

島根原子力発電所 2号炉 地震による損傷の防止 (耐震設計の論点)

[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]

令和元年11月
中国電力株式会社

屋外重要土木構造物の精緻化について（1）

■ 屋外重要土木構造物の評価手法の概要

○屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について、島根2号炉の今回工認では、屋外重要土木構造物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及び隣接構造物のモデル化を予定している。既工認と今回工認との手法の比較を以下に示す。

	解析手法	解析モデル	減衰定数	コンクリート強度	隣接構造物
既工認	時刻歴応答解析 及び周波数応答 解析 許容応力度法等	ばね質点系モデル 及び地質データに 基づく水平成層地 盤モデル	構造物の減衰5%	設計基準強度	地盤としてモデル化
今回工認	時刻歴応答解析 限界状態設計法	地質データに基づく FEMモデル	構造物の減衰2% +履歴減衰	設計基準強度	等価剛性でモデル 化
比較結果	●異なる	●異なる	●異なる	○同じ	●異なる
適用例	○あり	○あり	○あり	○あり	○あり

○既工認との相違点については、論点として抽出し、次頁以降で説明する。

屋外重要土木構造物の精緻化について（２）

○各論点に対する評価対象設備を整理した。整理結果を以下に示す。

各論点に対する評価対象設備※

	論点	評価対象設備
論点Ⅱ－２２	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析の適用	取水槽，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒），ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎，燃料移送系配管ダクト，屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物），取水管，取水口，輪谷貯水槽（西側），第１ベントフィルタ格納槽，低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽，緊急時対策所用燃料地下タンク
論点Ⅱ－２３	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析における履歴減衰及びRayleigh減衰の適用	取水槽，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒），ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎，燃料移送系配管ダクト，屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物），取水管，取水口，輪谷貯水槽（西側），第１ベントフィルタ格納槽，低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽，緊急時対策所用燃料地下タンク
論点Ⅱ－２４	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用（層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価）	取水槽，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒），屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物），輪谷貯水槽（西側）
論点Ⅱ－２５	土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用	取水槽，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒），屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物），第１ベントフィルタ格納槽，低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽
論点Ⅱ－２７	質点系モデル（SRモデル）の適用	免震重要棟遮蔽壁

※ 参照：第４条 地震による損傷の防止，別紙－１ 設置変更許可申請における既許可からの変更点及び既工認との手法の相違点の整理について

屋外重要土木構造物の精緻化について（3）

○評価対象設備について、要求性能、解析手法、解析モデル及び許容限界を整理した。整理結果を以下に示す。

耐震評価条件整理一覧表（既工認）

分類	設備名称	要求性能	解析手法	解析モデル	許容限界	
					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	取水槽	通水性能 間接支持性能	時刻歴応答解析	ばね質点系モデル	終局強度	許容せん断力
	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	間接支持性能	周波数応答解析	地質データに基づく水平成層地盤モデル（1次元波動論による）	終局強度	許容せん断力

屋外重要土木構造物の精緻化について（４）

耐震評価条件整理一覧表（今回工認）

分類	設備名称	要求性能	解析手法	解析モデル	許容限界	
					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	取水槽	通水性能 止水性能 間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮 縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮 縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	燃料移送系配管ダクト	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物）	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮 縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	取水管	通水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	許容曲げ応力	許容せん断応力
	取水口	通水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	許容曲げ応力	許容せん断応力
重大事故等対処施設 のうち土木構造物※	第1ベントフィルタ格納槽	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	間接支持性能 貯水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	緊急時対策所用燃料地下タンク	非常用発電装置に係る燃料の貯蔵	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	間接支持性能	時刻歴応答解析	【タンクモデル】 水平：多軸多質点系曲げせん断棒モデル 鉛直：多軸多質点系棒モデル 【相互作用】 SRモデル	終局強度	許容せん断力
	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	間接支持機能	静的解析	フレーム解析モデル	終局強度	許容せん断力
波的影響を及ぼす おそれのある施設の うち土木構造物	輪谷貯水槽（西側）	波的影響	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮 縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	免震重要棟遮蔽壁	波的影響	時刻歴応答解析	質点系モデル（地盤～杭基礎～ 構造物の連成系モデル：SRモデル）	終局強度	許容せん断力

※ 設計基準対象施設と兼用する重要 S A 施設のうち、設計基準対象施設の評価手法と相違がない施設は設計基準対象施設の一覧表に代表して記載。

屋外重要土木構造物の精緻化について（5）

○評価対象設備の配置図を以下に示す。



評価対象設備 配置図

論点[Ⅱ]既工認と今回工認の手法の相違点の整理に基づく論点

<土木構造物>

No.	論点	説明頁
1	[論点Ⅱ-22] 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析の適用	7~8
2	[論点Ⅱ-23] 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析における履歴減衰及びRayleigh減衰の適用	7,9~10
3	[論点Ⅱ-24] 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価)	11~21
4	[論点Ⅱ-25] 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用	22~26
5	[論点Ⅱ-27] 質点系モデル (SRモデル) の適用	27~30

論点Ⅱ-2 2 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析の適用（1）

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ-2 2「土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析の適用」】（論点の重み付け：B 2）

○時刻歴応答解析を適用する土木構造物の解析手法及び解析モデルの考え方を説明する。

【論点Ⅱ-2 3「土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析における履歴減衰及びRayleigh減衰の適用」】（論点の重み付け：B 2）

