）に配置される壁部材は構造物南面の妻壁のみであるのに対し、延長方向には側壁及び隔壁が多数配置されていることから、横断方向が弱軸となる。また、ほぼ同一の断面が延長方向に連続しており、三次元的な応答の影響は小さいことから、妻壁を耐震部材として見込まず、弱軸方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う。よって、構造物の応答が耐震評価上最も

厳しくなると考えられる断面を弱軸方向から評価対象断面として選定する。また、強軸方向についても間接支持する機器・配管の応答影響を評価する必要があることから、評価対象断面（床応答値算出断面）として選定する。

箱型構造物のうち取水ピットポンプ室及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室は、延長方向に妻壁や隔壁等を複数有することから、妻壁や隔壁等の面部材を耐震部材として考慮することとし、三次元モデルを用いて水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響を考慮して耐震評価を行う。よって、三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を直交する2方向から評価対象断面（地震時荷重算定断面）として選定する。

上記を考慮した屋外重要土木構造物等の断面選定の基本的な考え方を第8-1-2表に示す。

第8-1-2表 屋外重要土木構造物等の断面選定の基本的な考え方

名称	断面選定の考え方		
	A:	B:	C:
	<p>A: 横断方向が明確に弱軸となることから、横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を行う線状構造物及び護岸構造物</p> <p>⇒ 構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる位置を横断方向から評価対象断面に選定する。</p>	<p>B: 妻壁や隔壁等の面節材を耐震部材として考慮せず、弱軸方向の二次元地震応答解析による耐震評価及び強軸方向の二次元地震応答解析により床応答を算出する箱型構造物</p> <p>⇒ 構造物の応答が耐震評価上最も厳しくなると考えられる位置を弱軸方向から評価対象断面に選定する。また、弱軸方向についても床応答算出断面として評価対象断面に選定する。</p>	<p>C: 妻壁や隔壁等の面節材を耐震部材として考慮して、三次元モデルを用いて水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して耐震評価を行う箱型構造物</p> <p>⇒ 三次元モデルに作用させる荷重を適切に評価することが可能な断面を、直交する2方向から地震時荷重算定断面として評価対象断面に選定する。</p>
取水口	○	—	—
取水路	○	—	—
原子炉補機冷却海水管ダクト	○	—	—
B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽	○	—	—
取水ピットスクリーン室	—	○	—
取水ピットポンプ室	—	—	○
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室	—	—	○

1.2 評価対象断面の選定の流れ

評価対象断面の選定の流れを以下に示す。

(1) 評価対象候補断面の整理

設置許可段階において、以下の観点にて、評価対象候補断面を整理する。

① 要求機能並びに間接支持する機器・配管の有無及び設置状況

- ・要求機能に差異がある場合、耐震評価において要求機能に応じた許容限界を設定する必要があることから、要求機能の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。
- ・間接支持する機器・配管系の種類及び設置状況に差異がある場合は、構造物に作用する荷重及び床応答特性が異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、間接支持する機器・配管系の種類や設置状況に係る差異の有無により評価対象候補断面を整理する。

② 構造的特徴（部材厚，内空断面，配筋，断面急変部，構造物間の連結部等）

- ・構造的特徴に差異がある場合は、構造物に作用する土圧等の荷重及び床応答特性が異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、構造的特徴の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。

③ 周辺状況（上載荷重，土被り厚，周辺地質，周辺地質変化部，隣接構造物，地下水位，断層）

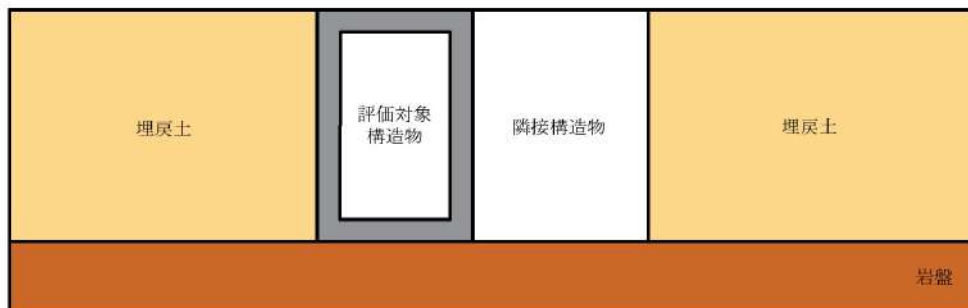
- ・周辺地質の差異や周辺地質変化部及び構造物と断層の交差部がある場合は、構造物に作用する土圧等の荷重，地震波の伝播特性及び床応答特性が異なり、評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、周辺地質等の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。
- ・MMR（マンメイドロック）は、構造物を支持する又は構造物の周囲を埋め戻すコンクリートである。MMRの分布により、構造物に作用する土圧等の荷重，地震波の伝播特性及び床応答特性に影響を与えることから、周辺地質の中で整理する。
- ・隣接構造物による影響については、二次元FEMにてモデル化する隣接構造物の有無や種類に差異がある場合、構造物の地震時応答が異なり評価対象構造物及び機器・配管系の耐震評価に影響することから、モデル化する隣接構造物の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。
- ・隣接構造物のモデル化方針は以下のとおりとし、評価対象構造物と隣接構造物の位置関係の例を第8-1-2図に示す。なお、モデル化対象とする隣接構造物は、耐震性を有し、岩着（MMRを介する場合も含む）で評価対象構造物と同等以上の大きさの構造物とする。
(a) 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

評価対象構造物と隣接構造物が接している場合、隣接構造物の地震時応答が評価対象構造物に伝達することが考えられる。よって、隣接構造物の地震時応答を考慮するため隣接構造物をモデル化する。

(b) 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

地中構造物の耐震評価においては、埋戻土より剛性の大きい隣接構造物をモデル化することにより、周辺地盤の変形が抑制されると考えられる。よって、評価対象構造物に作用する土圧を保守的に評価するため、隣接構造物の設置範囲を埋戻土としてモデル化する。

- ・防潮堤は、地中部に大きなセメント改良土を有しており、これらの地震応答は周辺地盤の挙動に影響を及ぼすものと考えられる。よって、防潮堤が評価対象構造物の近傍（解析モデル化範囲内）に存在する場合は、防潮堤をモデル化する。
- ・地下水位について、T.P. 10.0m 盤エリアに設置される施設等のうち防潮堤よりも山側に設置される施設は、設計地下水位を地表面に設定する方針であり、防潮堤よりも海側に設置される施設は、耐震評価が保守的となるよう個別に設計地下水位を設定する方針であることを踏まえて、地下水位設定の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。（地下水位の設定方針に関する詳細は、別紙—10「設計地下水位の設定方針について」に示す。）



(a) 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合



(b) 評価対象構造物と隣接構造物の間が埋戻土で埋め戻されている場合

第 8-1-2 図 隣接構造物との位置関係の例

④ 地震波の伝播特性

- ・地震波の伝播特性は、周辺状況のうち評価対象構造物下部の岩盤等の周辺地質の状況により異なることから、観点③の整理を踏まえ、地震波の伝播特性に係る差異の有無により評価対象候補断面を整理する。

⑤ 床応答特性

- ・観点①～③の整理を踏まえ、床応答特性の差異の有無により評価対象候補断面を整理する。

(2) 評価対象断面の選定

(1)にて整理した評価対象候補断面を踏まえ、詳細設計段階において、以下に示す考えで評価対象断面を選定する。

⑥ 評価対象断面の選定

a. 構造的特徴による選定

横断方向の二次元地震応答解析により耐震評価を実施する構造物については、候補断面の部材厚や内空断面等の構造的特徴を比較し、他の候補断面より耐震評価上厳しくなることが想定される候補断面を評価対象断面として選定する。同一断面となる場合には、同一断面となる区間ごとに後述する他の観点で評価対象断面を選定する。

三次元モデルで耐震評価を実施する構造物については、地震時荷重を算出する二次元地震応答解析を実施する断面を構造的特徴を踏まえて選定する。

b. 周辺状況による選定

上載荷重、土被り厚、周辺地質、隣接構造物にて耐震評価上厳しくなる断面を選定する。

同一構造で延長方向に設置深さが異なる線状構造物は、上載荷重が最大となる断面や土被り厚が最大となる断面を評価対象断面として選定する。

評価対象候補断面の中で、隣接構造物との位置関係により土圧が作用しない断面と、周辺地質が埋戻土となる断面がある場合のように、構造物に作用する土圧が大きく評価される候補断面が明確な場合には、その候補断面を評価対象断面として選定する。

⑦ 評価対象断面の絞り込み

- ・⑥においてそれぞれの観点から評価対象断面が複数抽出される場合、地震応答解析を実施して評価対象断面の絞り込みを行う場合もある。

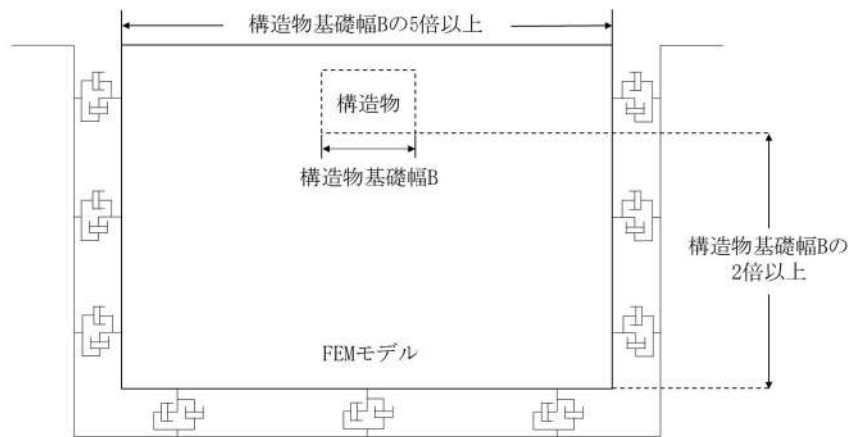
⑧ 床応答算出断面の選定

- ・耐震評価上の観点以外に機器・配管系の応答加速度及び応答変位の観点から、床応答算出用の断面を評価対象断面に選定する。

評価対象断面のモデル化範囲（二次元 FEM 解析モデル）については、以下に考え方を示す。

二次元 FEM による地震応答解析モデルの範囲は地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。具体的には、「原子力耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」を適用し、モデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、地盤モデルの入力基盤深さを構造物下端から構造物基礎幅の 2 倍以上確保する。

二次元 FEM におけるモデル化範囲の考え方を第 8-1-3 図に示す。



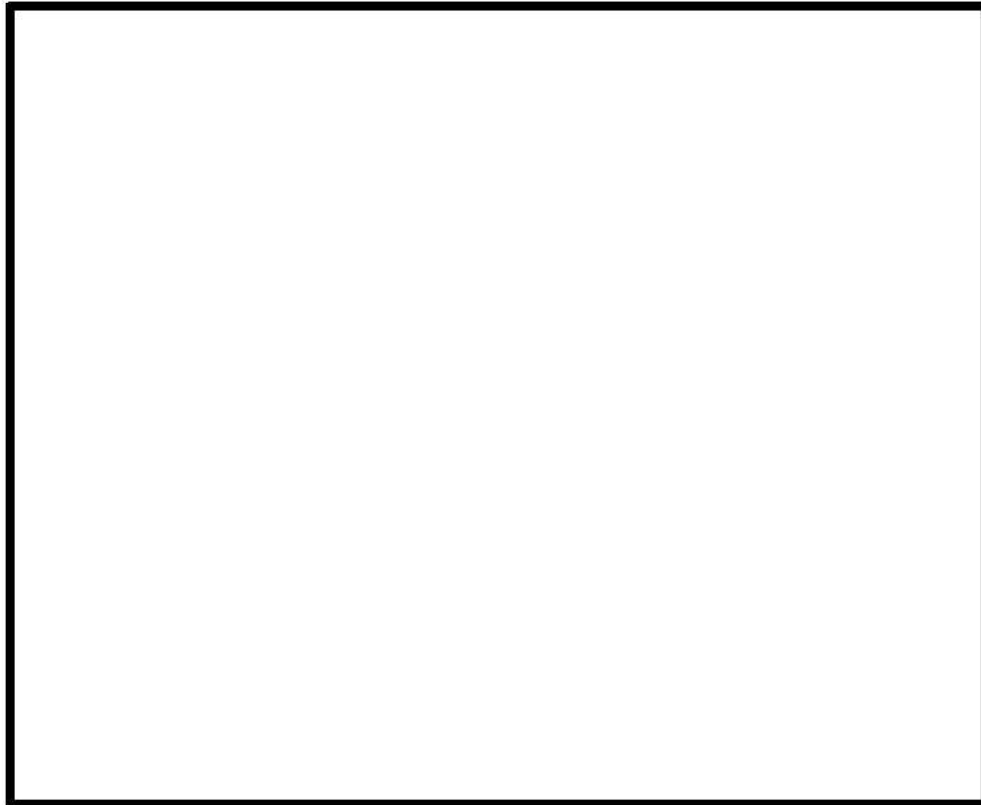
第 8-1-3 図 二次元 FEM におけるモデル化範囲の考え方

2. 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方


2.1 各施設の配置

本章では屋外重要土木構造物等である，取水口，取水路，取水ピットスクリーン室，取水ピットポンプ室，原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレナ室，原子炉補機冷却海水管ダクト，B1，B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチの断面選定の考え方を示す。

第 8-2-1-1 図に屋外重要土木構造物等の平面配置図を示す。



第 8-2-1-1 図 屋外重要土木構造物等の平面配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

2.2 取水口

取水口の配置図を第 8-2-2-1 図に，平面図を第 8-2-2-2 図に，断面図を第 8-2-2-3 図～第 8-2-2-5 図に，地質断面図を第 8-2-2-6 図及び第 8-2-2-7 図にそれぞれ示す。

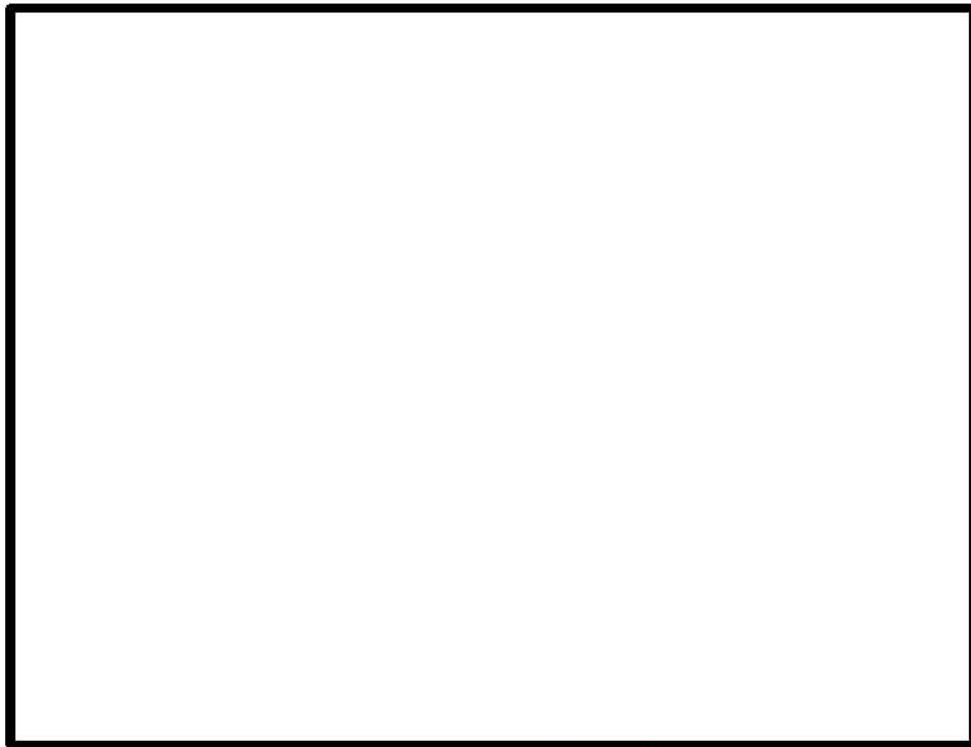
取水口は，非常用取水設備であり，通水機能，貯水機能並びに津波防護施設及び常設重大事故等対処設備である貯留堰の間接支持機能が要求される。

取水口は，延長 35.0m のコンクリート造の護岸コンクリートにより構成され，延長方向に断面の変化が少ない護岸構造物であり，上部には鉄筋コンクリート造の L 型擁壁が設置されている。


地下水位の設定については，取水口の滑動及び転倒評価が保守的となるように設定する。取水口背面の地下水位は，「港湾の施設の技術上の基準・同解説（上）（平成 19 年 7 月）」の残留水位^(注)の設定方法に基づき T.P. 0.55m とし，取水口前面の海水位は，最低潮位の T.P. -0.36m とする。

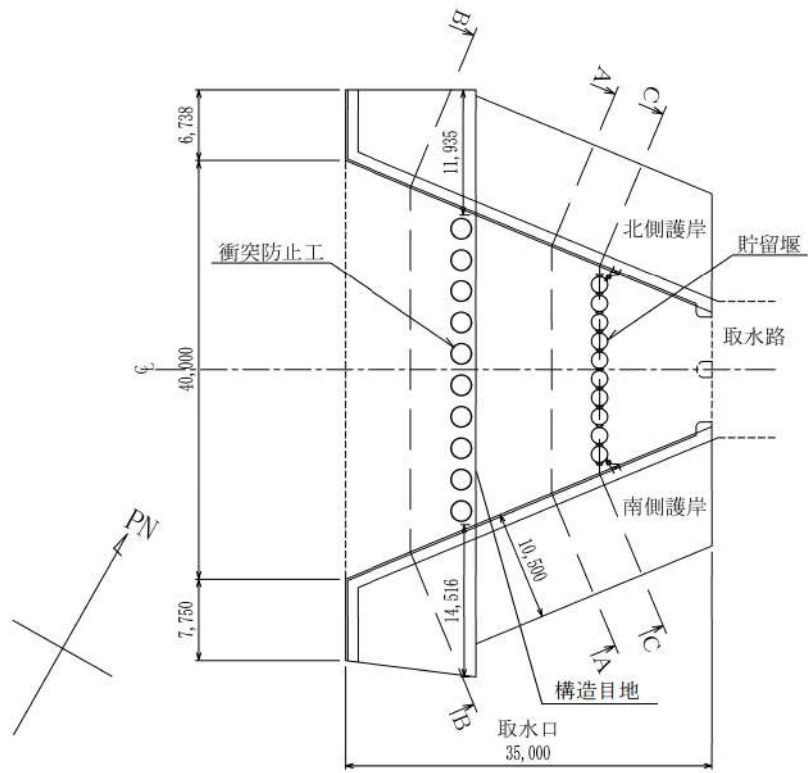
(注) 残留水位 = 最低潮位 + (最高潮位 - 最低潮位) × 2/3

$$= \text{T.P. } -0.36\text{m} + (\text{T.P. } 1.00\text{m} - \text{T.P. } -0.36\text{m}) \times 2/3 \approx \text{T.P. } 0.55\text{m}$$