○時刻歴応答解析において考慮する履歴減衰及びRayleigh減衰の考え方を説明する。

■ 論点に係る説明概要

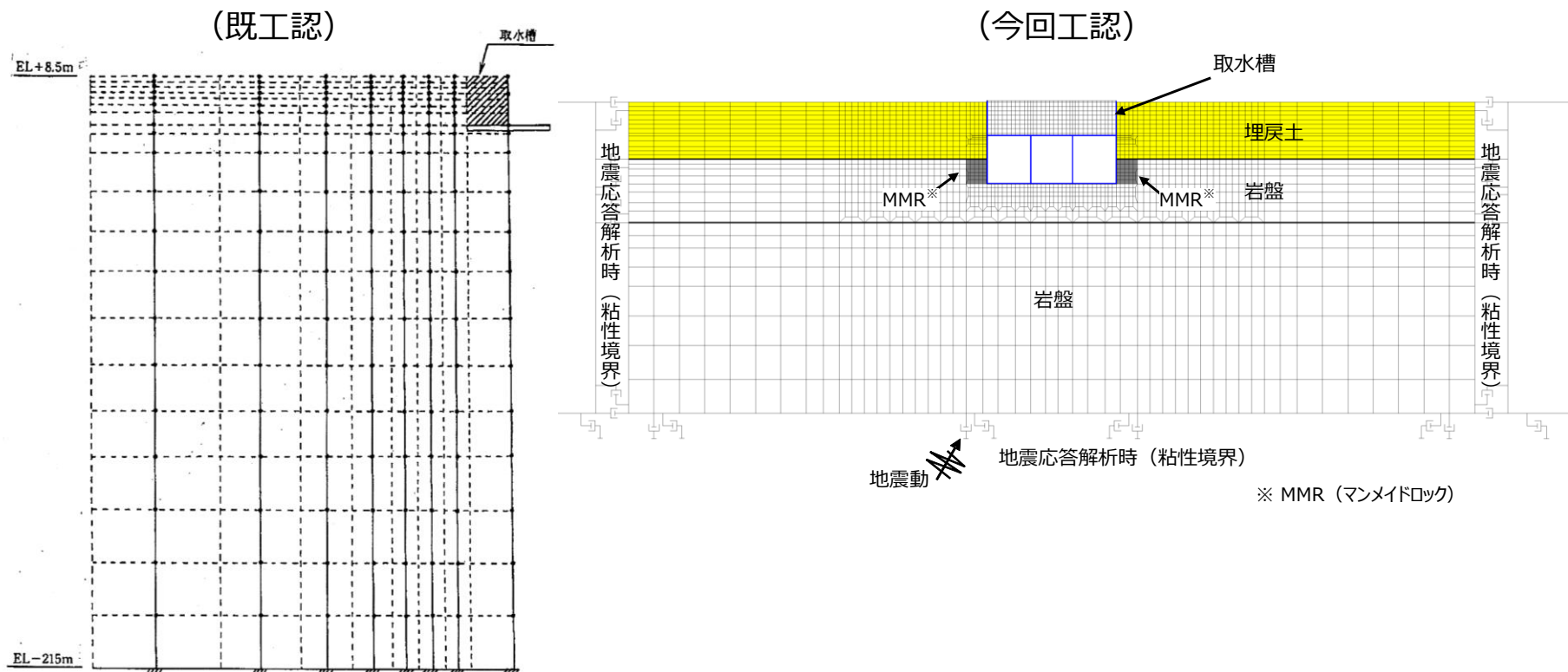
- 時刻歴応答解析を適用する土木構造物の解析手法及び解析モデルの考え方を説明する。（P.8）
- 時刻歴応答解析において考慮する履歴減衰及びRayleigh減衰の考え方を説明する。（P.9,10）

■ 先行プラント実績

- 時刻歴応答解析及び履歴減衰・Rayleigh減衰は、川内1, 2号炉の新規制審査のうち取水ピット等で適用例がある。

論点Ⅱ-2 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析の適用（2）

- 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価については、既工認では、地震応答解析手法として時刻歴応答解析及び周波数応答解析を採用していたが、今回工認では、構造物や周辺地盤の非線形性をより精緻に再現できる時刻歴応答解析を適用する。
- 解析モデルについては、既工認では、バネ質点系モデル及び地質データに基づく水平成層モデルを採用していたが、今回工認では、地質データに基づくFEMモデルを適用する。
- 取水槽の解析モデルを例として以下に示す。



取水槽 解析モデル

論点Ⅱ-23 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析における履歴減衰及びRayleigh減衰の適用（1）

- 屋外重要土木構造物の減衰定数については、既工認では、時刻歴応答解析及び周波数応答解析における減衰定数として、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰5%（JEAG4601-1987）を用いていた。
- 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とで考慮している。
- 粘性減衰は、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。

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

ここで、 $[C]$ ：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, β は、解析モデル全体系の固有値解析において、卓越するモードの減衰とRayleigh減衰が一致するように、以下の式により決定する。

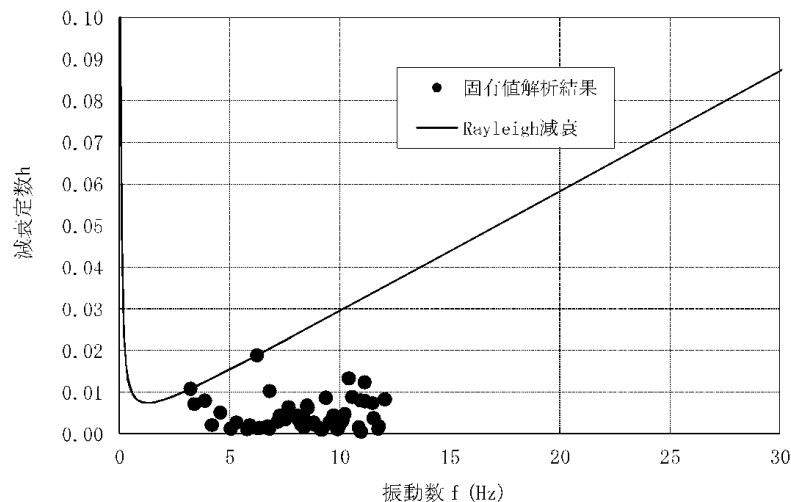
$$h_n = \alpha/2\omega_n + \beta\omega_n/2$$

ここで、 h_n ：固有値解析により求められた n 次モードの減衰定数
 ω_n ：固有値解析により求められた n 次モードの固有円振動数

卓越するモードは、全体系の固有値解析における刺激係数にて決定する。

- 設定したRayleigh減衰の一例（取水槽）を次頁に示す。取水槽の場合、刺激係数から1次モード及び10次モードを選定した。

論点Ⅱ-23 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち時刻歴応答解析における履歴減衰及びRayleigh減衰の適用（2）



設定したRayleigh減衰（取水槽の例）

固有値解析結果（取水槽の例）

モード 次数	固有円振動数 ω (rad/s)	固有振動数 F (Hz)	固有周期 T (s)	減衰定数 h	刺激係数(水平) β
1	20.275	3.227	0.310	0.0108	3159.600
2	21.257	3.383	0.296	0.0072	0.000
3	24.272	3.863	0.259	0.0079	922.350
4	26.316	4.188	0.239	0.0021	0.000
5	28.729	4.572	0.219	0.0051	348.170
6	31.765	5.056	0.198	0.0012	0.000
7	33.307	5.301	0.189	0.0028	383.250
8	36.410	5.795	0.173	0.0011	0.000
9	37.161	5.914	0.169	0.0020	603.040
10	39.201	6.239	0.160	0.0188	-3412.700
11	39.702	6.319	0.158	0.0013	0.000
12	40.138	6.388	0.157	0.0014	-423.950
13	42.302	6.733	0.149	0.0017	0.000
14	42.692	6.795	0.147	0.0012	-150.580
15	42.748	6.804	0.147	0.0103	0.000

■ : Rayleigh減衰のフィッティングに用いた次数

- 固有値解析における減衰定数は、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰2%とした。
- なお、構造部材の減衰定数については、以下の考え方にに基づき減衰を5%から2%に変更している。
- 非線形解析における粘性減衰による減衰の値は、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成14年3月）及び道路橋示方書・同解説（平成29年11月）において、構造物の減衰定数（コンクリート部材）を2%程度とされている。
- また、既工認と同様に構造部材を減衰5%に設定した固有値解析における解析モデル全体の一次モード減衰を確認したところ、既工認と今回工認の比率（既工認／今回工認）は1.06であり、構造物の減衰の影響は小さいと考えられる。
- 履歴減衰による減衰は、構造部材の部材非線形（ファイバーモデルのコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係）における非線形の程度に応じた値となる。

論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (1)

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ-24：土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用（限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価）】

（論点の重み付け：B2）

○取水槽等の構造物において、限界状態設計法を適用することで、構造物の非線形性や各種要求機能に応じた設計とする。

■ 論点に係る説明概要

限界状態設計法の適用（限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価）の方針を以下に示す。

- ・ フレームモデル（部材非線形）によりモデル化した取水槽，屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）等の耐震評価において適用する。（P.12）
- ・ 非線形解析における構造物の曲げ系の破壊については限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ，せん断破壊についてはせん断耐力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する。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及び材料非線形解析を用いた方法のいずれかを用いて評価する。（P.13～21）
- ・ 限界状態設計法の適用は，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）に則った手法である。（P.13～21）

■ 先行プラント実績

- ・ 本手法は，川内1，2号炉の新規制審査のうち取水ピット等での適用例がある。

論点Ⅱ－２４ 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (2)

1. 限界状態設計法の適用の概要

- 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について、既工認では、地震応答解析手法として時刻歴応答解析及び周波数応答解析を採用し、構造部材の曲げについては終局強度、せん断については許容せん断力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、屋外重要土木構造物の地震応答解析手法として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。構造部材の曲げについては限界層間変形角、曲げ耐力、圧縮縁コンクリート限界ひずみ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ことを基本とし、各設備の要求性能（支持性能、通水性能、貯水性能、止水性能）を踏まえて照査項目・内容を追加する。
- 以下では、「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。
- 構造物の曲げ系の破壊については限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ、せん断破壊についてはせん断耐力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する。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及び材料非線形解析を用いた方法のいずれかを用いて評価する。

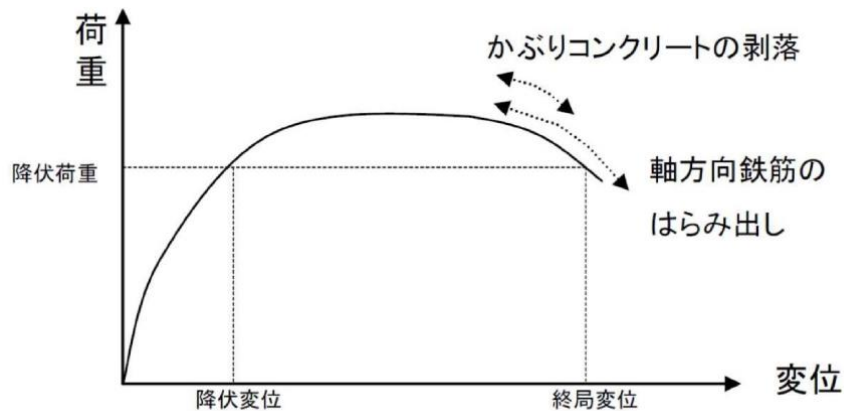
論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (3)

2. 構造物の曲げ照査に係る土木マニュアルの適用性について

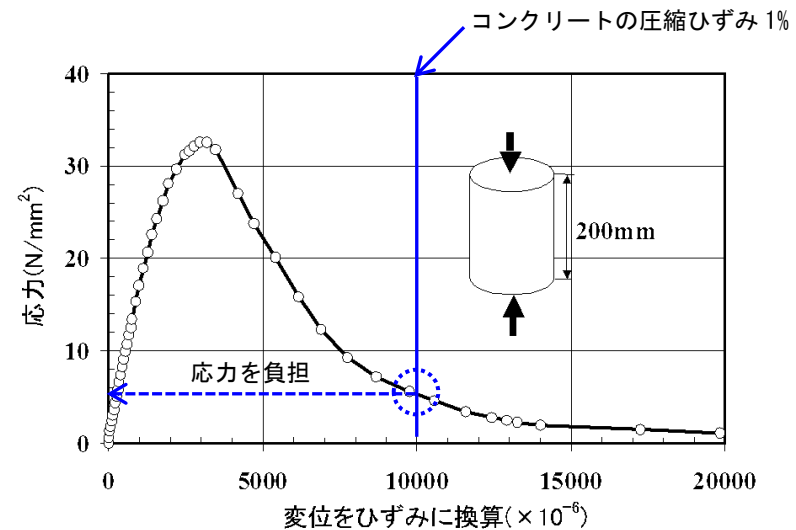
- 今回工認における曲げに対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用圧縮縁コンクリートひずみが、限界圧縮縁コンクリートひずみを超えないことを確認する。
- 「コンクリート標準示方書【構造性能照査編】(土木学会, 2002)」(以下「コンクリート標準示方書2002」という。)では、構造部材の終局変位は、部材の荷重-変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求めてよいとしている。コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方を以下に示す。
- 一方、土木マニュアルでは、以下の考えに基づいている。
- 屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験の結果より、かぶりコンクリートが剥落すると荷重が低下し始める。圧縮縁コンクリートひずみが1%に至る状態は、まだ応力を負担することができ、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。コンクリートの圧縮試験の例を以下に示す。
- 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。

1)土木学会：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，2005

2)土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002



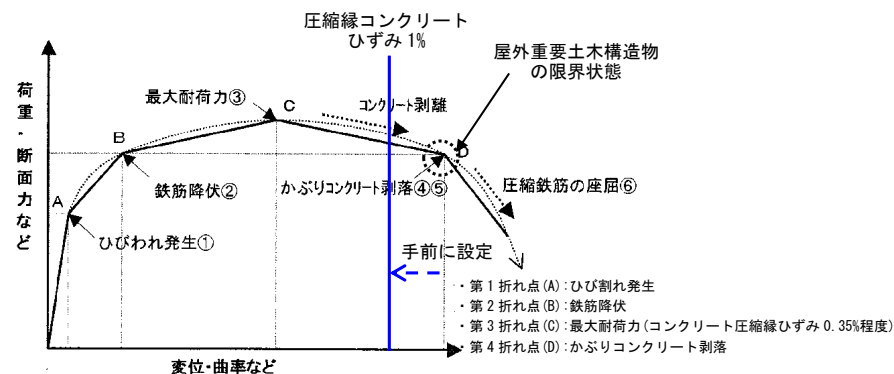
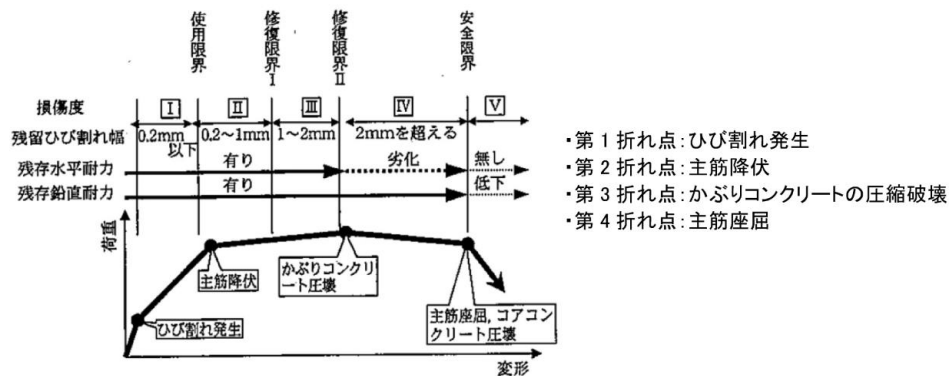
コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方