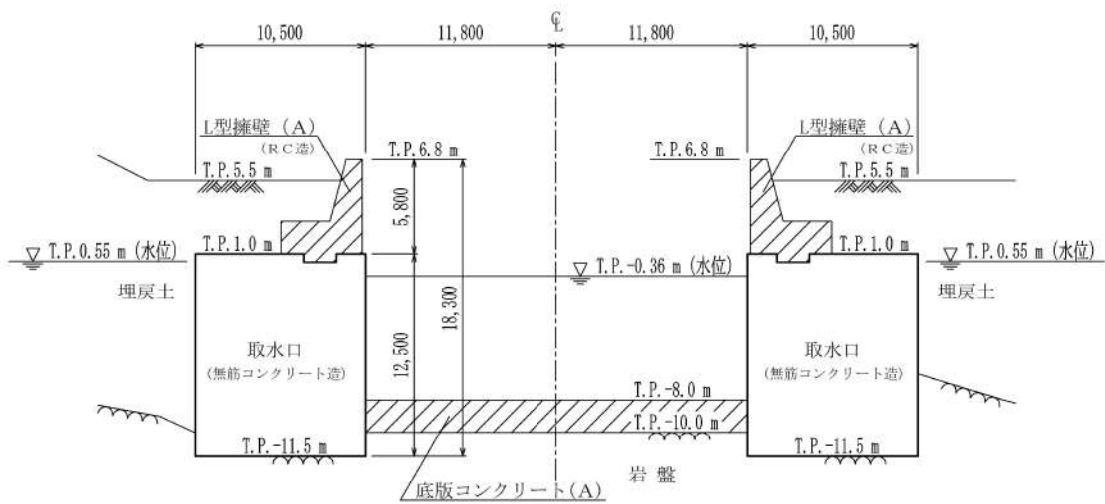


第 8-2-2-1 図 取水口 配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



第 8-2-2-2 図 取水口 平面図



第 8-2-2-3 図 取水口 断面図 (A-A 断面)

2.3 取水路

取水路の配置図を第8-2-3-1図に、平面図を第8-2-3-2図に、断面図を第8-2-3-3図～第8-2-3-9図に、地質断面図を第8-2-3-10図～第8-2-3-13図にそれぞれ示す。


取水路は、非常用取水設備であり、通水機能、貯水機能及び津波防護施設である防潮堤の間接支持機能が要求される。

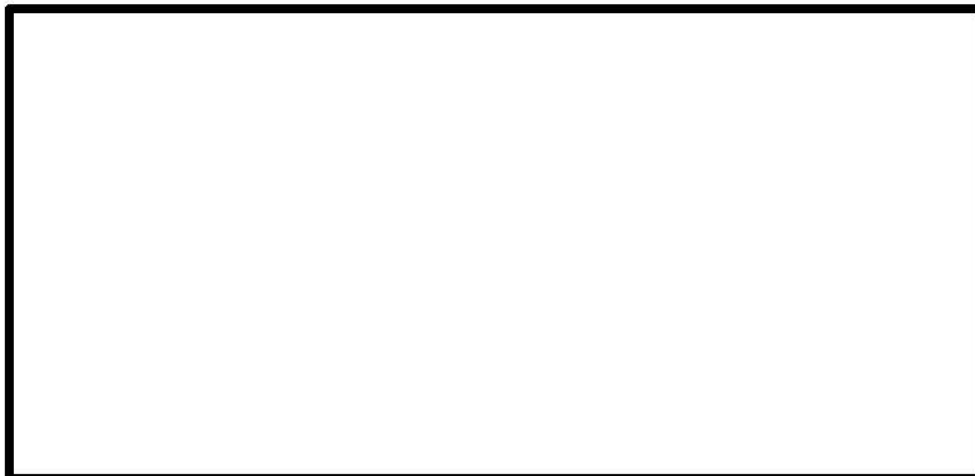
取水路は、延長約109.9mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、2連カルバートと高さ約13.1mの立坑が一体化している立坑部と、2連及び4連カルバート構造の蓋渠部により構成され、延長方向に断面の変化が小さい線状構造物であり、同一断面形状区間で一様な配筋となっている。

防潮堤より海側の範囲における地下水位の設定については、海水位による影響が支配的であると考えられることから、地下水位は海水面(T.P.0m)程度と想定されるが、耐震評価が保守的となるよう、朔望平均満潮位のT.P.0.26mとする。

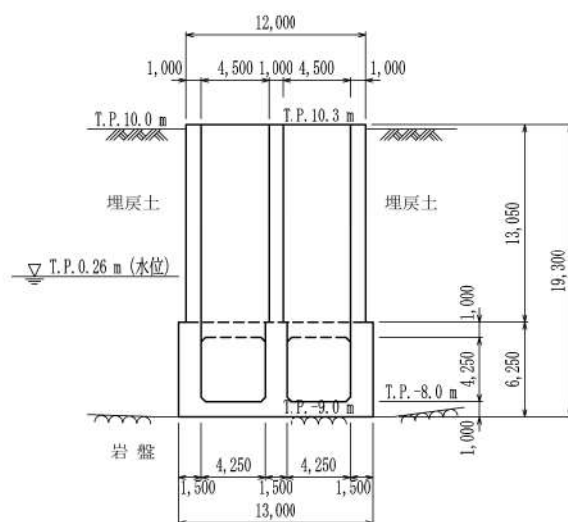


第8-2-3-1図 取水路 配置図

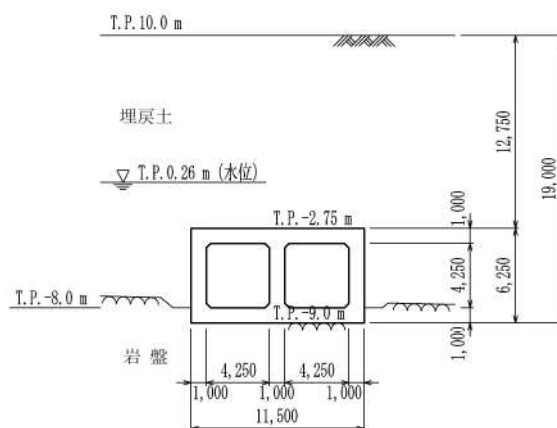
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



第 8-2-3-2 図 取水路 平面図



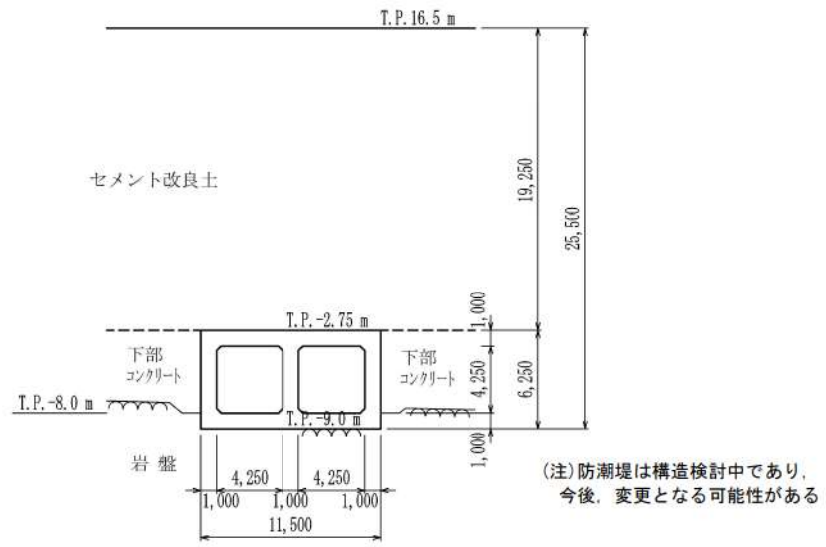
第 8-2-3-3 図 取水路 断面図 (A-A 断面)



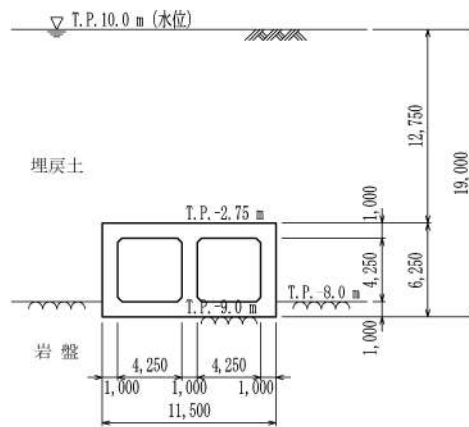
第 8-2-3-4 図 取水路 断面図 (B-B 断面)

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

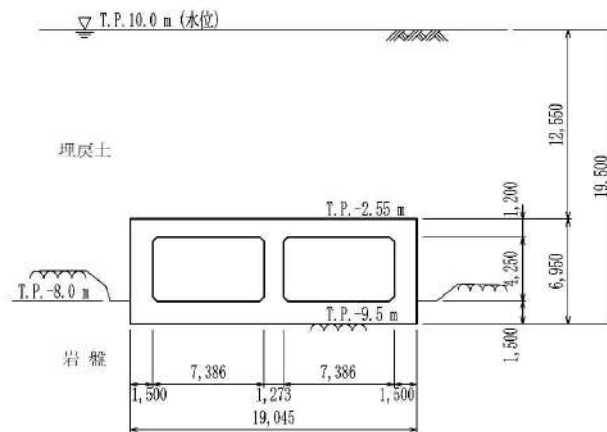
4 条-別紙 8-16



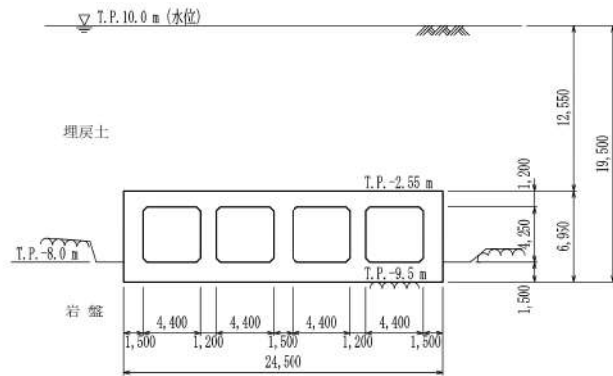
第 8-2-3-5 図 取水路 断面図 (C-C 断面)



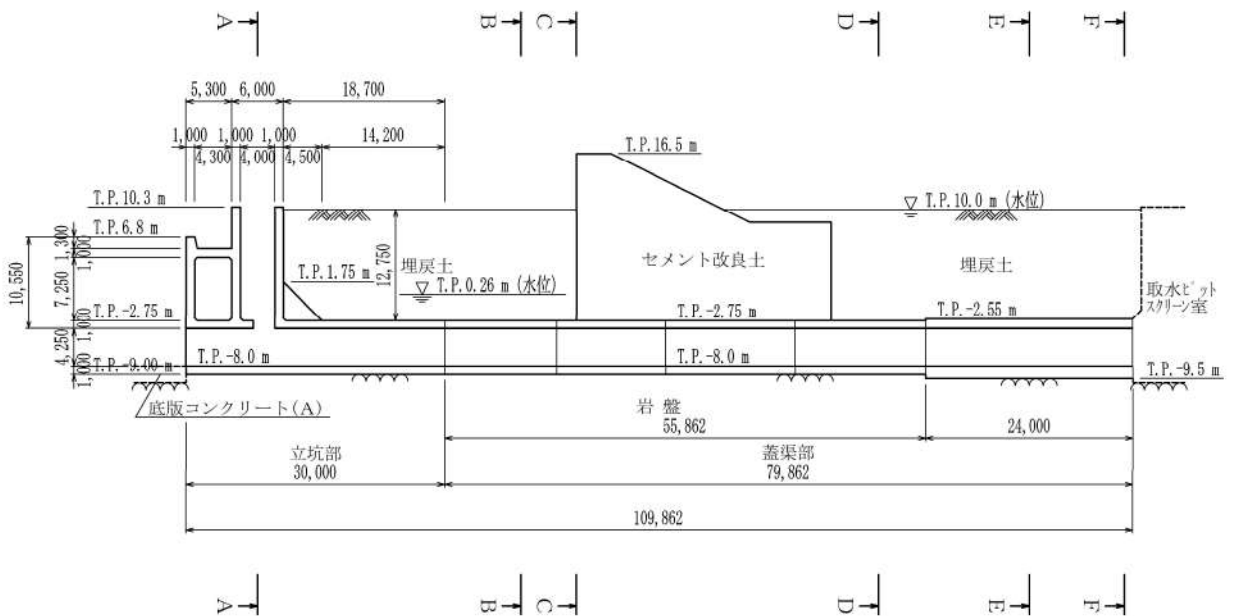
第 8-2-3-6 図 取水路 断面図 (D-D 断面)



第 8-2-3-7 図 取水路 断面図 (E-E 断面)

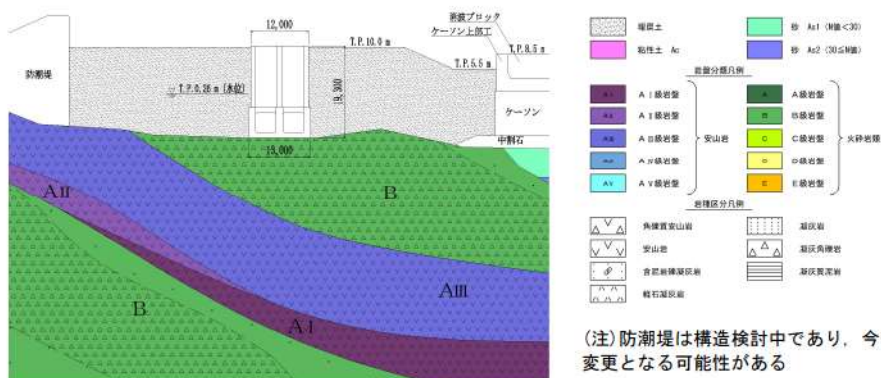


第 8-2-3-8 図 取水路 断面図 (F-F 断面)



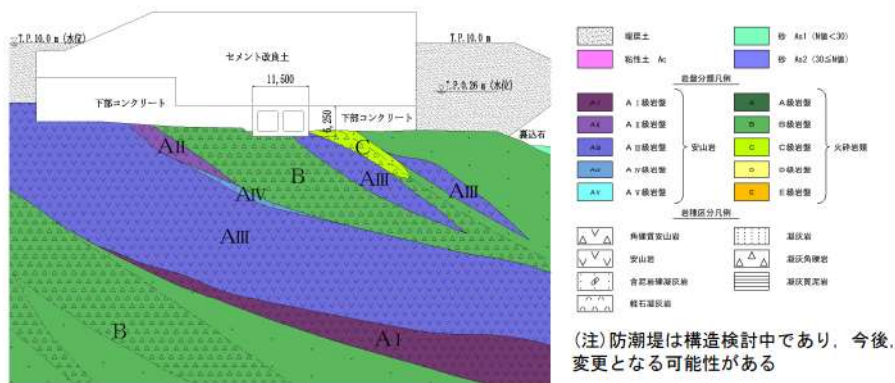
(注)防潮堤は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある

第 8-2-3-9 図 取水路 断面図 (縦断面)

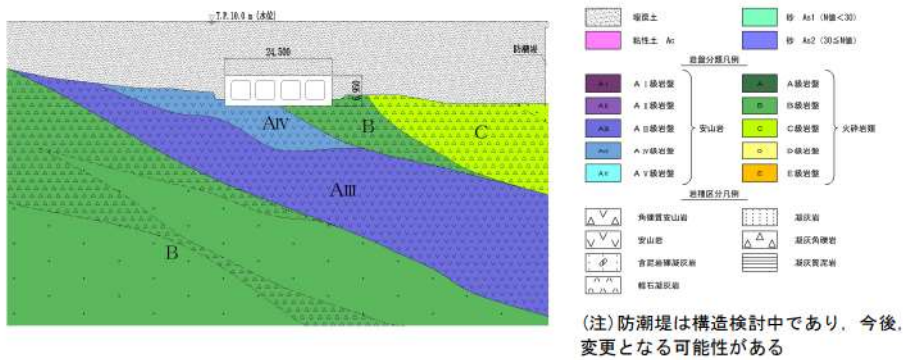


(注)防潮堤は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある

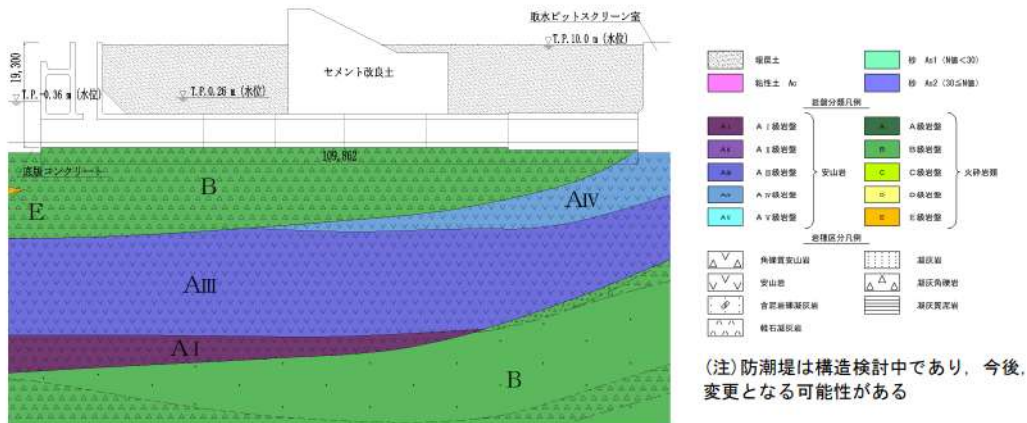
第 8-2-3-10 図 取水路 地質断面図 (A-A 断面)



第 8-2-3-11 図 取水路 地質断面図 (C-C 断面)



第 8-2-3-12 図 取水路 地質断面図 (F-F 断面)



第 8-2-3-13 図 取水路 地質断面図 (縦断面)

取水路について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第 8-2-3-1 表に示す。

第 8-2-3-1 表に示す整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

第8-2-3-1表 評価対象候補断面の整理 (取水路)

観点		取水路					
		A-A 断面	B-B 断面	C-C 断面	D-D 断面	E-E 断面	F-F 断面
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	・通水機能 ・貯水機能		・通水機能 ・貯水機能 ・間接支持機能	・通水機能 ・貯水機能		
	間接支持する 設備	・なし		・防潮堤	・なし		
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の ・2連のボックス カルバート ・上部に立坑が存 在する	・2連のボックスカルバート				・4連のボックス カルバート
	寸法	・幅 13.0m, 高さ 19.3m	・幅 11.5m, 高さ 6.25m		・幅 19.0m, 高さ 6.95m	・幅 24.5m, 高さ 6.95m	・A ₀ 級岩盤に直 接支持されてい る
③周辺状況	周辺地質	・B級岩盤に直接支持されている		・構造物側部に 下部コンクリ ートが分布してい る	・構造物側部に埋戻土が分布している		
	所層交差部	・なし					
④地震波の伝播特性	土被厚 上載荷重	—	・土被厚 12.75m	・防潮堤が上載し ている	・土被厚 12.75m	・土被厚 12.55m	
	地下水位		・朝望平均満潮位 T.P. 0.26m	・土被厚 19.25m			
⑤床応答特性	モデル化する 隣接構造物		・防潮堤	・地表面 T.P. 10.00m			
	④地震波の伝播特性	・観点③での整理のとおり、周辺状況が各断面で異なり、地震波の伝播特性が異なる					
⑤床応答特性		・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる					