コンクリートの圧縮試験例

論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (4)

- 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は限界値として安全側であると考えられる。土木学会マニュアルでは，層間変形角が1/100以下であれば，圧縮縁コンクリートひずみ1%の基準を保証したものとみなすと示されており，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)の関係の概念図及び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以下に示す。日本建築学会と土木学会マニュアルにおいて概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。圧縮縁コンクリートひずみ1%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折れ点は圧縮縁コンクリートひずみ1%よりもさらに手前にある。
- 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。



曲げ降伏先行型の部材の復元力特性と限界状態（損傷度）の関係の概念図（日本建築学会）

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）

論点Ⅱ－24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (5)

3. 構造物のせん断照査に係る土木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。

3.1 せん断破壊に対する照査

- 応答せん断力とせん断耐力の比に構造物係数を乗じた数値が、1.0を下回ることを確認をもってせん断破壊に対する照査とする。せん断耐力は、以下の3つの選択肢のいずれかを用いて評価する。
 - (1)せん断耐力評価式
 - (2)分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法※
分布荷重を受ける部材については、せん断耐力評価式を応用して、より合理的な評価を行うことができる。土木学会マニュアルでは、「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」の2法を示す。
 - (3)材料非線形解析を用いる方法
ここでいう材料非線形解析とは、せん断耐力を求めるために用いる解析法を指し、応答解析で用いる解析とは区別している。部材が複雑な形状を有するなどの場合、これを選択できる。
- (1)で全部材の照査を行った後、不合格と判定される部材だけを取り出して(2)や(3)で再照査を行う。

※(2)の中の「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」を同一構造物の異なる部材に対して使い分けることはできない。

論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (6)

3.2 せん断耐力評価式

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	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ 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 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ 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	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ 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 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ 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 $\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ 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
	せん断スパンより設定される係数 β_a を考慮し コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化	
ディープビーム	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ 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 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{add} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ a_v : 荷重作用点から支承前面までの距離 f_{add} : 設計基準強度、安全係数等で決まる	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ 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 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{add} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ a_v : 荷重作用点から支承前面までの距離 f_{add} : 設計基準強度、安全係数等で決まる
	同一の評価式	

- 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右表に示すとおりので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、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、p17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¹⁾²⁾。
- 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せん断耐力を算定することとしている¹⁾。
- 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。

1)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，pp23-33，1992.2

2)遠藤達巳・青柳征夫・松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月

論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (7)

3.2.1 等価せん断スパン比を用いた方法

○ コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式

$$V_{yd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

2点载荷の単純はりの実験結果に基づいた単純な载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。

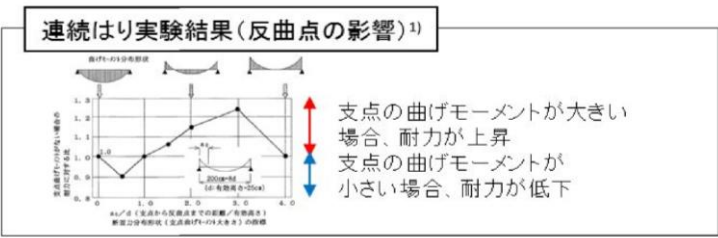
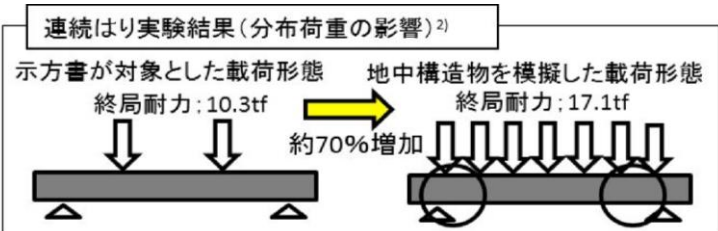
〈問題点〉

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およ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存在する等複雑な载荷形態を考慮してせん断耐力を評価する。

実験結果からの知見

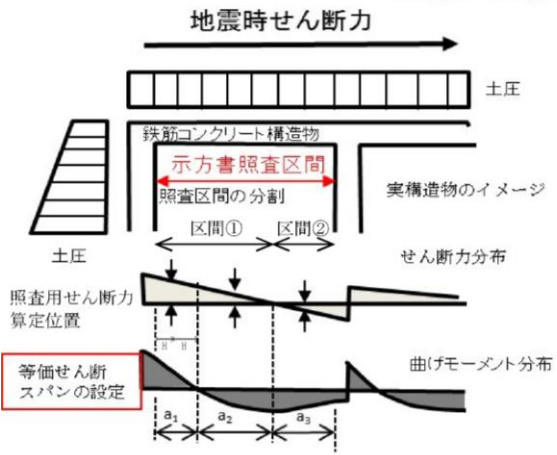


合理的なせん断耐力評価式の提案 (土木学会マニュアル)¹⁾

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot \frac{d}{\gamma_b}$$

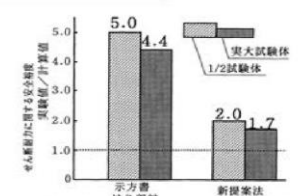
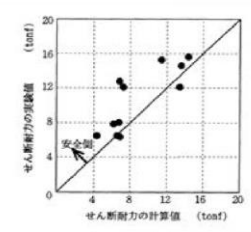
$$\beta_a = 0.75 + 1.4 / (a/d)$$

a: 等価せん断スパン長



実験による検証

連続はり実験結果による検証¹⁾



1) 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, pp23-33, 1992.2

2) 遠藤達巳・青柳征夫・松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月

論点Ⅱ－２４ 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (8)

3.2.2 線形被害則を用いた方法

○ 応答解析の結果得られた断面力分布を基に耐力を算定する。

a. 部材の分割

応答せん断力分布を見て、部材中にせん断力の反転する点がある場合は、その点で領域分割する。照査は双方の領域に対して行う。

b. 荷重分布の設定

応答せん断力分布から、それと同じ状況を再現できる荷重分布を求める。部材非線形解析で応答を求めると、節点位置で階段状にせん断力が変化する。この変化分を着目節点位置に作用する荷重とすればよい。a.の操作による分割点における変化分は両側の領域に配分する。