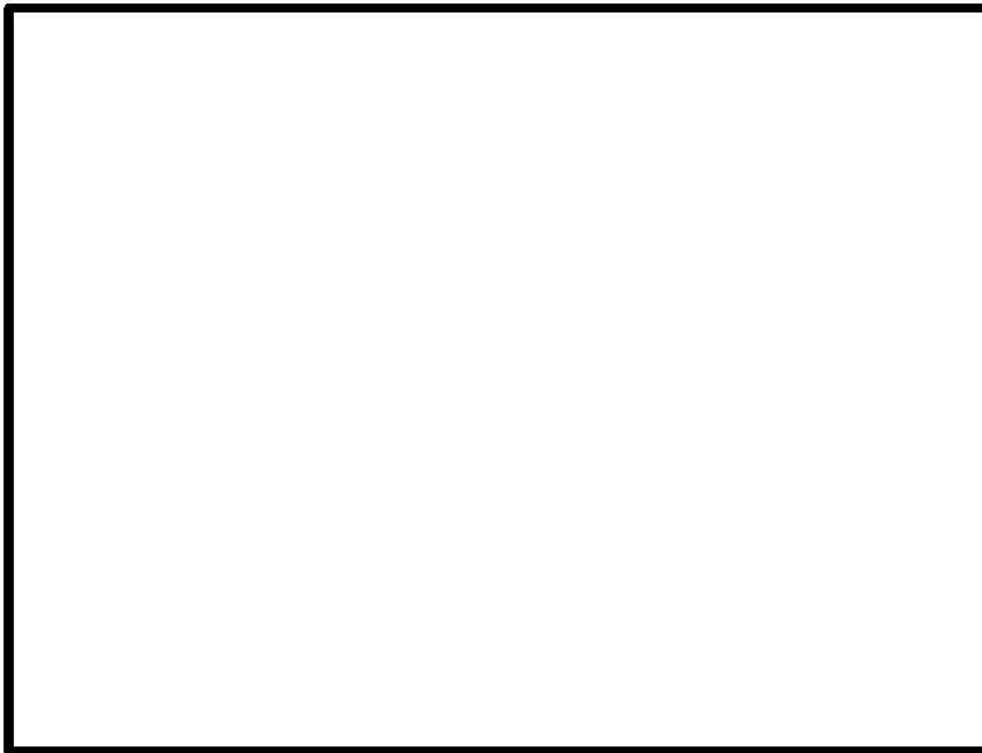
2.4 原子炉補機冷却海水管ダクト

原子炉補機冷却海水管ダクトの配置図を第8-2-4-1図に、平面図を第8-2-4-2図に、断面図を第8-2-4-3図～第8-2-4-8図に、地質断面図を第8-2-4-9図～第8-2-4-12図にそれぞれ示す。

原子炉補機冷却海水管ダクトは、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である原子炉補機冷却海水設備配管の間接支持機能が要求される。

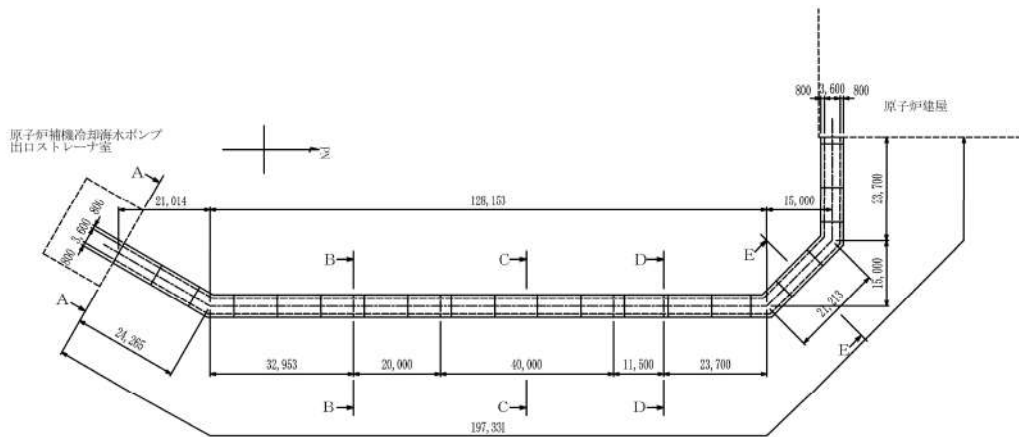
原子炉補機冷却海水管ダクトは、延長約197.3m、幅5.2m、高さ4.8mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、埋設深さによって最深部、中間部及び最浅部に区分され、延長方向に断面の変化がない線状構造物である。

配筋については、第8-2-4-8図に示すとおり、埋設深さごとに異なる構造となっている。

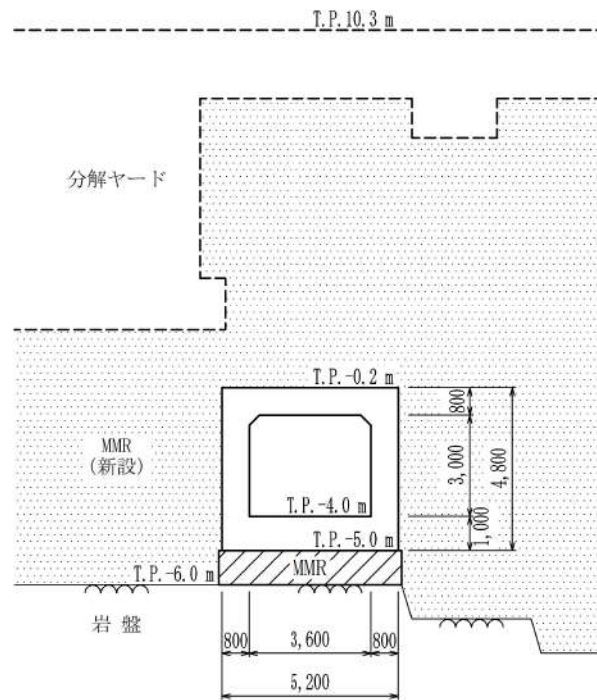


第8-2-4-1図 原子炉補機冷却海水管ダクト 配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

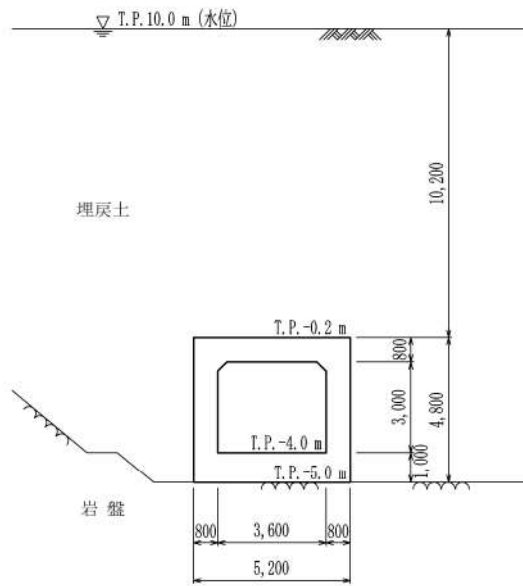


第 8-2-4-2 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 平面図

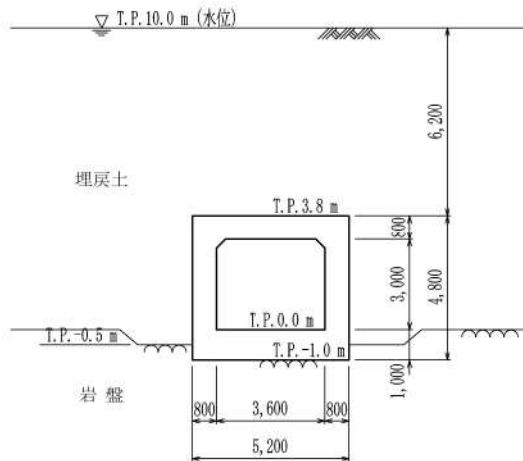


(注) MMR (新設) は検討中であり、今後、構造や範囲等が変更となる可能性がある

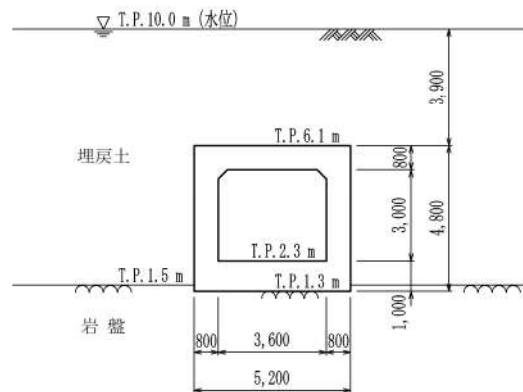
第 8-2-4-3 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 断面図 (A-A 断面)



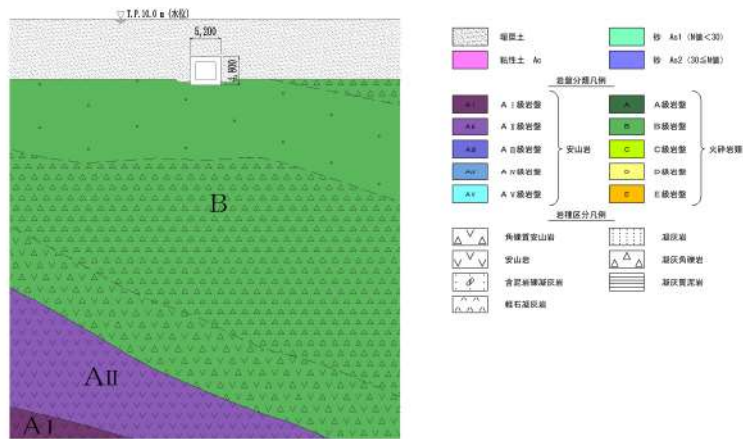
第 8-2-4-4 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 断面図 (B-B 断面)



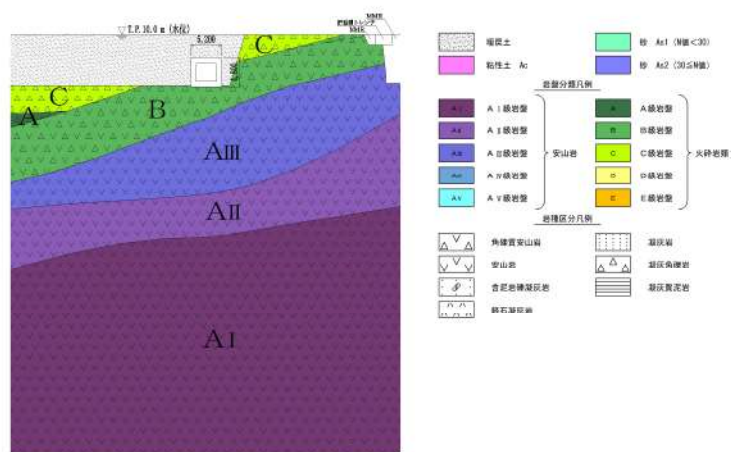
第 8-2-4-5 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 断面図 (C-C 断面)



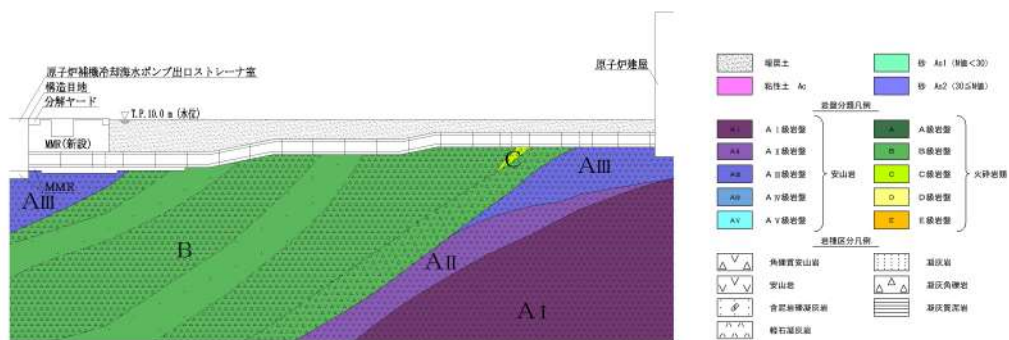
第 8-2-4-6 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 断面図 (D-D 断面)



第 8-2-4-10 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 地質断面図（中間部：C-C 断面）



第 8-2-4-11 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 地質断面図（最浅部：E-E 断面）



(注) MMR（新設）は検討中であり、今後、構造や範囲等が変更となる可能性がある

第 8-2-4-12 図 原子炉補機冷却海水管ダクト 地質断面図（縦断面）

原子炉補機冷却海水管ダクトについて、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第 8-2-4-1 表に示す。

第 8-2-4-1 表 評価対象候補断面の整理 (原子炉補機冷却海水管ダクト)

観点		原子炉補機冷却海水管ダクト				
		最深部		中間部	最浅部	
		A-A 断面	B-B 断面	C-C 断面	D-D 断面	E-E 断面
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	・間接支持機能				
	間接支持する 設備	・原子炉補機冷却海水設備配管				
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・ボックスカルバート				
	寸法	・幅 5.2m, 高さ 4.8m				
③周辺状況	周辺地質	・MMR を介して A _m 級岩盤に支持されている ・下方には A _m 級岩盤に加え B 級岩盤が厚く堆積している	・ B 級岩盤に直接支持されている ・下方には B 級岩盤が厚く堆積している	・ B 級岩盤に直接支持されている ・下方には A ₁ ~ A _m 級岩盤が厚く堆積している	・ B 級岩盤に直接支持されている ・下方には A ₁ ~ A _m 級岩盤が厚く堆積している ・北側に岩盤斜面が存在する	
		・構造物側部に MMR が分布している	・構造物側部に埋戻土が分布している			
	断層交差部	・なし				
	土被厚 上載荷重	・土被厚 10.2m		・土被厚 6.2m	・土被厚 3.9m	
	地下水位	・地表面 T. P. 10.00m				
	モデル化する 隣接構造物	・なし				
	④地震波の伝播特性	・観点③での整理のとおり、各断面で周辺状況に差異があり、地震波の伝播特性が異なる				
⑤床応答特性	・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備及び構造的特徴に差異はないが、周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる					

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

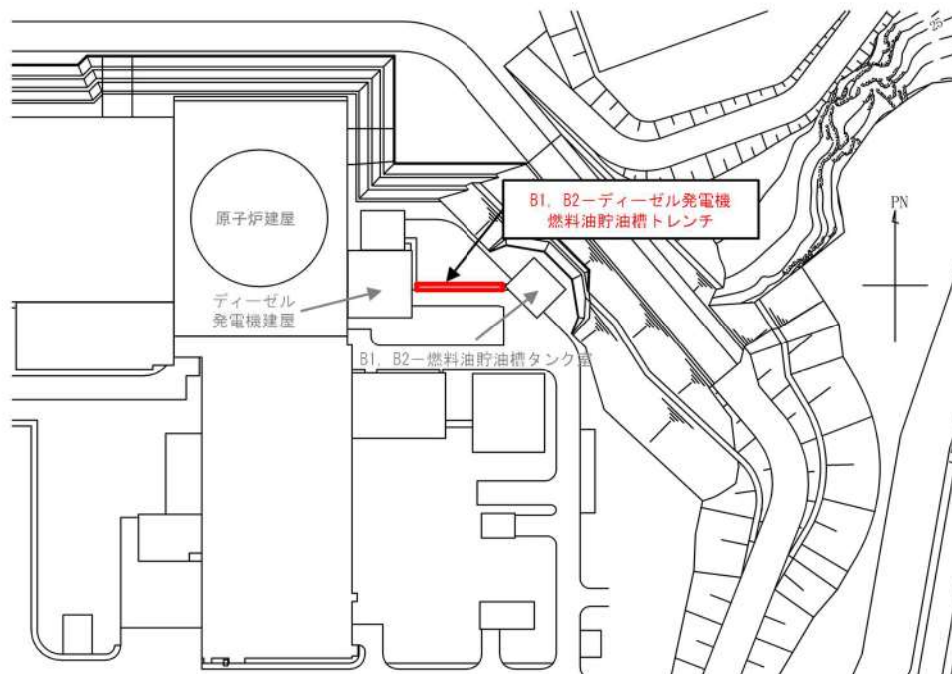
2.5 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ

B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチの配置図を第8-2-5-1図に、平面図を第8-2-5-2図に、断面図を第8-2-5-3図～第8-2-5-6図に、地質断面図を第8-2-5-7図及び第8-2-5-8図にそれぞれ示す。

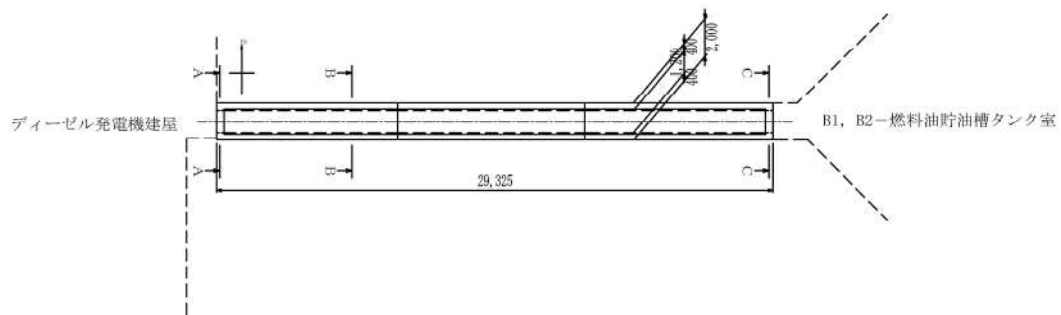
B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチは、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備であるディーゼル発電機燃料油移送配管の間接支持機能が要求される。

B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチは、延長約29.3m、幅2.0m、高さ1.75mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、延長方向に断面の変化が小さい線状構造物である。

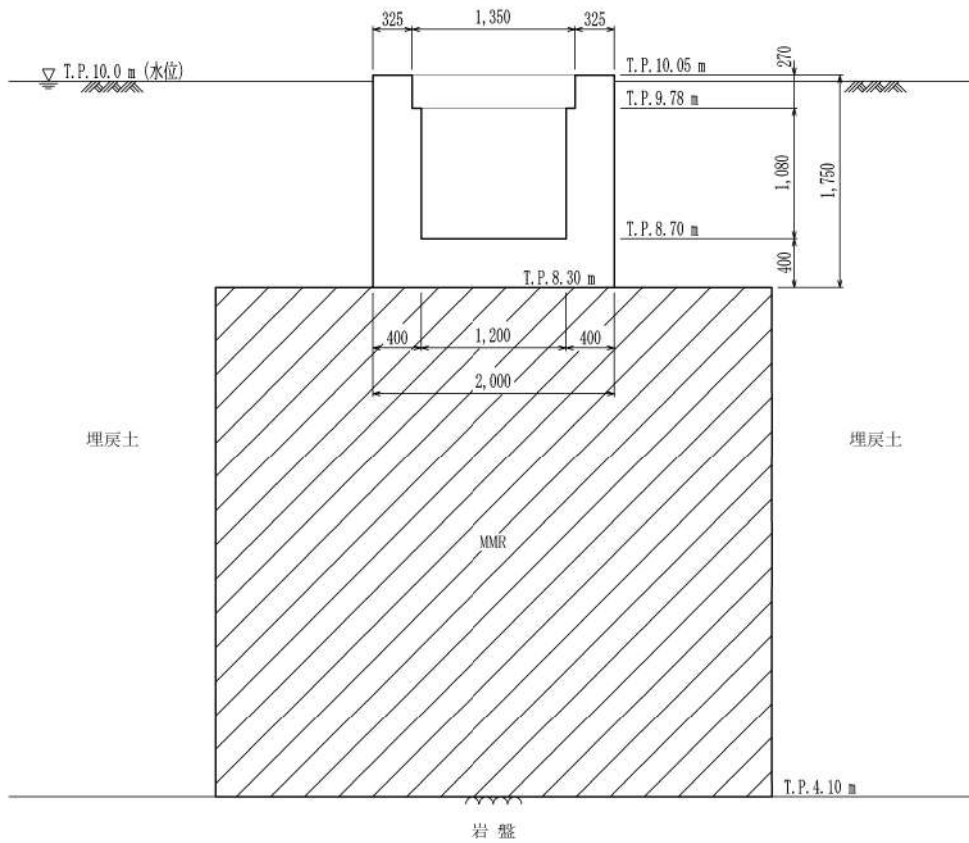
配筋については、延長方向に一様な構造となっている。



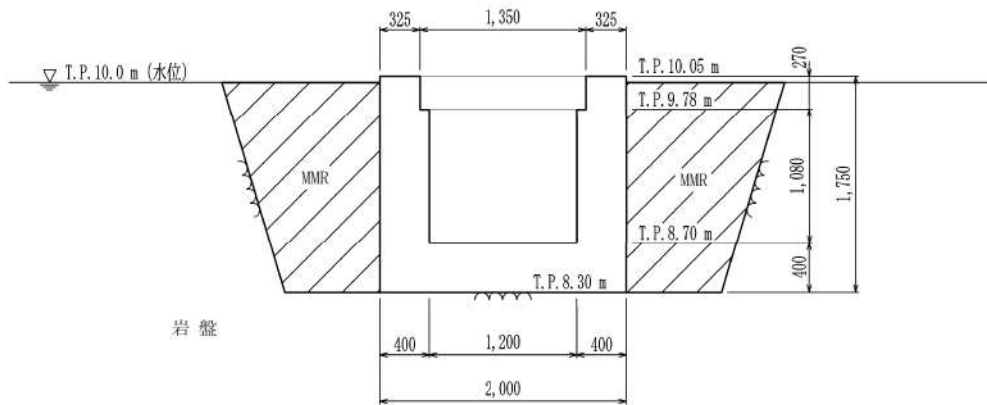
第8-2-5-1図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 配置図