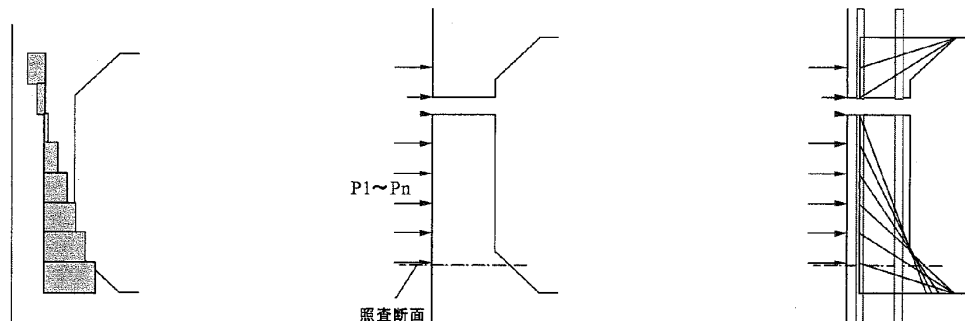
c. 照査断面の設定

照査断面は、せん断応力度（応答せん断力を断面積で除した値）が最大となる断面とする。

d. 線形被害則の適用

個々の作用 P_j （応答値側の安全係数を含む）に対するせん断耐力 V_j （限界値側の安全係数を含む）を評価し、作用力とせん断耐力の比の総和に構造物係数を乗じた値が1.0以内であることの確認を行う。

$$\gamma_i \cdot \sum_j \frac{P_j}{V_j} \leq 1.0$$



(a) 応答せん断力分布

(b) 外力分布の設定

(c) 作用点毎のa/dの設定

線形被害則を用いたせん断耐力評価法

論点Ⅱ－２４ 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (9)

3.3 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、(1)せん断耐力評価式及び(2)分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法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を用いたせん断耐力評価を実施する。
- 3.2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。
- 次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あたっては、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。

論点Ⅱ－24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (10)

【参考】耐震性能照査における応答値の評価に用いる解析手法

耐震性能と地震応答解析手法との対応

区分	限界状態	選択される標準的な解析手法と耐震性能に用いる物理量
1	構造物の部材が降伏に至らない	① 線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力
		② 等価線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力、最大せん断力 ・最大曲げモーメント
2	構造物が最大耐力に至らない	③ 部材非線形解析 ・最大曲げモーメント ・最大曲率、最大変位 ・最大層間変形角、最大せん断力
		④ 材料非線形解析 ・最大変位 ・最大層間変形角 ・最大ひずみ、最大せん断力
3	構造物が崩壊しない	

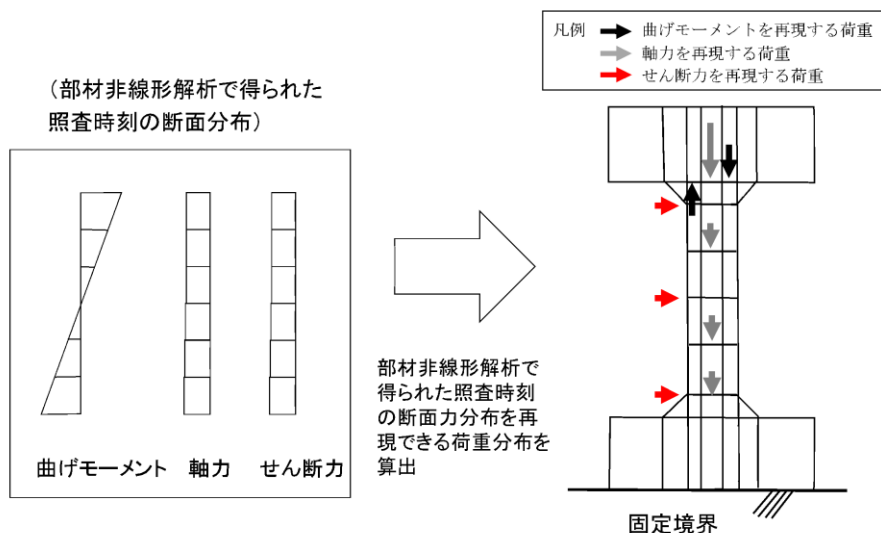
解析モデルの分類

	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		

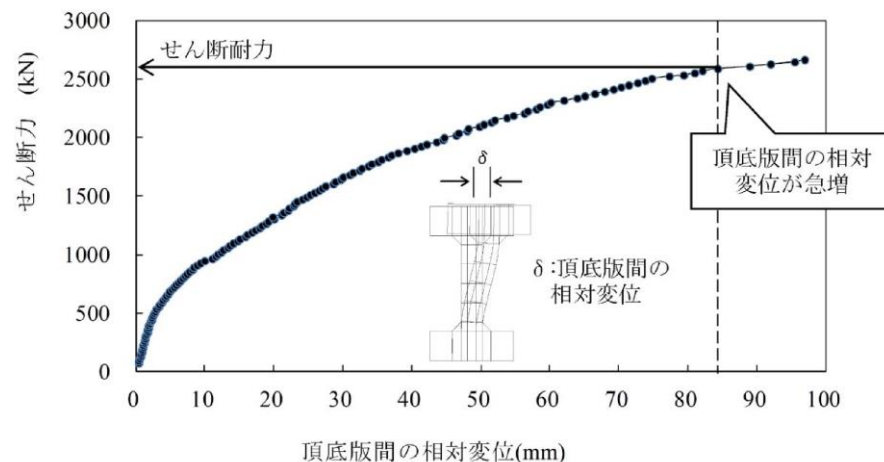
- ・地震応答解析手法の使用に当たっては、新設土木構造物は、①線形解析を基本とする。
- ・また、既設構造物は、③部材非線形解析の使用を基本とするが、部材によっては、④材料非線形解析を用いる場合もある。

論点Ⅱ-24 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち限界状態設計法の適用 (限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ及びせん断耐力による評価) (11)

- 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左下図に示すとおりに作用させる。
- 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、常時荷重と地震時荷重を足し合わせ、材料非線形解析を実施する。
- 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－相対変位関係や要素ひずみの応答から設定する。具体的には、右下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。



材料非線形解析における载荷状況



材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

論点Ⅱ－25 土木建造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接建造物のモデル化の適用（1）

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ－25：土木建造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接建造物のモデル化の適用】
（論点の重み付け：B 2）

○評価対象建造物に隣接する建造物の影響を考慮した現実的な挙動特性を把握する必要がある場合には、近接する建造物を等価剛性でモデル化する。

■ 論点に係る説明概要

隣接建造物のモデル化の適用の方針を以下に示す。

- 既工認では、簡便かつ保守的に評価する観点から、評価対象建造物に隣接する建物等は地震応答解析モデルでは地盤としてモデル化している。
- 今回工認では、評価対象建造物に隣接する建造物の影響を考慮した現実的な挙動特性を把握する必要がある場合について、隣接する建造物を等価剛性でモデル化する。（P.23～26）