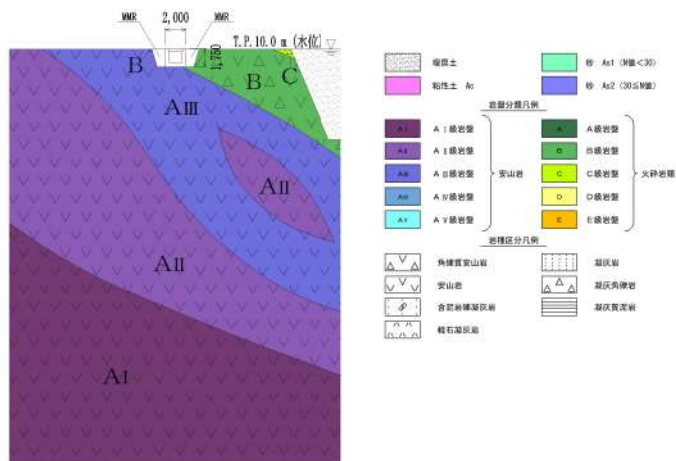
第8-2-5-2図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 平面図



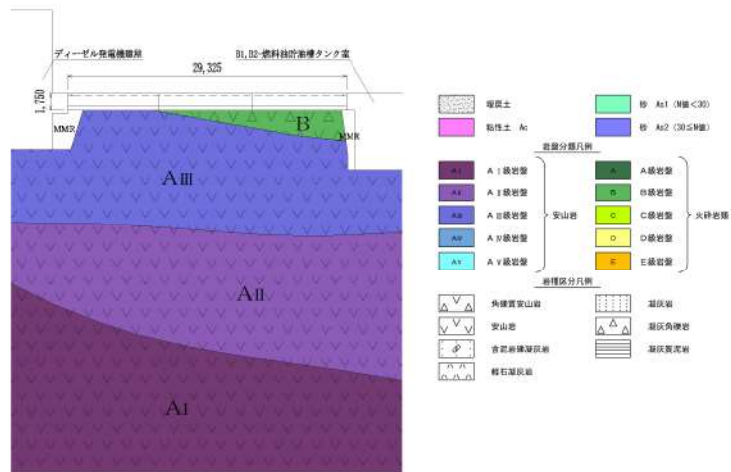
第 8-2-5-3 図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 断面図 (A-A 断面)



第 8-2-5-4 図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 断面図 (B-B 断面)



第 8-2-5-7 図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 地質断面図 (B-B 断面)



第 8-2-5-8 図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ 地質断面図 (縦断面)

B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチについて、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第 8-2-5-1 表に示す。

第 8-2-5-1 表 評価対象候補断面の整理 (B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ)

観点		B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ		
		A-A 断面	B-B 断面	C-C 断面
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	・間接支持機能		
	間接支持する 設備	・ディーゼル発電機燃料油移送配管		
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・U型カルバート		
	寸法	・幅 2.0m, 高さ 1.75m		
③周辺状況	周辺地質	・MMR を介して A _m 級岩盤に支持 されている	・ B 級岩盤に直接支持されてい る	・ MMR を介して B 級岩盤に支持 されている
		・構造物側部に埋戻土が分布し ている	・構造物側部に MMR が分布している	
	断層交差部	・なし		
	土被厚 上載荷重	・なし		
	地下水位	・地表面 T.P. 10.00m		
モデル化する 隣接構造物	・なし			
④地震波の伝播特性		・観点③での整理のとおり, 各断面で周辺状況に差異があり, 地震波の伝播特性が異なる		
⑤床応答特性		・観点①～③での整理のとおり, 間接支持する設備及び構造的特徴に差異はないが, 周辺状況に差異があることから, 各断面の床応答特性が異なる		

以上の整理を踏まえ、詳細設計段階において、地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を評価対象断面として選定する。

2.6 取水ピットスクリーン室

取水ピットスクリーン室の配置図を第8-2-6-1図に、平面図を第8-2-6-2図に、断面図を第8-2-6-3図～第8-2-6-6図に、地質断面図を第8-2-6-7図及び第8-2-6-8図にそれぞれ示す。

取水ピットスクリーン室は、非常用取水設備としての通水機能、貯水機能及び津波防護施設である3号炉取水ピットスクリーン室防水壁等の間接支持機能が要求される。

取水ピットスクリーン室は、延長23.0m、幅25.5m、高さ20.3m～22.9mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、延長方向（通水方向）に断面の変化が小さい箱型構造物である。


配筋については、延長方向に一樣な構造となっている。

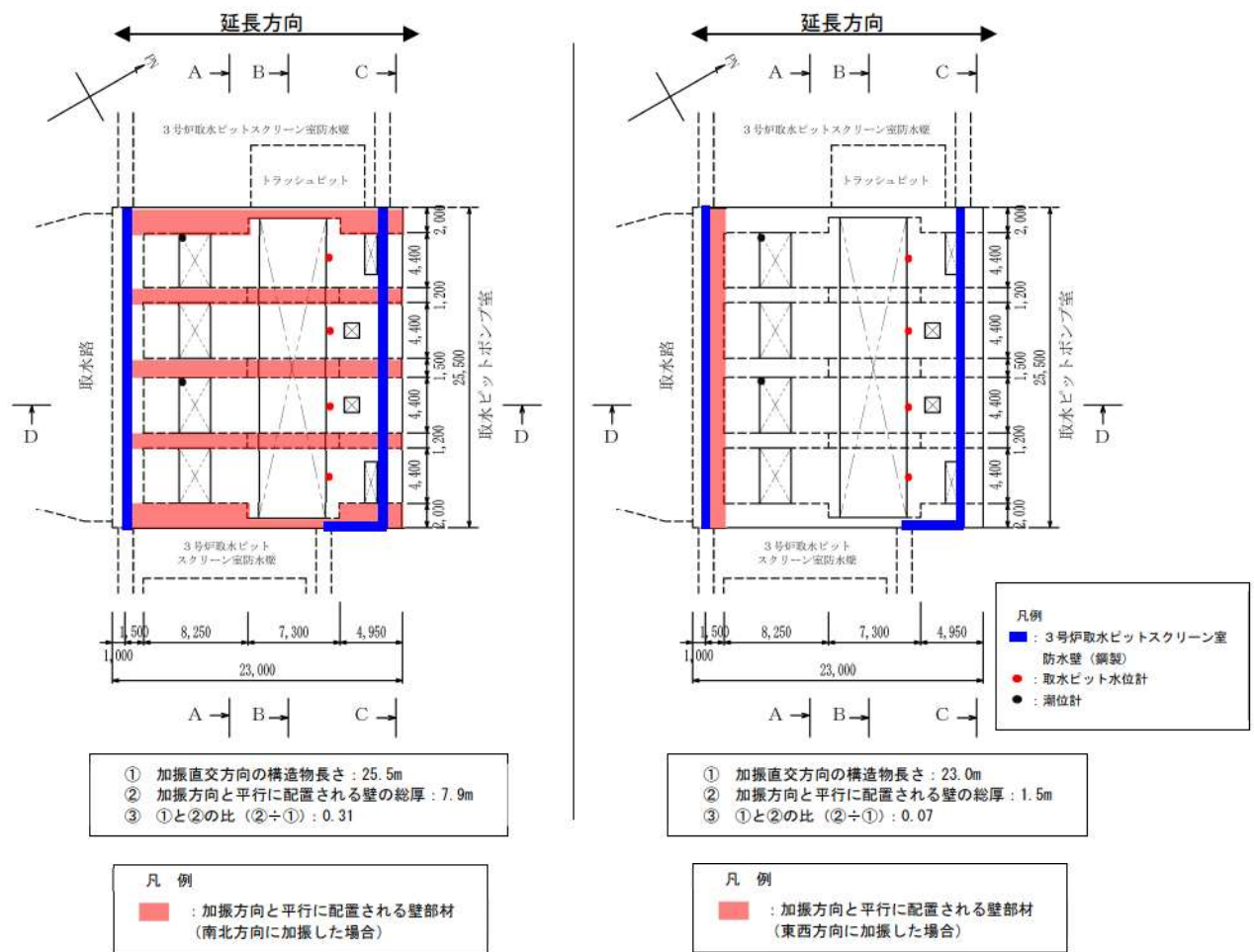
取水ピットスクリーン室は、第8-2-6-2図に示すとおり、東西方向に加振した場合に加振直交方向の構造物長さと同様に配置される壁の総厚の比が小さくなるため、東西方向が弱軸となり、南北方向が強軸となる。

取水ピットスクリーン室は、構造物南面に妻壁を有するものの、ほぼ同一の断面が延長方向に連続しており、三次元的な応答の影響は小さい。また、土圧等の外力に対して側壁と妻壁で負担する構造であり、弱軸方向加振に対しては、側壁よりも妻壁の方が外力を多く負担するが、妻壁を考慮せずに評価することで、取水ピットスクリーン室の側壁に作用する外力を多く見込んだ設計となり保守的な評価となる。よって、妻壁を耐震部材として見込まず、弱軸方向の二次元地震応答解析により耐震評価を実施する。また、強軸方向についても、妻壁に3号炉取水ピットスクリーン室防水壁を設置する方針であり、間接支持機能に対する確認として妻壁の耐震評価を実施すること、及び間接支持する機器・配管の応答影響を評価する必要があることから、二次元地震応答解析を実施する。



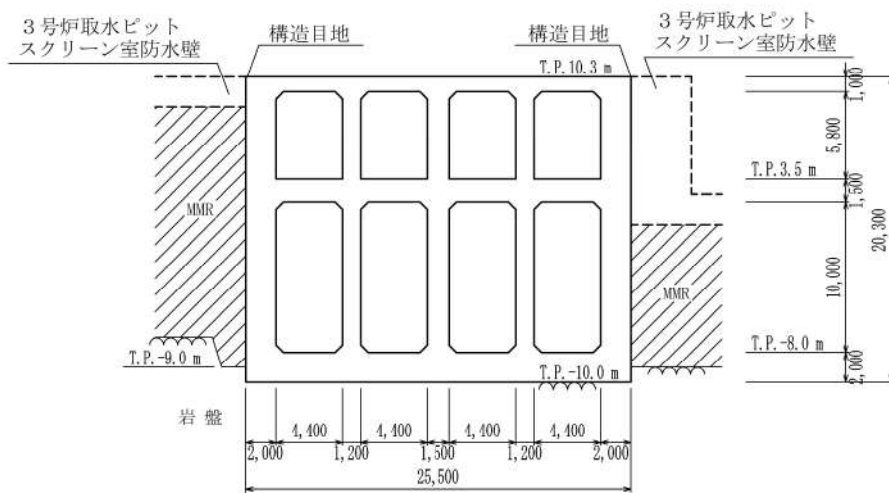
第8-2-6-1図 取水ピットスクリーン室 配置図

 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



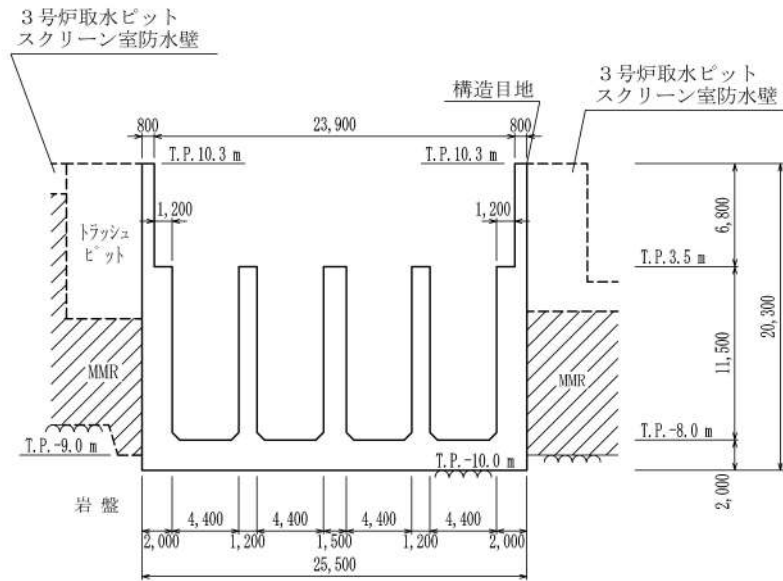
(注)トラッシュピットについては、3号炉取水ピットスクリーン室防水壁の構造に伴い撤去する予定である

第8-2-6-2図 取水ピットスクリーン室 平面図



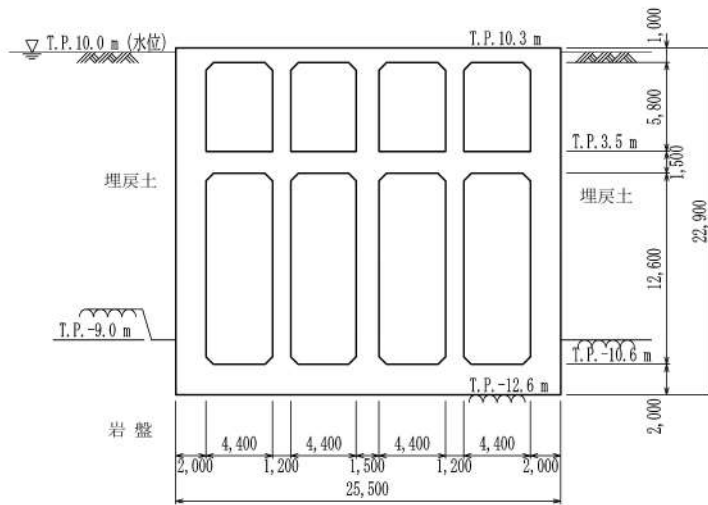
(注)3号炉取水ピットスクリーン室防水壁は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある

第8-2-6-3図 取水ピットスクリーン室 断面図 (A-A 断面)



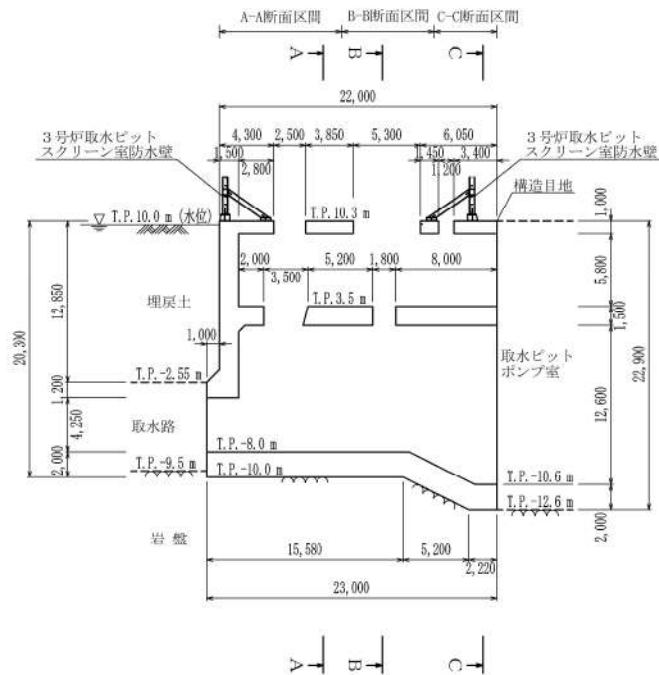
(注) 3号炉取水ピットスクリーン室防水壁は構造検討中であり、今後、変更となる可能性がある
(注) トラッシュピットについては、3号炉取水ピットスクリーン室防水壁の構築に伴い撤去する予定である

第 8-2-6-4 図 取水ピットスクリーン室 断面図 (B-B 断面)

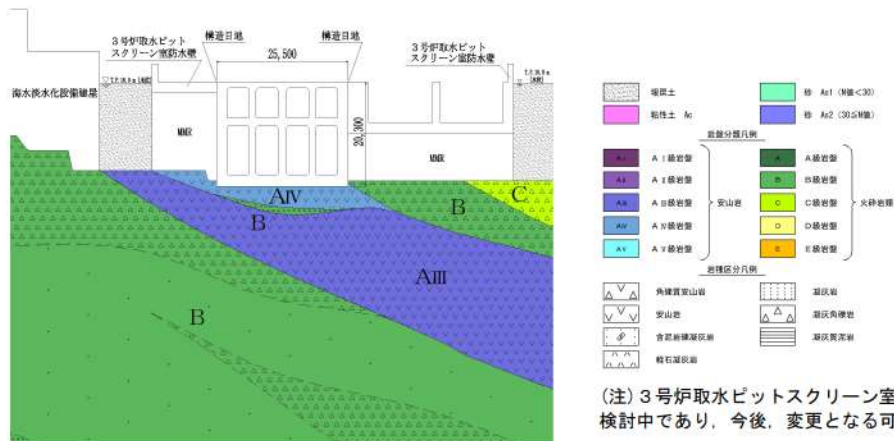


(注) 3号炉取水ピットスクリーン室防水壁は構造検討中であり、今後、周辺地質状況が変更となる可能性がある

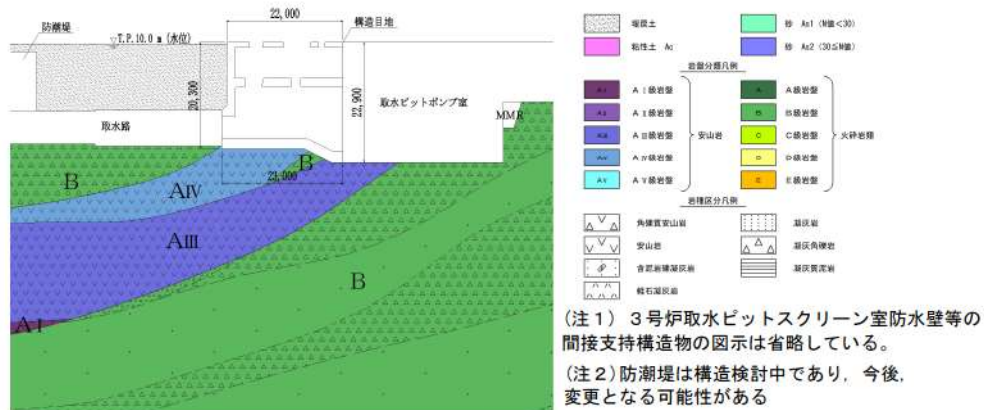
第 8-2-6-5 図 取水ピットスクリーン室 断面図 (C-C 断面)



第 8-2-6-6 図 取水ピットスクリーン室 断面図 (D-D 断面)



第 8-2-6-7 図 取水ピットスクリーン室 地質断面図 (A-A 断面)



第 8-2-6-8 図 取水ピットスクリーン室 地質断面図 (D-D 断面)

取水ピットスクリーン室について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第8-2-6-1表に示す。

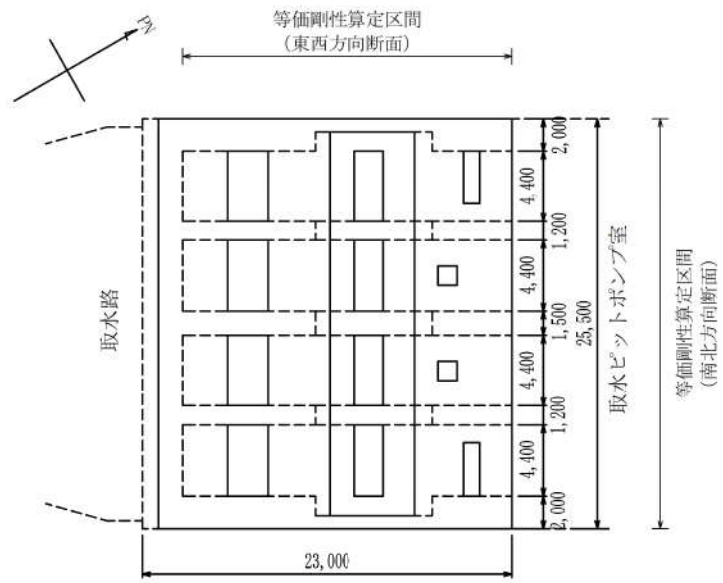
第8-2-6-1表 評価対象候補断面の整理（取水ピットスクリーン室）

観点		取水ピットスクリーン室			
		東西方向（弱軸方向）			南北方向（強軸方向）
		A-A断面	B-B断面	C-C断面	D-D断面
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	<ul style="list-style-type: none"> ・通水機能 ・貯水機能 ・間接支持機能 			
	間接支持する 設備	<ul style="list-style-type: none"> ・潮位計 ・取水ピット水位計 ・3号炉取水ピットスクリーン室防水壁 			
②構造的特徴	形式	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・上部のスクリーン室及び下部の4連のボックスカルバートにより構成される 			
	寸法	幅 25.5m, 高さ 20.3m	頂版及び中床版に開口が存在する	幅 25.5m, 高さ 22.9m	頂版及び中床版に開口が存在する 幅 23.0m, 高さ 20.3～22.9m
③周辺状況	周辺地質	<ul style="list-style-type: none"> ・A_N級岩盤に直接支持されている ・構造物側部にMMRが分布している 		<ul style="list-style-type: none"> ・A_M級岩盤に直接支持されている ・構造物側部に埋戻土が分布している 	<ul style="list-style-type: none"> ・A_M級, A_N級及びB_N級岩盤に直接支持されている ・構造物南面に埋戻土が分布している
	断層交差部	なし			
	土被厚 上載荷重	なし			
	地下水位	地表面 T.P. 10.00m			
	モデル化する 隣接構造物	<ul style="list-style-type: none"> ・防潮堤 ・3号炉取水ピットスクリーン室防水壁 		<ul style="list-style-type: none"> ・防潮堤 	<ul style="list-style-type: none"> ・取水ピットポンプ室 ・防潮堤
④地震波の伝播特性		観点③での整理のとおり、各断面で周辺状況に差異があり、地震波の伝播特性が異なる			
⑤床応答特性		観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備に差異はないが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる			

以上の整理を踏まえ、地震応答解析により耐震評価を行う上で、構造物の応答が耐震評価上厳しくなると考えられる断面を東西方向（弱軸方向）から評価対象断面として選定する。また、南北方向（強軸方向）についても、床応答特性の観点から床応答算出断面として評価対象断面を選定する。

東西方向は、おおむねA-A断面に示す構造が延長方向に連続する構造である。また、構造物側方の周辺地質はMMRが大部分を占めており、周辺状況についてもおおむね同様であることから、A-A断面を評価対象断面として選定する。二次元地震応答解析においては、頂版及び中床版に開口が存在しているため、第8-2-6-9図に示すとおり、延長方向全長に対して等価な剛性（各部材に対して開口分の剛性を低減させた剛性）を算定する。

南北方向は、構造物が軸心を中心とする対称性を有し、周辺状況の差異がないことから、構造物の中心を通る断面を評価対象断面に選定する。二次元地震応答解析においては、第8-2-6-9図に示すとおり、構造物幅に対して等価な剛性を算定する。



第 8-2-6-9 図 取水ピットスクリーン室 等価剛性算定区間

2.7 取水ピットポンプ室

取水ピットポンプ室の配置図を第8-2-7-1図に、平面図を第8-2-7-2図に、設置される浸水防止設備等の配置図を第8-2-7-3図に、断面図を第8-2-7-4図～第8-2-7-7図に、地質断面図を第8-2-7-8図～第8-2-7-11図にそれぞれ示す。

取水ピットポンプ室は、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である原子炉補機冷却海水ポンプ等の間接支持機能と、非常用取水設備としての通水機能及び貯水機能と、浸水防護重点化範囲の保持のため止水機能が要求される。

浸水防護重点化範囲を保持するために止水機能が求められる部位は、原子炉補機冷却海水ポンプが設置されるエリアの中床版（T.P. 2.5m）並びに妻壁及び中壁（T.P. 2.5m～T.P. 10.3m）である。

取水ピットポンプ室は、延長42.5m、幅25.5m、高さ11.3m～22.9mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、構造物の断面が延長方向（通水方向）で異なり、加振方向と平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱型構造物である。

配筋については、同一断面形状区間で一様な配筋となっている。

取水ピットポンプ室は、第8-2-7-2図に示すとおり、東西方向に加振した場合に加振直交方向の構造物長さと同様に配置される壁の総厚の比が小さくなるため、東西方向が弱軸となり、南北方向が強軸となる。

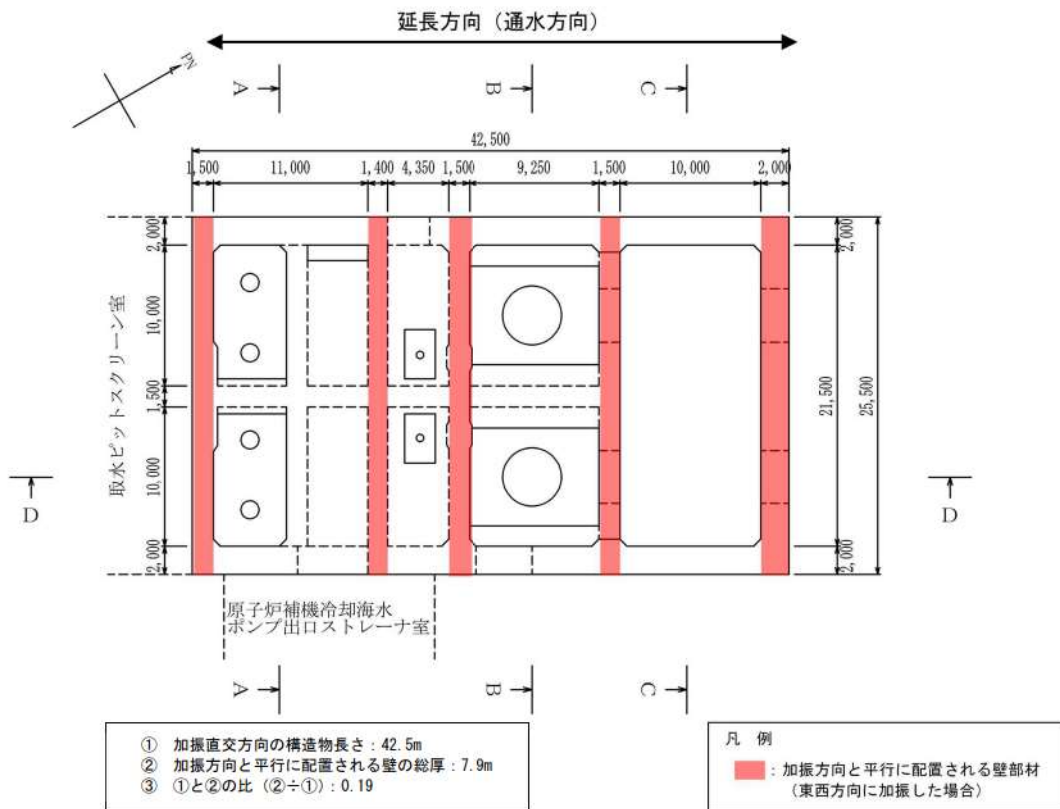
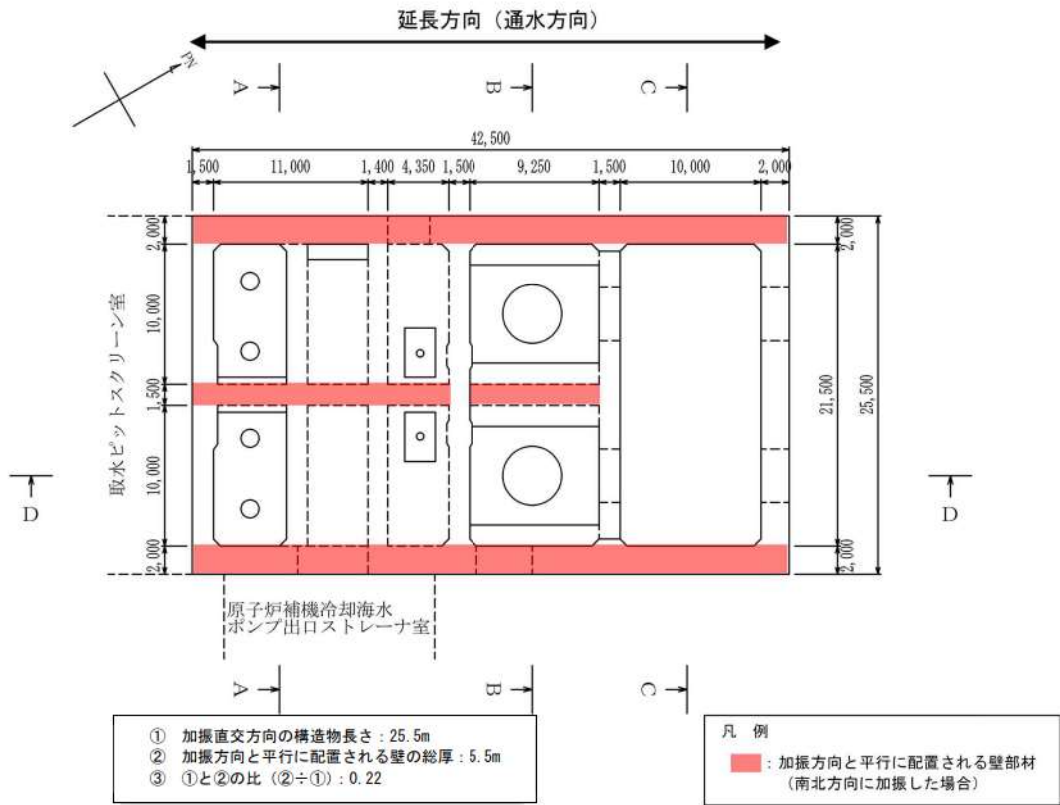
耐震評価に当たっては、加振方向と平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を耐震部材として考慮することとし、二次元地震応答解析により得られる土圧等の荷重を三次元モデルに作用させて耐震評価を行う。



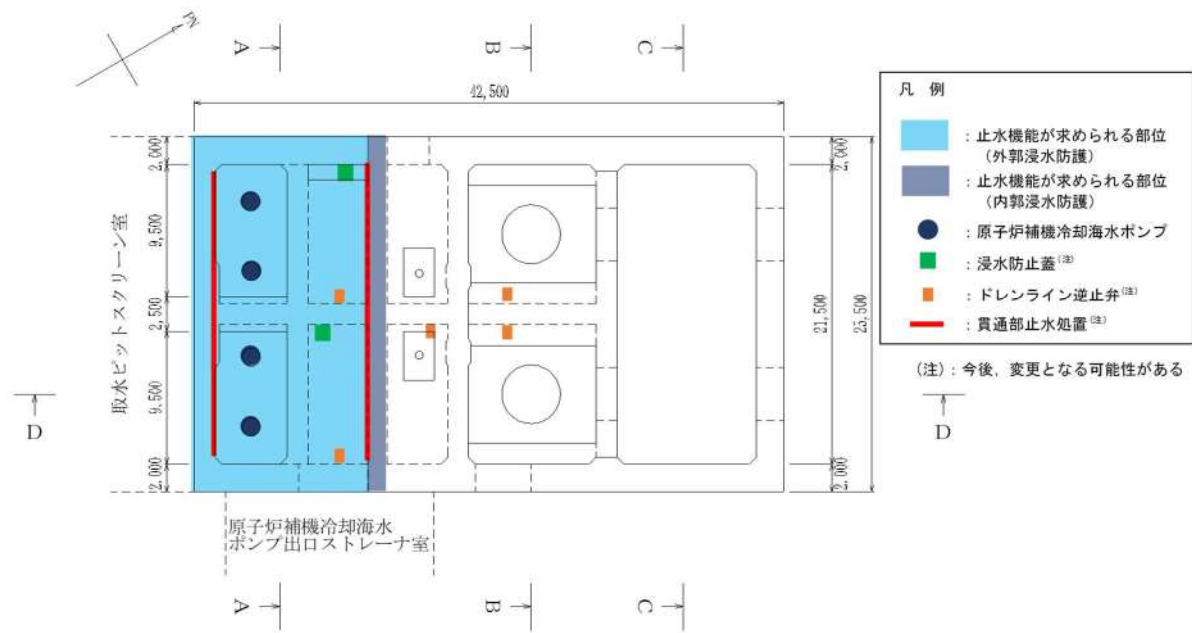
第8-2-7-1図 取水ピットポンプ室 配置図



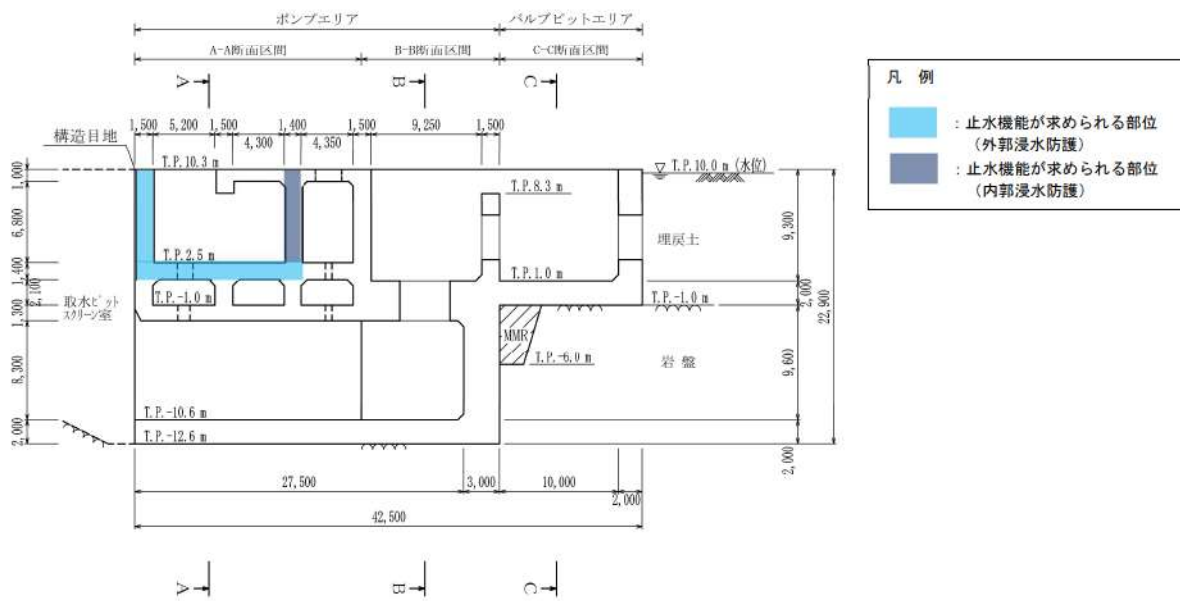
枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



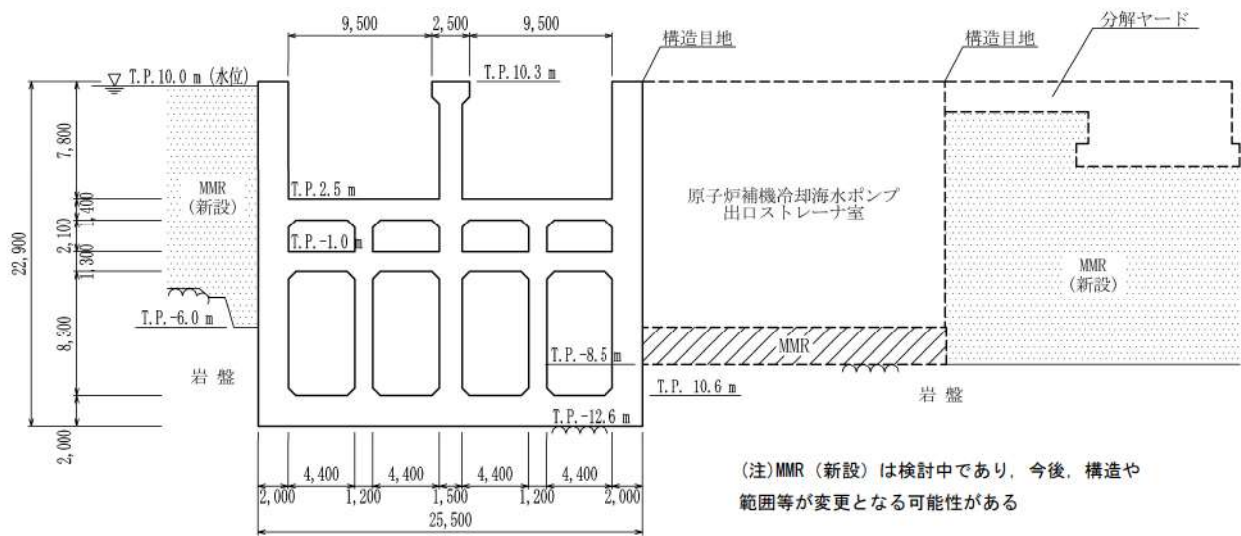
第8-2-7-2 図 取水ピットポンプ室 平面図



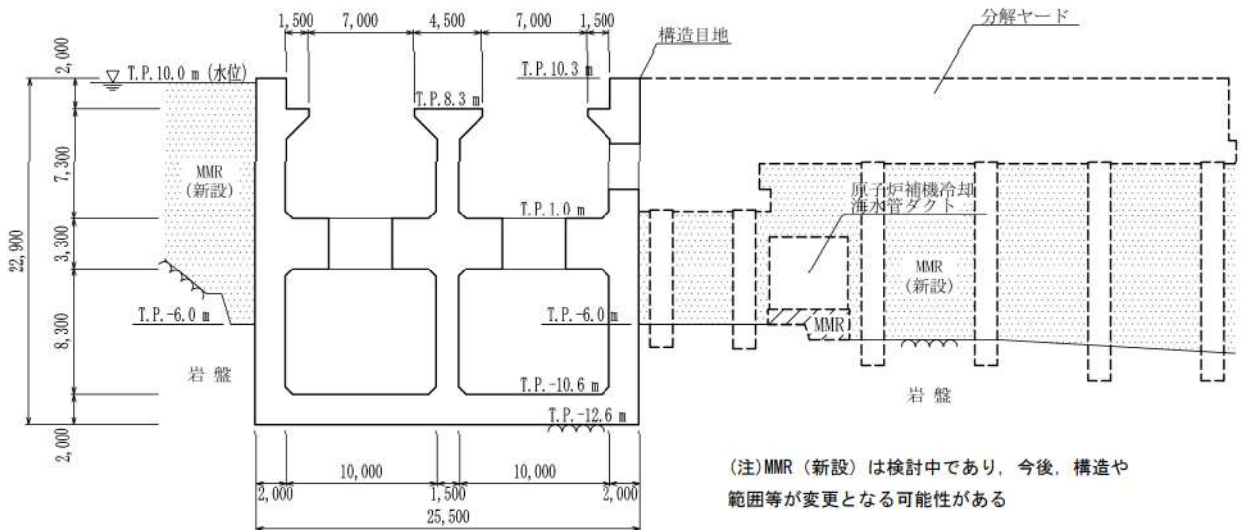
第8-2-7-3図 取水ピットポンプ室 設置される設備の配置図 (平面図)