■ 先行プラント実績

- 本手法は、高浜3，4号炉の新規制審査のうち復水タンク基礎等での適用例がある。

論点Ⅱ－２５ 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用（２）

1. 隣接構造物のモデル化方針

- ・ 評価対象構造物と隣接する構造物が接している場合、又は評価対象構造物と隣接する構造物が近接している場合においては、隣接する構造物の挙動を含めた応答を正しく評価する必要がある。したがって、隣接する構造物については、評価対象構造物との間の埋戻し材料や、それぞれの設置状況に応じて、隣接構造物が評価対象構造物の地震時応答に与える影響を踏まえ、モデル化要否を検討する。
- ・ 隣接構造物をモデル化するには、隣接構造物を等価剛性でモデル化する。
- ・ 隣接構造物のモデル化方針を以下に示す。

① 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は、評価対象構造物と隣接構造物の応答が相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。

② 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

評価対象構造物と隣接構造物の間が埋戻土を介している場合は、評価対象構造物と隣接構造物が近接している場合は、評価対象構造物と隣接構造物の応答が相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。

③ 評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR（マンメイドロック）の場合

評価対象構造物と隣接構造物の間がMMRを介している場合は、評価対象構造物と隣接構造物の応答がMMRとともに相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。

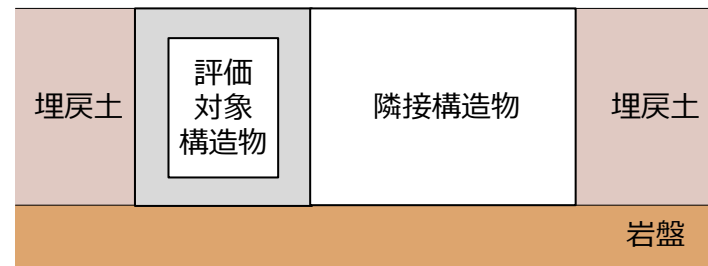
④ 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合

評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合、又は評価対象構造物と隣接構造物の間が十分な離隔を有する場合、隣接構造物の応答が評価対象構造物に影響を与えないため、隣接構造物をモデル化しない。

論点Ⅱ－２５ 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用（３）

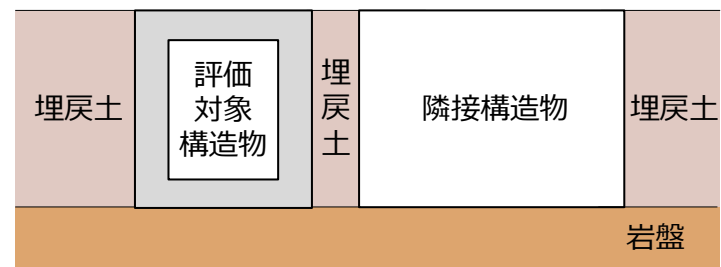
① 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

- ・隣接構造物をモデル化する。



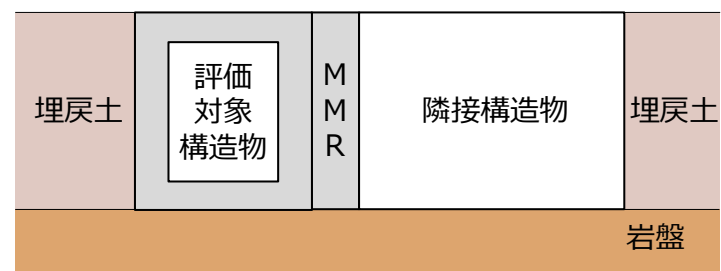
② 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

- ・隣接構造物をモデル化する。



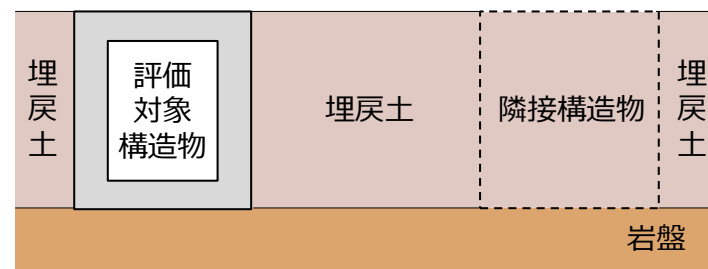
③ 評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR（マンメイドロック）の場合

- ・隣接構造物をモデル化する。



④ 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合

- ・隣接構造物をモデル化しない。



論点Ⅱ－25 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用（4）

2. 隣接構造物のモデル化

- 隣接構造物のモデル化方針を踏まえ、各評価対象設備について隣接構造物のモデル化を検討した。隣接構造物のモデル化（例）を以下に示す。

隣接構造物のモデル化（例）

分類	設備名称	隣接構造物のモデル化方針※2	隣接構造物のモデル化
設計基準対象施設のうち 屋外重要土木構造物	取水槽	①	する（南北断面のみ）
	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	②	する
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	④	しない
	燃料移送系配管ダクト	④	しない
	屋外配管ダクト（復水貯蔵タンク～原子炉建物）	②	する
	取水管	④	しない
	取水口	④	しない
重大事故等対処施設のうち 土木構造物※1	第1ベントフィルタ格納槽	③	する
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	③	する
	緊急時対策所用燃料地下タンク	④	しない
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎※3	—	—
	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）※3	—	—
波及的影響を及ぼすおそれのある施設の うち土木構造物	輪谷貯水槽（西側）	④	しない
	免震重要棟遮蔽壁※3	—	—