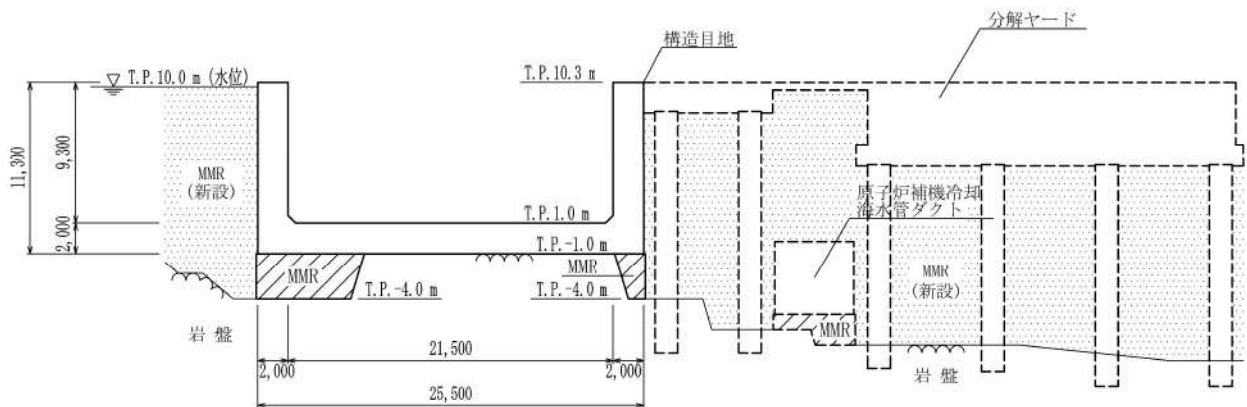
第8-2-7-4図 取水ピットポンプ室 断面図 (D-D 断面)



第 8-2-7-5 図 取水ピットポンプ室 断面図 (A-A 断面)

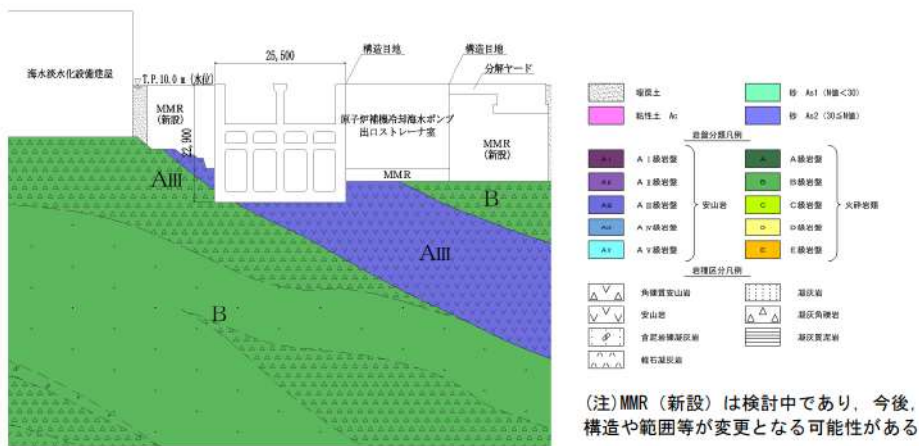


第 8-2-7-6 図 取水ピットポンプ室 断面図 (B-B 断面)

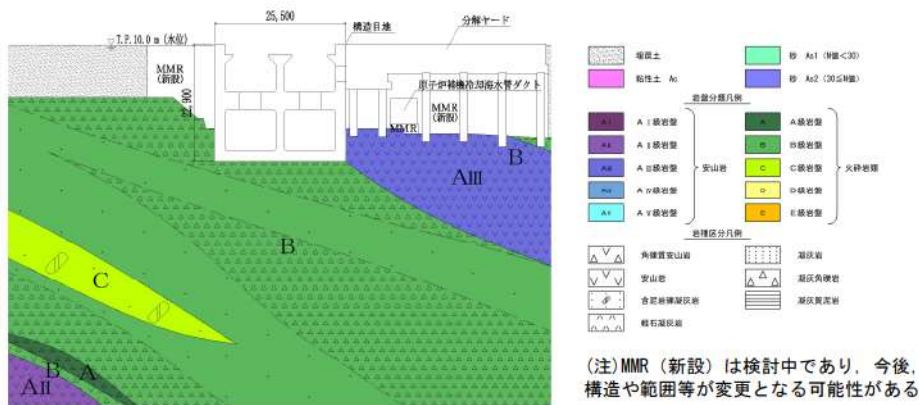


(注) MMR (新設) は検討中であり、今後、構造や範囲等が変更となる可能性がある

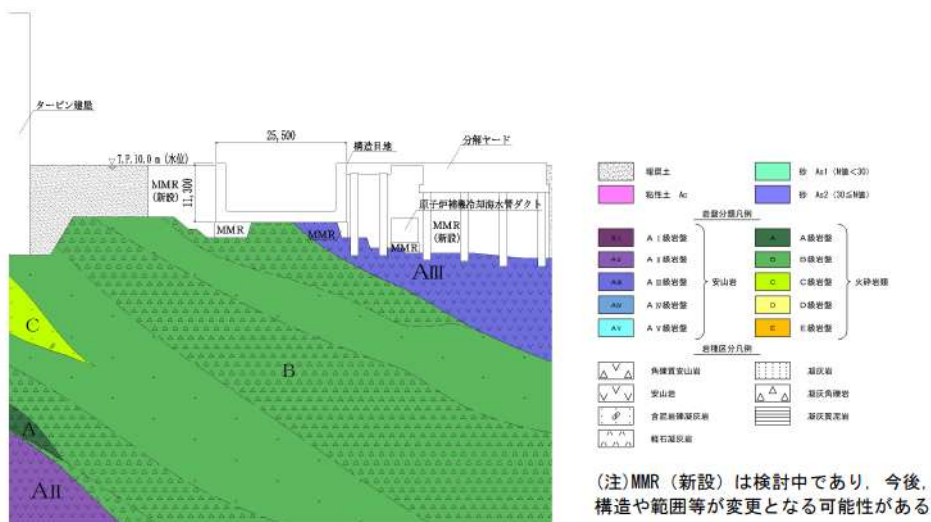
第 8-2-7-7 図 取水ピットポンプ室 断面図 (C-C 断面)



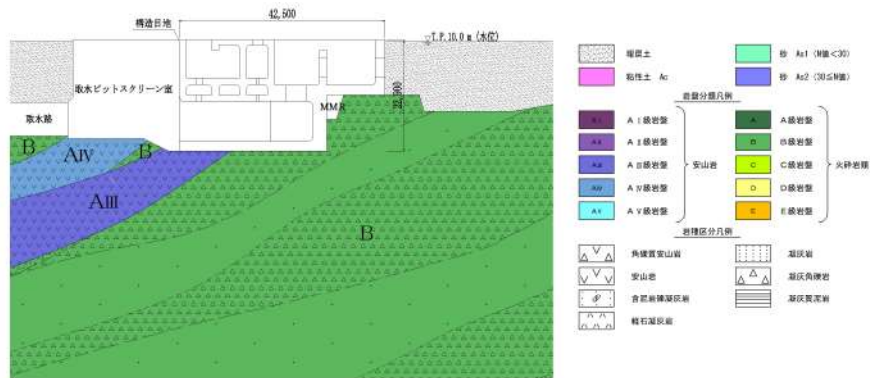
第 8-2-7-8 図 取水ピットポンプ室 地質断面図 (A-A 断面)



第 8-2-7-9 図 取水ピットポンプ室 地質断面図 (B-B 断面)



第 8-2-7-10 図 取水ピットポンプ室 地質断面図 (C-C 断面)



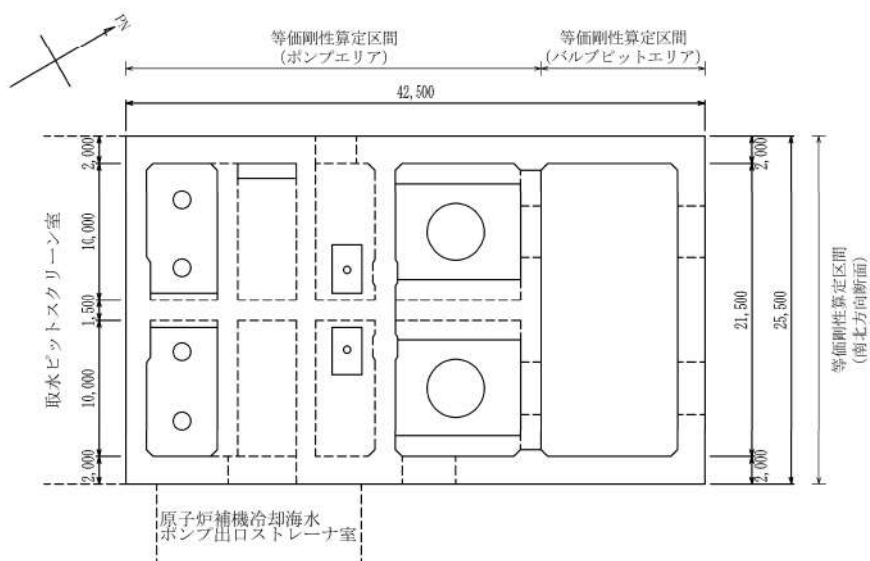
第 8-2-7-11 図 取水ピットポンプ室 地質断面図 (D-D 断面)

取水ピットポンプ室について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第 8-2-7-1 表に示す。

第 8-2-7-1 表に示す整理を踏まえ、三次元モデルに作用させる地震力を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から地震時荷重算定断面として評価対象断面に選定する。

東西方向は、構造的な特徴からポンプエリアとバルブピットエリアに大別され、それぞれのエリアで剛性に差があることから、ポンプエリア及びバルブピットエリアを評価対象断面に選定する。二次元地震応答解析においては、第 8-2-7-12 図に示すとおり、各エリアに対して等価な剛性を算定する。

南北方向は、構造物が軸心を中心としてほぼ対称性を有し、周辺状況の差異がないことから、構造物の中心を通る断面を評価対象断面に選定する。二次元地震応答解析においては、第 8-2-7-12 図に示すとおり、構造物幅に対して等価な剛性を算定する。



第 8-2-7-12 図 取水ピットポンプ室 等価剛性算定区間

第8-2-7-1表 評価対象候補断面の整理 (取水ピットポンプ室)

観点		取水ピットポンプ室			
		東西方向 (弱軸方向)		南北方向 (強軸方向)	
		ポンプエリア		バルブピットエリア	
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	A-A 断面 ・通水機能 ・貯水機能 ・止水機能 ・間接支持機能	B-B 断面 ・通水機能 ・貯水機能 ・間接支持機能	C-C 断面 ・なし	D-D 断面 ・通水機能 ・貯水機能 ・止水機能 ・間接支持機能
	間接支持する 設備	・原子炉補機冷却海水ポンプ ・原子炉補機冷却海水設備配管 ・浸水防止蓋 ・ドレンライン逆止弁		・なし	・原子炉補機冷却海水ポンプ ・原子炉補機冷却海水設備配管 ・浸水防止蓋 ・ドレンライン逆止弁
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・上部のポンプエリア及び下部の4連のボックスカルバートにより構成される			
	寸法	・幅 25.5m, 高さ 22.9m		・幅 25.5m, 高さ 11.3m	・幅 42.5m, 高さ 11.3~22.9m
③周辺状況	周辺地質	・A _m 級岩盤に直接支持されている	・B級岩盤に直接支持されている	を介してB級岩盤に支持されている	・ポンプエリア及びバルブピットエリアにより構成される ・A _m 級及びB級岩盤に直接支持されている
	断層交差部 土被厚 上載荷重 地下水位 モダル化する隣接構造物	・構造物側部にMWRが分布している ・なし ・上部に循環水ポンプ建屋が設置されている ・地表面 T.P. 10.00m ・原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレート室			・構造物側部に埋戻土が分布している ・取水ピットスクリーン室 ・防潮壁
④地震波の伝播特性 ⑤床芯答特性		・観点③での整理のとおり、各断面で周辺状況に差異があり、地震波の伝播特性が異なる ・観点①~③での整理のとおり、間接支持する設備、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床芯答特性が異なる			

2.8 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室の配置図を第8-2-8-1図に、平面図を第8-2-8-2図に、断面図を第8-2-8-3図～第8-2-8-6図に、地質断面図を第8-2-8-7図及び第8-2-8-8図にそれぞれ示す。

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室は、耐震重要施設及び常設重大事故等対処設備である原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ等の間接支持機能が要求される。

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室は、延長20.0m、幅15.0m、高さ16.3mの鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、構造物の断面が延長方向で異なり、加振方向と平行に配置される妻壁や隔壁等の面部材を有する箱型構造物である。


配筋については、同一断面形状区間で一様な配筋となっている。

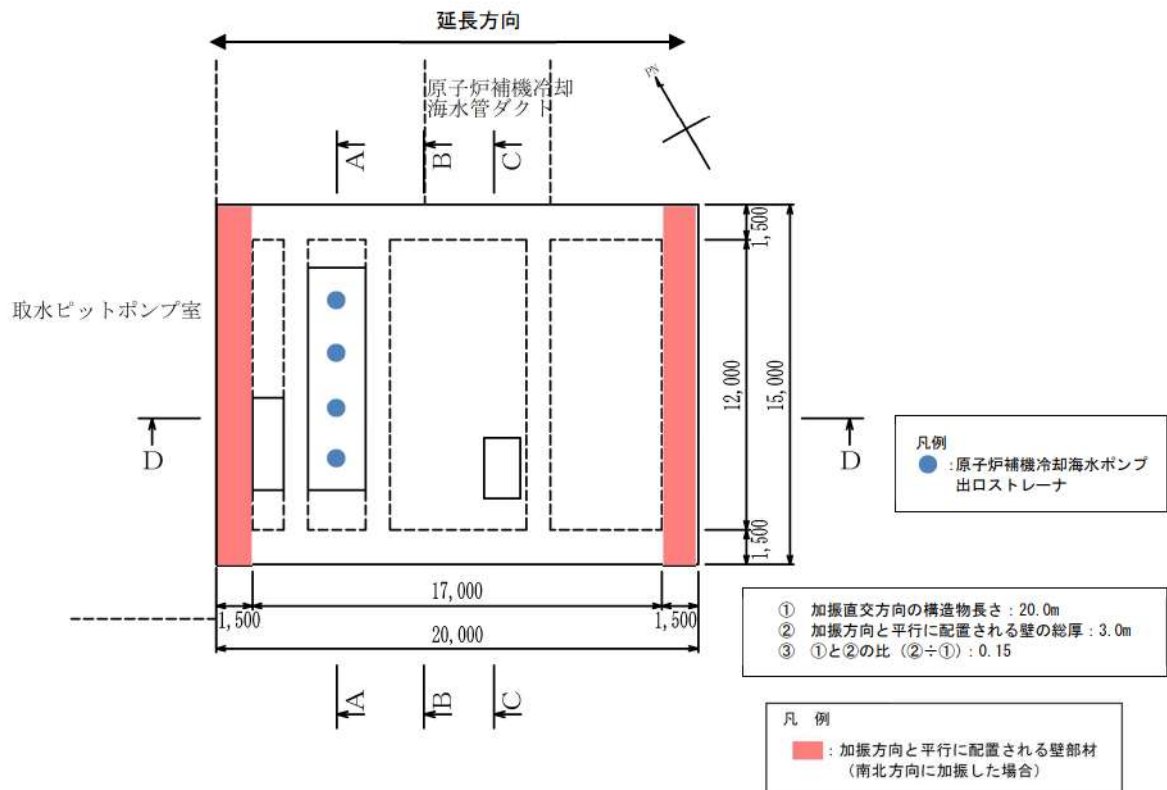
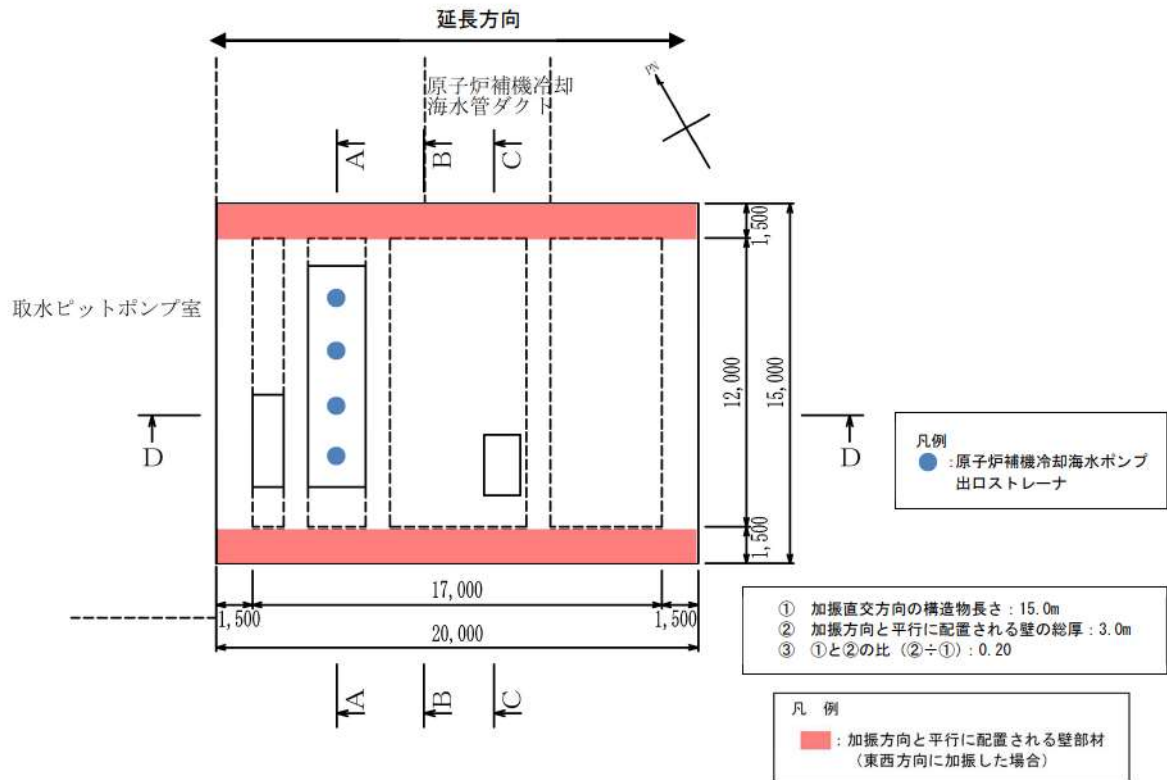
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室は、第8-2-8-2図に示すとおり、南北方向に加振した場合に加振直交方向の構造物長さと同様に配置される壁の総厚の比が小さくなるため、南北方向が弱軸となり、東西方向が強軸となる。

耐震評価に当たっては、加振方向と平行に設置される妻壁や隔壁等の面部材を耐震部材として考慮することとし、二次元地震応答解析により得られる土圧等の荷重を三次元モデルに作用させて耐震評価を行う。

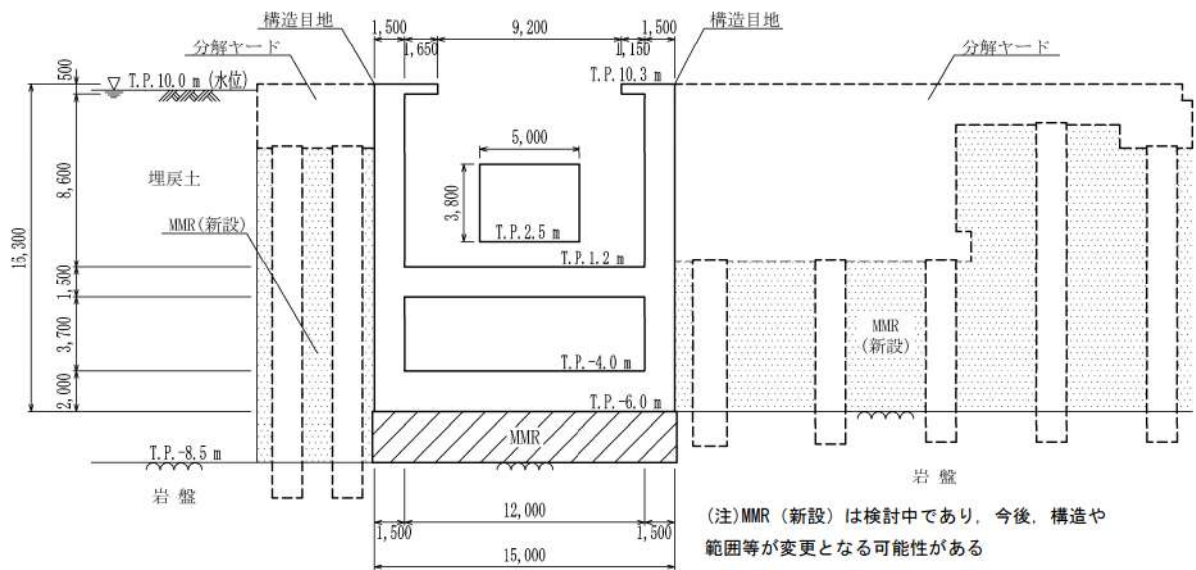


第8-2-8-1図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 配置図

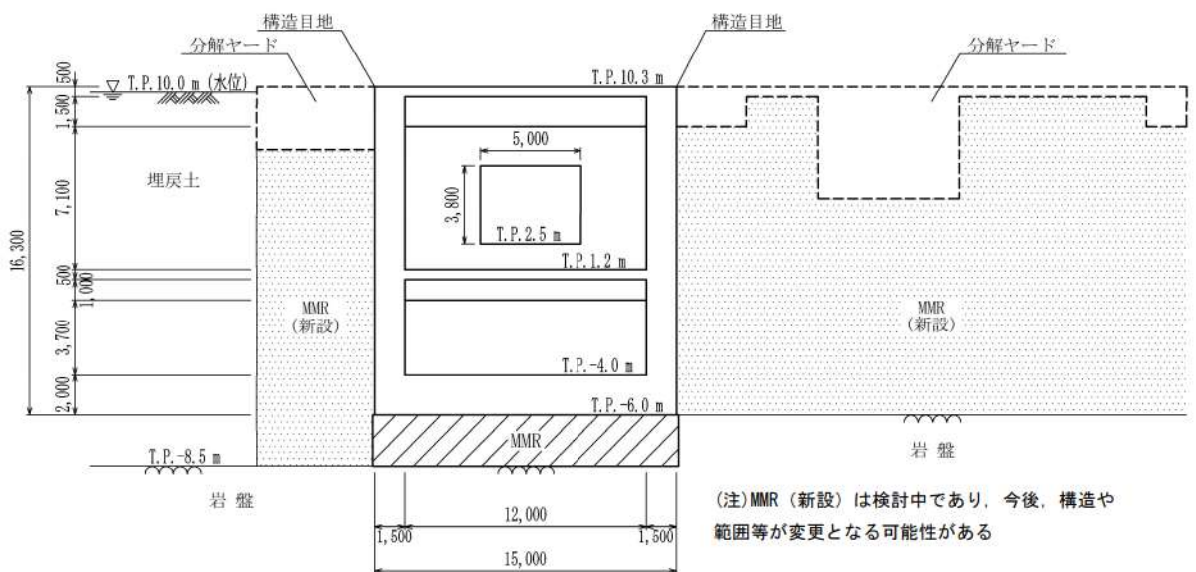
 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。



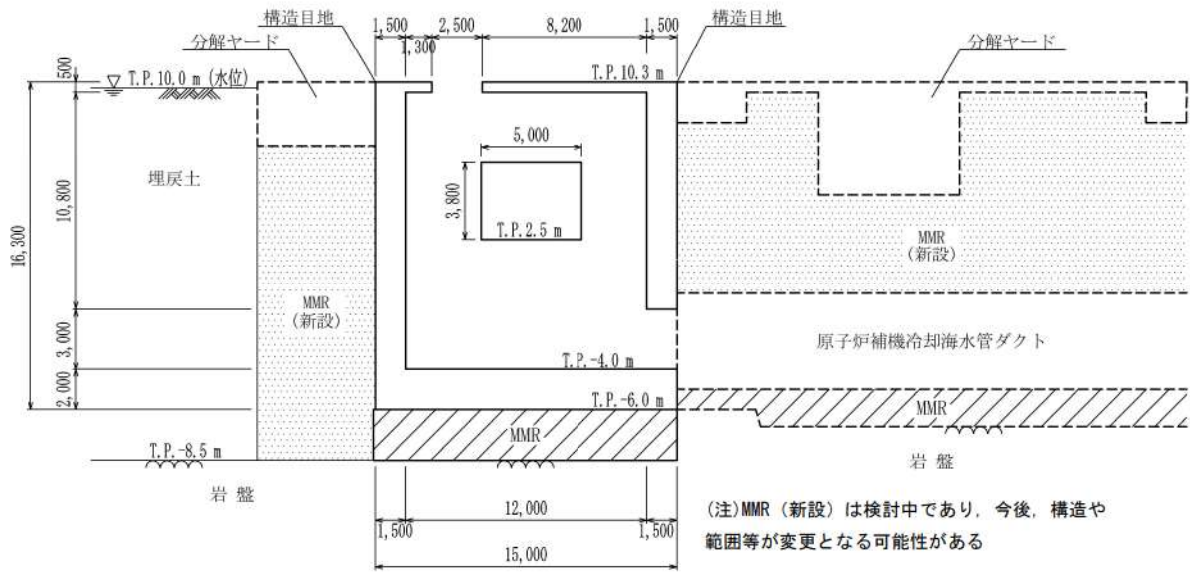
第 8-2-8-2 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 平面図



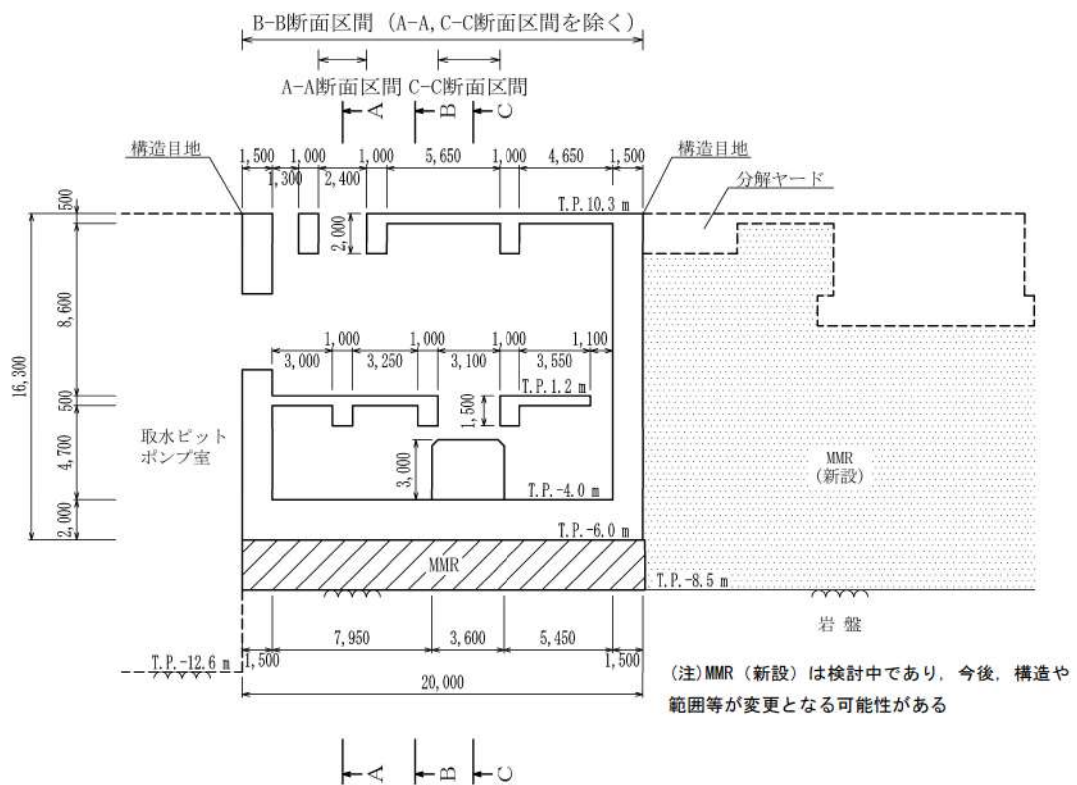
第 8-2-8-3 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 断面図 (A-A 断面)



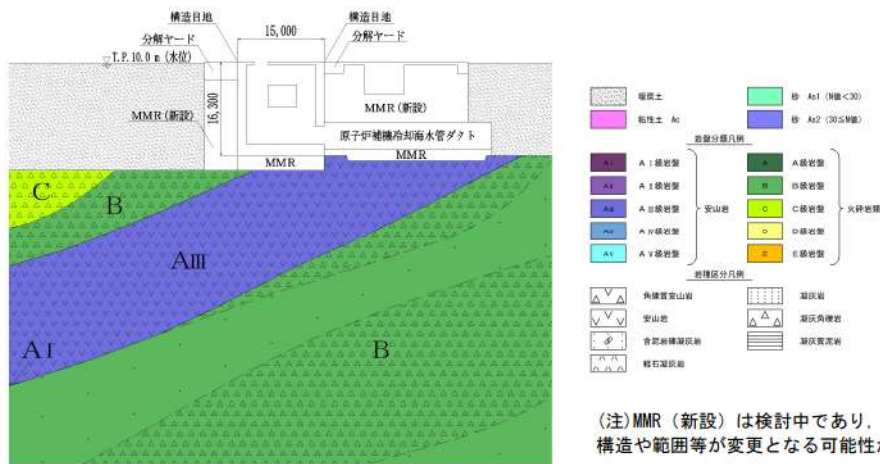
第 8-2-8-4 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 断面図 (B-B 断面)



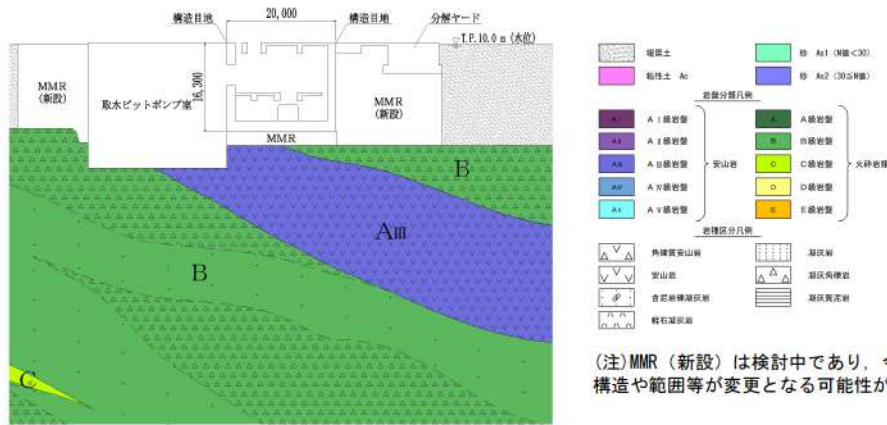
第 8-2-8-5 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 断面図 (C-C 断面)



第 8-2-8-6 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 断面図 (D-D 断面)



第 8-2-8-7 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 地質断面図 (C-C 断面)



第 8-2-8-8 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 地質断面図 (D-D 断面)

原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室について、間接支持する設備、構造的特徴、周辺状況及び地震波の伝播特性等の観点を踏まえて整理した評価対象候補断面を第 8-2-8-1 表に示す。

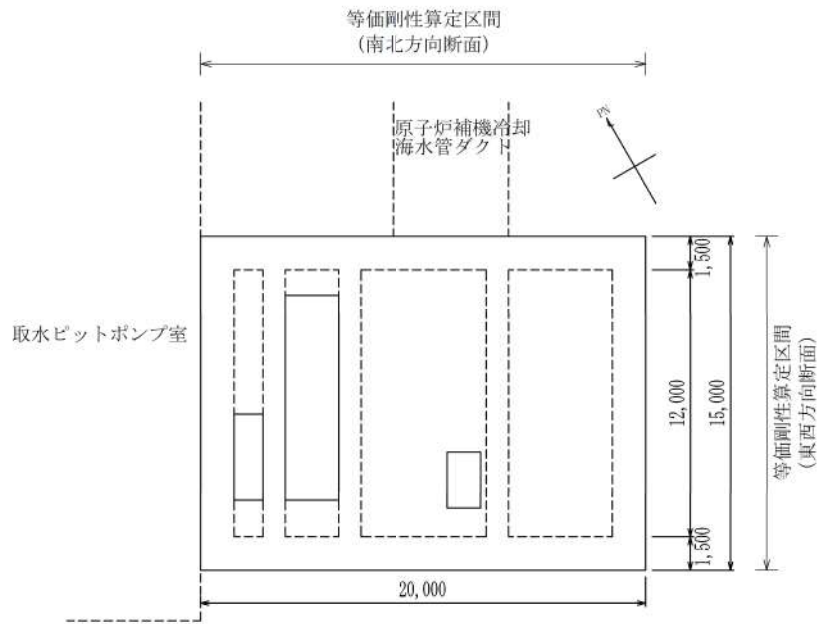
第 8-2-8-1 表 評価対象候補断面の整理（原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室）

観点		原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室			
		南北方向（弱軸方向）			東西方向（強軸方向）
		A-A 断面	B-B 断面	C-C 断面	D-D 断面
①要求機能並びに 間接支持する機器 ・配管の有無及び 設置状況	要求機能	・間接支持機能			
	間接支持する 設備	・原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ ・原子炉補機冷却海水設備配管			
②構造的特徴	形式	・鉄筋コンクリート造の地中構造物 ・頂版に開口が存在する		・頂版、側壁及び中床版 に開口が存在する	・頂版、中床版及び表壁 に開口が存在する
	寸法	・幅 15.0m, 高さ 16.3m			・幅 20.0m, 高さ 16.3m
③周辺状況	周辺地質	・MMR を介して A _m 級岩盤に支持されている ・構造物側部に MMR が分布している			・MMR を介して A _m 級及び B 級岩盤に支持されて いる
	断層交差部	・なし			
	土被厚 上載荷重	・なし			
	地下水位	・地表面 T. P. 10.00m			
	モデル化する 隣接構造物	・なし			・取水ピットポンプ室
④地震波の伝播特性		・観点③での整理のとおり、各断面で周辺状況に差異があり、地震波の伝播特性が異なる			
⑤床応答特性		・観点①～③での整理のとおり、間接支持する設備に差異はないが、構造的特徴及び周辺状況に差異があることから、各断面の床応答特性が異なる			

以上の整理を踏まえ、三次元モデルに作用させる地震力を適切に評価することが可能な断面を直交する 2 方向から地震時荷重算定断面として評価対象断面に選定する。

南北方向は、おおむね B-B 断面に示す構造が延長方向に連続する構造であり、周辺状況の差異がないことから、B-B 断面を評価対象断面に選定する。二次元地震応答解析においては、頂版、側壁及び中床版に開口が存在しているため、第 8-2-8-9 図に示すとおり、延長方向全長に対して等価な剛性を算定する。

東西方向は、構造物が軸心を中心としてほぼ対称性を有し、周辺状況の差異がないことから、構造物の中心を通る断面を評価対象断面に選定する。二次元地震応答解析に反映する構造物の剛性は、第 8-2-8-9 図に示すとおり、構造物幅に対して等価な剛性を算定する。



第 8-2-8-9 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室 等価剛性算定区間

泊発電所3号炉

一関東評価用地震動（鉛直方向）に関する
評価方針について

目 次

1. はじめに
2. 一関東評価用地震動（鉛直方向）の概要
3. 一関東評価用地震動（鉛直方向）に関する評価方針
 - 3.1 建物・構築物
 - 3.2 機器・配管系
 - 3.3 土木構造物

1. はじめに

基準地震動Ss3-3（2008年岩手・宮城内陸地震（KiK-net一関東））は、水平方向の地震動のみ設定しているものであることから、工学的に水平方向の地震動から設定した鉛直方向の評価用地震動（以下「一関東評価用地震動（鉛直方向）」という）による地震力を用いて評価を実施する。

また、弾性設計用地震動に対応するものとして、一関東評価用地震動（鉛直方向）に対して係数0.6を乗じた地震動（以下「0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）」という）についても評価を実施する。

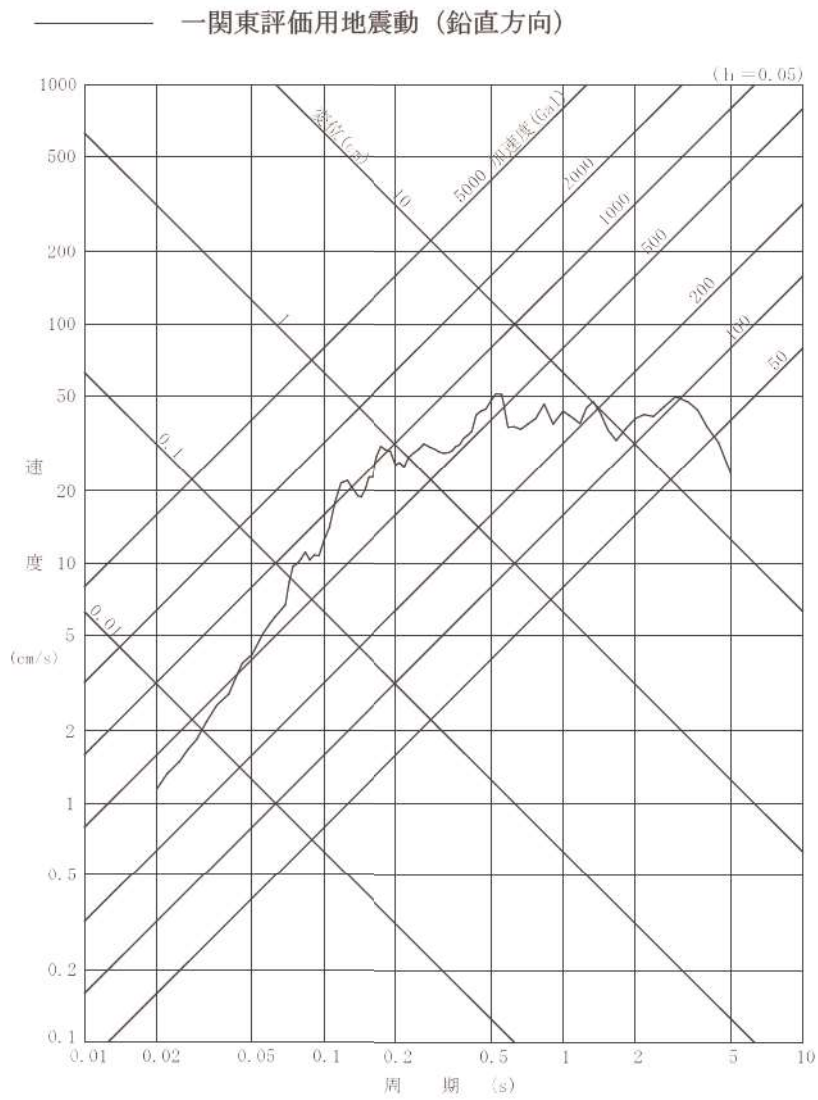
本資料は、上記の方針に従い、一関東評価用地震動（鉛直方向）に対する具体的な評価方針について説明するものである。