※1 設計基準対象施設と兼用する重要S A施設のうち、設計基準対象施設の評価手法と相違がない施設は設計基準対象施設の一覧表に代表して記載。

※2 ①評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

②評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

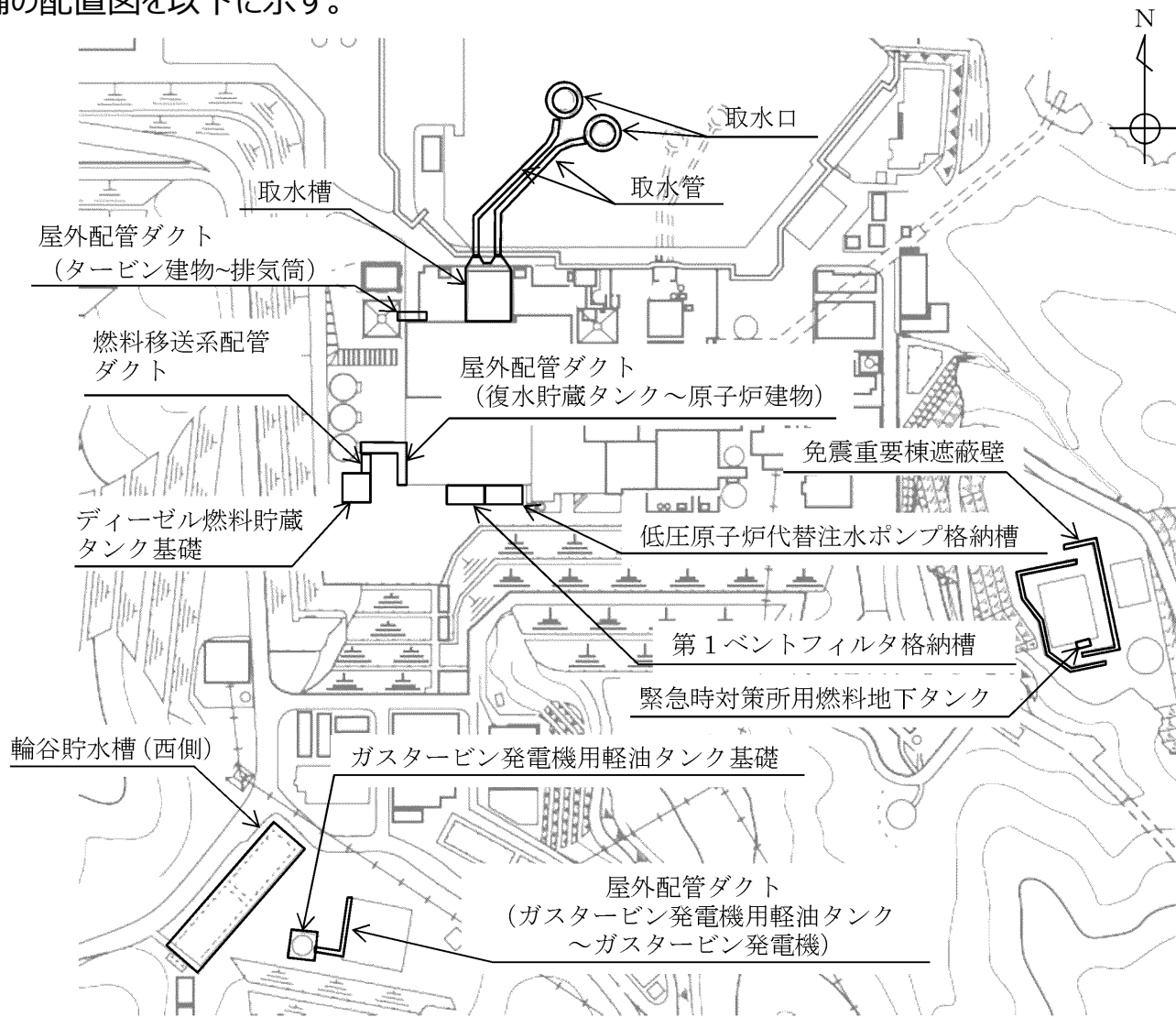
③評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR（マンメイドロック）の場合

④評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な隔離を有する場合

※3 2次元FEM解析による地震応答解析を実施する場合、隣接構造物のモデル化方針によりモデル化を実施する。

論点Ⅱ-25 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化のうち隣接構造物のモデル化の適用(5)

- 評価対象設備の配置図を以下に示す。



評価対象設備 配置図

論点Ⅱ－27 質点系モデル（SRモデル）の適用（1）

■ 耐震設計の論点

【論点Ⅱ－27：質点系モデル（SRモデル）の適用（論点の重み付け：B 3）

○免震重要棟遮蔽壁は地盤～杭基礎のモデルをSRモデル，遮蔽壁を質点系モデルとした地盤～杭基礎～遮蔽壁の連成系モデルにより地震応答解析を行う。

■ 論点に係る説明概要

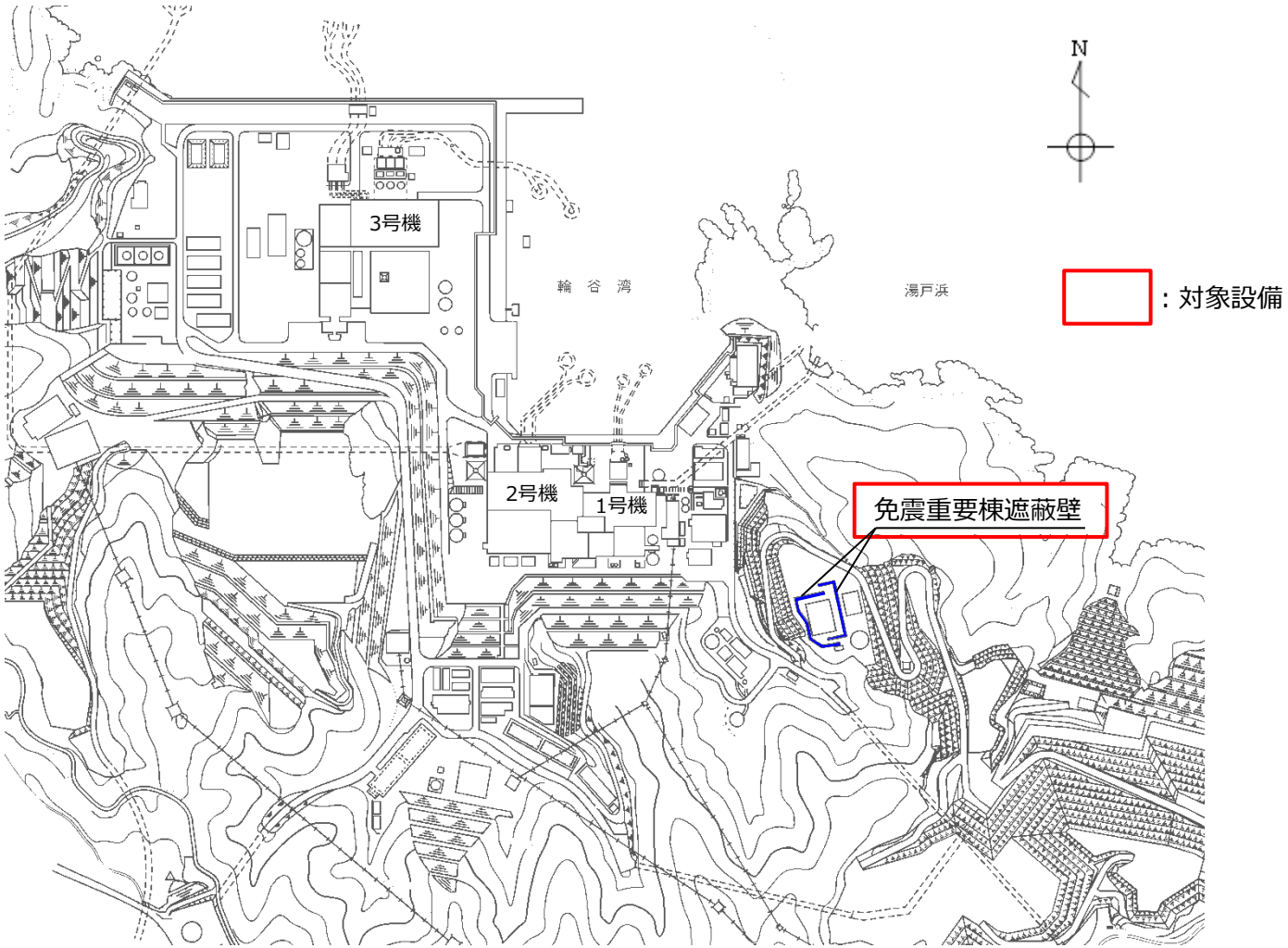
- 免震重要棟遮蔽壁は，「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009」に準拠し，質点系モデル（SRモデル）にて地震応答解析を実施する方針とする。（P.28～30）