2. 一関東評価用地震動（鉛直方向）の概要

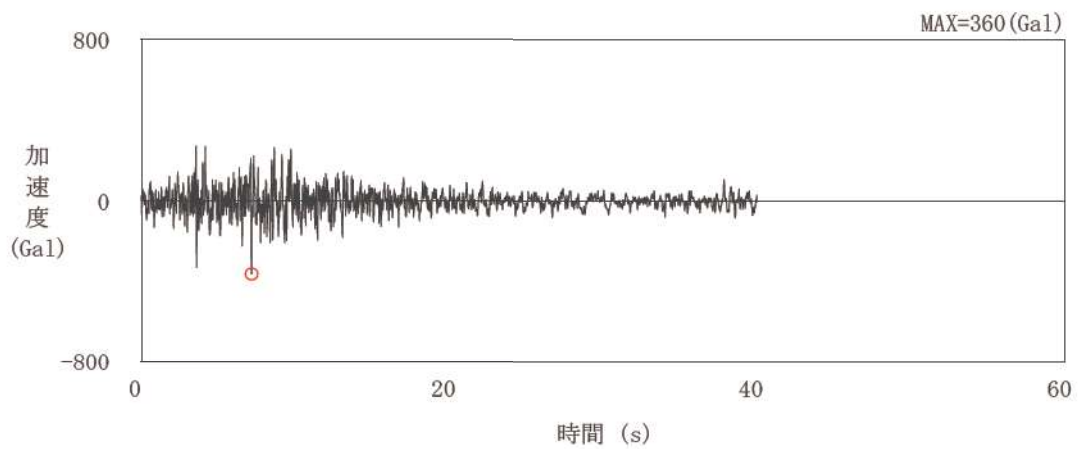
第1157回審査会合にて示したとおり、一関東評価用地震動（鉛直方向）は、一関東観測点における岩手・宮城内陸地震で得られた観測記録より設定しており、その設定概要は以下のとおり。

- ① 一関東観測点における岩手・宮城内陸地震で得られた観測記録のNS方向及びEW方向のはぎとり解析により算定した基盤地震動の応答スペクトルを平均し、平均応答スペクトルを作成する。
- ② 一般的な水平方向に対する鉛直方向の地震動の比2/3を考慮し、平均応答スペクトルに3分の2を乗じた応答スペクトルを設定する。
- ③ 一関東観測点における岩手・宮城内陸地震で得られた鉛直方向の地中記録の位相を用いて、設定した応答スペクトルに適合するよう模擬地震波を作成する。
- ④ 作成した模擬地震波に保守性を考慮して振幅調整した地震動を一関東評価用地震動（鉛直方向）とする。

一関東評価用地震動（鉛直方向）の応答スペクトルを第2-1図に、加速度時刻歴波形を第2-2図に示す。また、0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）の応答スペクトルを第2-3図に、加速度時刻歴波形を第2-4図に示す。

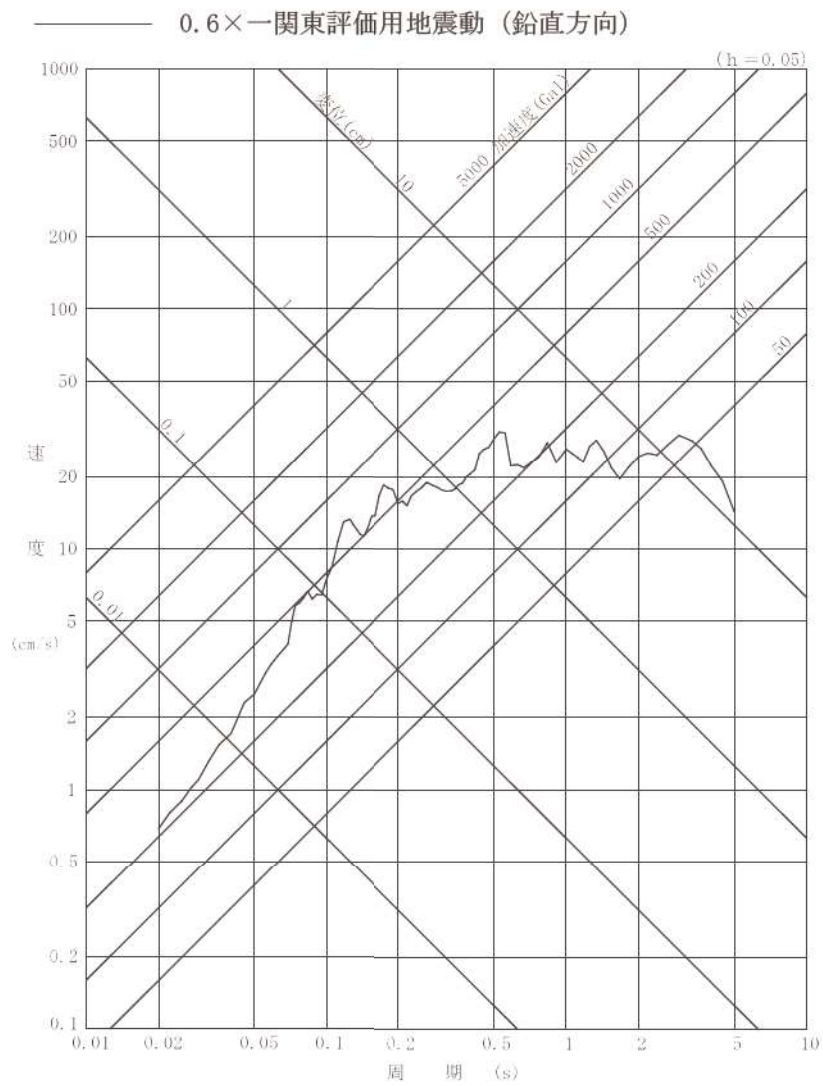


第2-1図 一関東評価用地震動（鉛直方向）の応答スペクトル

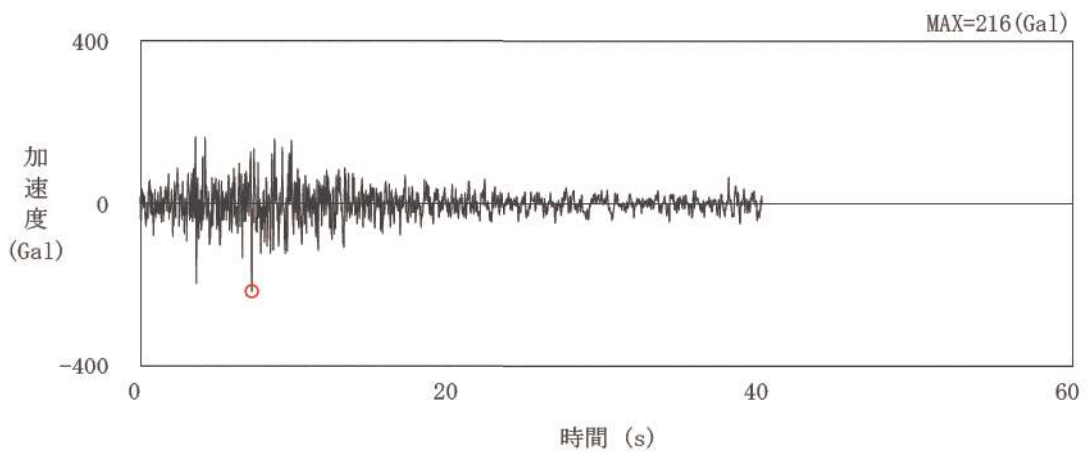


第2-2図 一関東評価用地震動（鉛直方向）の加速度時刻歴波形

4条-別紙 12-3



第2-3図 0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）の応答スペクトル



第2-4図 0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）の加速度時刻歴波形

4条-別紙 12-4

3. 一関東評価用地震動（鉛直方向）に関する評価方針

3.1 建物・構築物

本項では、建物・構築物における一関東評価用地震動（鉛直方向）及び0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）に対する評価の方針について示す。

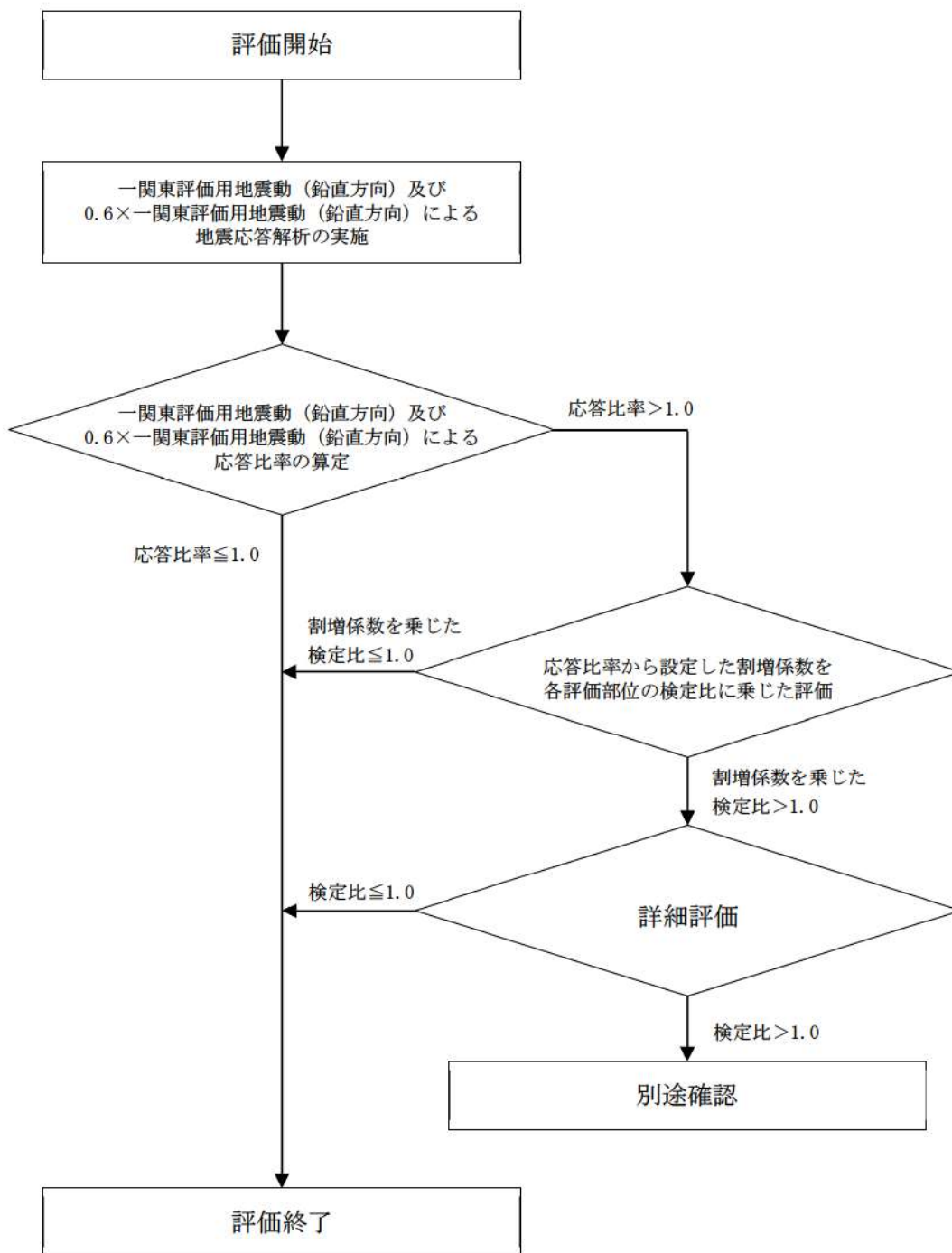
建物・構築物の耐震評価では、基準地震動又は弾性設計用地震動による材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析を実施して、すべての解析ケースを包絡した設計用地震力を水平方向及び鉛直方向それぞれに設定する。この設計用地震力を用いて、各評価対象部位ごとに耐震評価を実施し、発生値が許容値以内であることを確認することとしている（ここで、許容値に対する発生値の比を以下「検定比」という）。

このため、一関東評価用地震動（鉛直方向）及び0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）に対する評価としては、基準地震動による地震力と一関東評価用地震動（鉛直方向）による地震力又は弾性設計用地震動による地震力と0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）による地震力の比（以下「応答比率」という。）を算出し、応答比率が1.0を超えないことで、設計用地震力に影響を与えないことを確認する。応答比率が1.0を超える場合には、応答比率による割増係数を各評価対象部位ごとの検定比に乘じ、その検定比が1.0を超えないことで保守的に確認する。これは鉛直方向の割増係数であることから、水平方向の地震力が寄与する部分への割増しは不要であるが、保守的に水平方向と鉛直方向の両方向の地震力を考慮した検定比に対して、一律割増しを行う。

また、割増係数を乗じた検定比が1.0を超える場合、すなわち、安全上支障がないと言えない場合は、詳細評価として、基準地震動 S_s3-3 （水平方向）と一関東評価用地震動（鉛直方向）又は弾性設計用地震動 S_d3-3 （水平方向）と0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）を組み合わせた地震荷重を用いた応力解析による評価を実施する。

上記を踏まえた、評価フローを第3-1図に示す。

ただし、必要に応じて、一関東評価用地震動（鉛直方向）を基準地震動と、0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）を弾性設計用地震動と同等に取り扱って評価する場合には、これらの地震力を包絡した設計用地震力を設定し、これを用いて各評価対象部位ごとに耐震評価を実施する。



第3-1図 一関東評価用地震動(鉛直方向)の評価対応フロー (建物・構築物)

3.2 機器・配管系

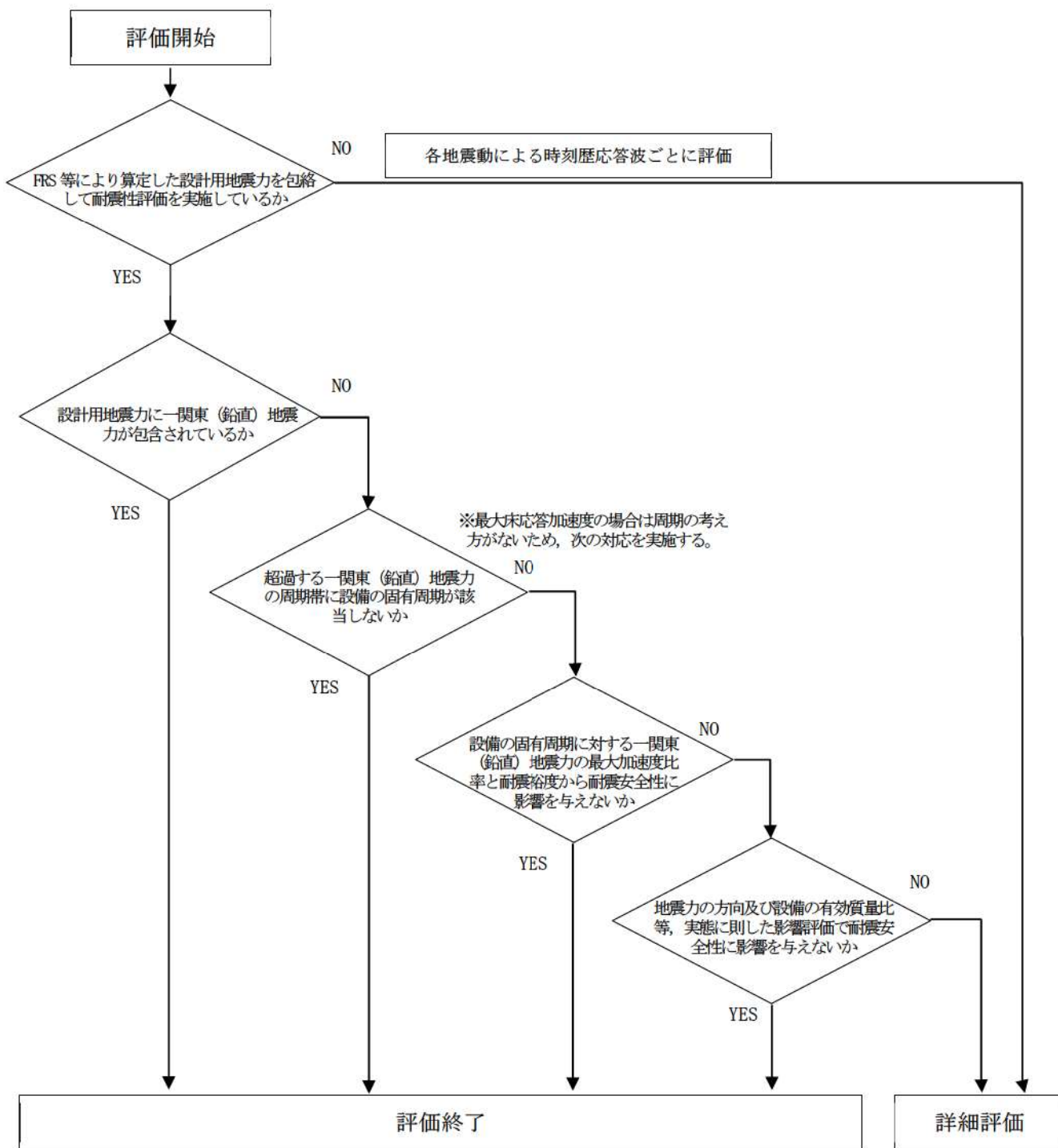
本項では、機器・配管系における一関東評価用地震動（鉛直方向）及び0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）に対する評価の方針について示す。

機器・配管系のうち、各地震動による水平方向及び鉛直方向の時刻歴応答波ごとに耐震評価を実施する燃料集合体等の設備については、一関東評価用地震動（鉛直方向）又は0.6×一関東評価用地震動（鉛直方向）を用いて評価を実施する。

基準地震動又は弾性設計用地震動から算定される設計用地震力（以下「設計用地震力」という）をそれぞれ包絡して評価する設備については、設計用地震力と一関東評価用地震動（鉛直方向）による地震力（以下「一関東（鉛直）地震力」という。）の比較により評価を行う。具体的な一関東（鉛直）地震力に対する評価内容としては、設計用地震力と一関東（鉛直）地震力の加速度比較を行い、設計用地震力に対して一関東（鉛直）地震力が超過する場合は、超過する周期帯（以下「超過周期帯」という。）に固有周期を有する設備を特定し、超過周期帯の最大加速度比率を用いて耐震安全性に影響がないことの評価を行う。機能維持が要求される設備に対して加速度が超過する場合は、超過周期帯に固有周期を有する設備を特定し、超過周期帯の最大加速度比率を用いて耐震安全性に影響がないことの評価を行う。

上記を踏まえた、評価フローを第3-2図に示す。

ただし、設計用地震力を包絡して評価する設備においても、必要に応じて、設計用地震力に加えて一関東（鉛直）地震力も包絡した評価を実施することがある。



第 3-2 図 一関東評価用地震動（鉛直方向）の評価対応フロー（機器・配管系）

3.3 土木構造物

本項では、土木構造物における一関東評価用地震動（鉛直方向）及び $0.6 \times$ 一関東評価用地震動（鉛直方向）に対する評価の方針について示す。

土木構造物は、基準地震動 $Ss3-3$ （水平方向）及び一関東評価用地震動（鉛直方向）の同時入力、又は弾性設計用地震動 $Sd3-3$ （水平方向）及び $0.6 \times$ 一関東評価用地震動（鉛直方向）の同時入力により評価を実施する。