■ 先行プラント実績

- 本手法は，東海第二の既工認のうち，使用済燃料乾式貯蔵建屋での適用例があるものの，構造部材の形状や周辺地盤の特性が異なる。

論点Ⅱ-27 質点系モデル (SRモデル) の適用 (2)

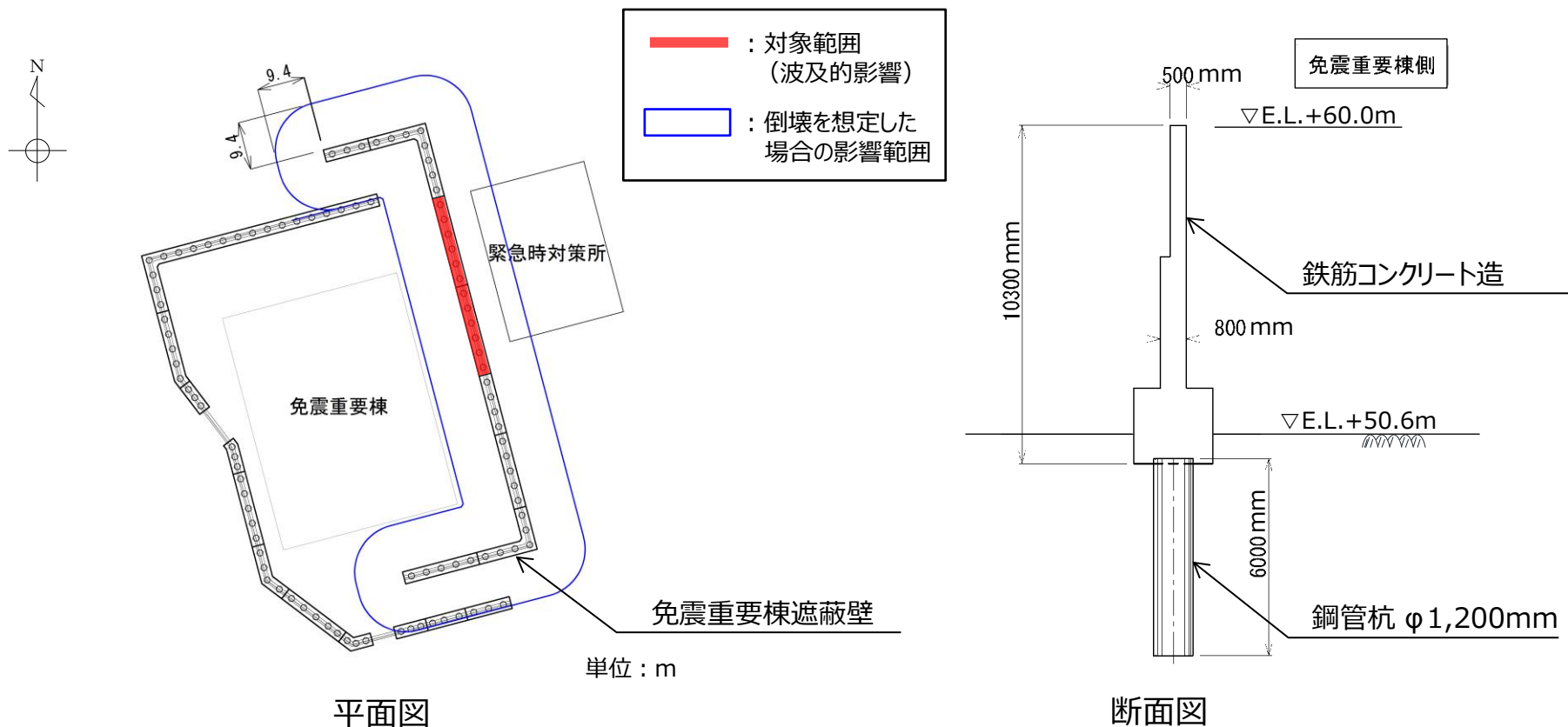
- 免震重要棟遮蔽壁の地震応答解析手法として、質点系モデル (SRモデル) を適用する。
- 評価対象構造物の配置図を以下に示す。



評価対象構造物 配置図

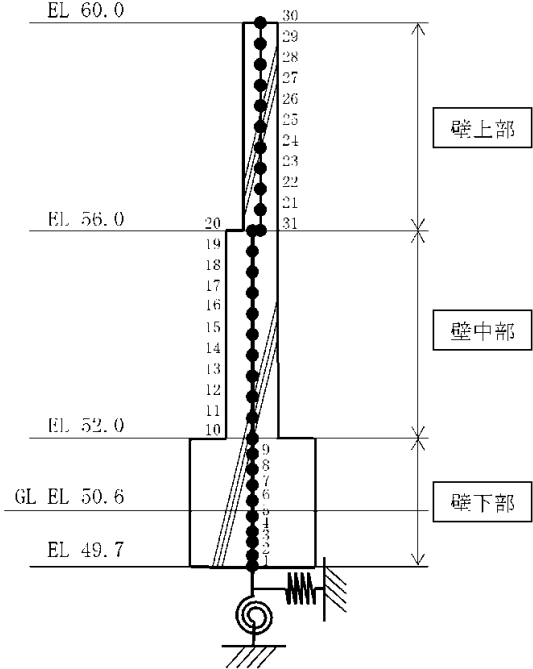
論点Ⅱ-27 質点系モデル（SRモデル）の適用（3）

- 屋外の上位クラス施設である緊急時対策所の周辺には、波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設である免震重要棟遮蔽壁が位置する。
- 免震重要棟遮蔽壁は、免震重要棟廻りに延長約300mに亘り、岩盤上に設置される鉄筋コンクリート造の遮蔽壁であり、このうち緊急時対策所に影響を及ぼすおそれのある範囲は直線状の区間（36m）である。
- 免震重要棟遮蔽壁は、地盤面からの高さが9.4m、厚さは50cm以上であり、杭基礎（鋼管杭）構造である。
- 平面図及び断面図を以下に示す。



論点Ⅱ-27 質点系モデル (SRモデル) の適用 (4)

- 免震重要棟遮蔽壁は、地盤～杭基礎のモデルをSRモデル、遮蔽壁を質点系モデルとした地盤～杭基礎～遮蔽壁の連成系モデルにより地震応答解析を行う。なお、解析に当たっては「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程JEAC4616-2009」を参考とする。
- 免震重要棟遮蔽壁は、同じ構造が連続する線状構造物であるため、単位長さ分を取り出しモデル化する。
- 壁部は、曲げ及びせん断変形が卓越する構造であるため、梁要素でモデル化する。
- 基礎部は、地盤との相互作用を考慮できる地盤ばねでモデル化する。免震重要棟遮蔽壁の基礎形式は杭基礎であるため、杭基礎と地盤の相互作用を考慮できる薄層要素法で地盤ばねを評価する。
- 解析モデル図を以下に示す。



免震重要棟遮蔽壁の解析モデル図