

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-他-212 改01
提出年月日	2022年11月8日

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における多重鋼管杭の  
許容限界の妥当性他

2022年11月

中国電力株式会社

## 目次

今回提出範囲：

### 1. 概要

### 2. 多重鋼管杭の許容限界の妥当性

#### 2.1 概要

##### 2.1.1 多重鋼管杭の構造概要及び設計概要

#### 2.2 水平載荷実験

##### 2.2.1 実験概要

##### 2.2.2 実験方法

##### 2.2.3 実験結果

##### 2.2.4 実験結果のまとめ

#### 2.3 3次元FEM解析による実験の再現解析

##### 2.3.1 概要

##### 2.3.2 評価フロー

##### 2.3.3 解析用物性値の設定

##### 2.3.4 解析モデル及び諸元

##### 2.3.5 解析結果

##### 2.3.6 3次元FEM解析モデルの妥当性評価

#### 2.4 実構造物スケールにおける3次元FEM解析

##### 2.4.1 概要

##### 2.4.2 解析用物性値の設定

##### 2.4.3 解析モデル及び諸元

##### 2.4.4 実構造物スケールの降伏モーメント

##### 2.4.5 解析結果

#### 2.5 まとめ

(参考1) 中詰コンクリートによる最大荷重への影響

(参考2) 中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の圧縮強度試験結果

(参考3) 多重鋼管杭の一体挙動特性の把握

### 3. 既設護岸と新設コンクリートの一体性確認

#### 3.1 概要

#### 3.2 鉄筋の引張耐力確認方針

#### 3.3 模型実験

##### 3.3.1 実験方法

##### 3.3.2 模型実験結果

#### 3.4 付着力試験

#### 3.5 まとめ

## 2. 多重鋼管杭の許容限界の妥当性

### 2.1 概要

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の多重鋼管杭は、径の異なる4本または3本の鋼管杭を外側から内側に多重で建て込み、鋼管間はモルタルで充填し、最内管内にはコンクリートを地表面付近まで打設している。設置変更許可審査においては、類似する構造である東海第二発電所の鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁と防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造上の相違点として、多重鋼管杭を採用すること及び鋼管杭の許容限界に降伏モーメントを設定することを抽出し、設工認段階において説明することとしている。防波壁（多重鋼管杭式擁壁）に係る設置変更許可審査からの申送り事項を表2.1-1に示す。

設計では、「道路橋示方書（平成14年3月）」（以下「道路橋示方書」と言う。）を基に降伏モーメントを許容限界とする方針としている。なお、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）は安全側の設計とするため設計上考慮しない。

本資料では、「道路橋示方書」を基に降伏モーメントを許容限界として用いることについて、多重鋼管杭の水平載荷実験及び実構造物スケールの3次元FEM解析を行うことにより確認し、多重鋼管杭の許容限界の妥当性を説明する。図2.1-1に検討フローを示す。

なお、申送り事項のうち、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の背後に設置する改良地盤の施工範囲及び仕様、並びに鋼管杭間のセメントミルクの評価については、今後、「NS2-補-027-08 浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料」のうち、「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の耐震性についての計算書に関する補足説明」にて説明する。

表 2.1-1 多重鋼管杭に係る申送り事項

設置変更許可審査における指摘事項	回答方針 (下線部は本資料による説明内容)
<p>1. 東海第二発電所の鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の設計方針を適用しているが、許容限界、セメントミルクの位置付け等、違いがある項目については選定理由を資料に記載の上説明すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設置変更許可審査において、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）と他プラントの津波防護施設との相違点として、多重鋼管杭の採用、<b>「道路橋示方書」</b>に基づく許容限界（降伏モーメント等）の設定、鋼管杭間のセメントミルクによる止水性確保を抽出し、設計への反映事項を整理した。</li> </ul>
<p>2. 今回指摘した島根特有の技術的課題については、事業者自らが提示する課題であり、先行炉の課題解決のプロセスが考慮されるべきものであるため、今後の説明においては今回の指摘事項と先行炉の実績を踏まえて資料を十分に作り込んで提出して説明すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設計への反映事項のうち、設工認段階で説明することとして申し送った<u>多重鋼管杭の許容限界の妥当性について、多重鋼管杭の水平載荷試験及び3次元静的FEM解析を用いて説明する。</u></li> <li>・また、岩盤根入れ部の鋼管杭間に注入するセメントミルクの位置付け当については、設置変更許可審査での説明を踏まえて、「NS2-補-027-08 浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料」において説明する。</li> </ul>

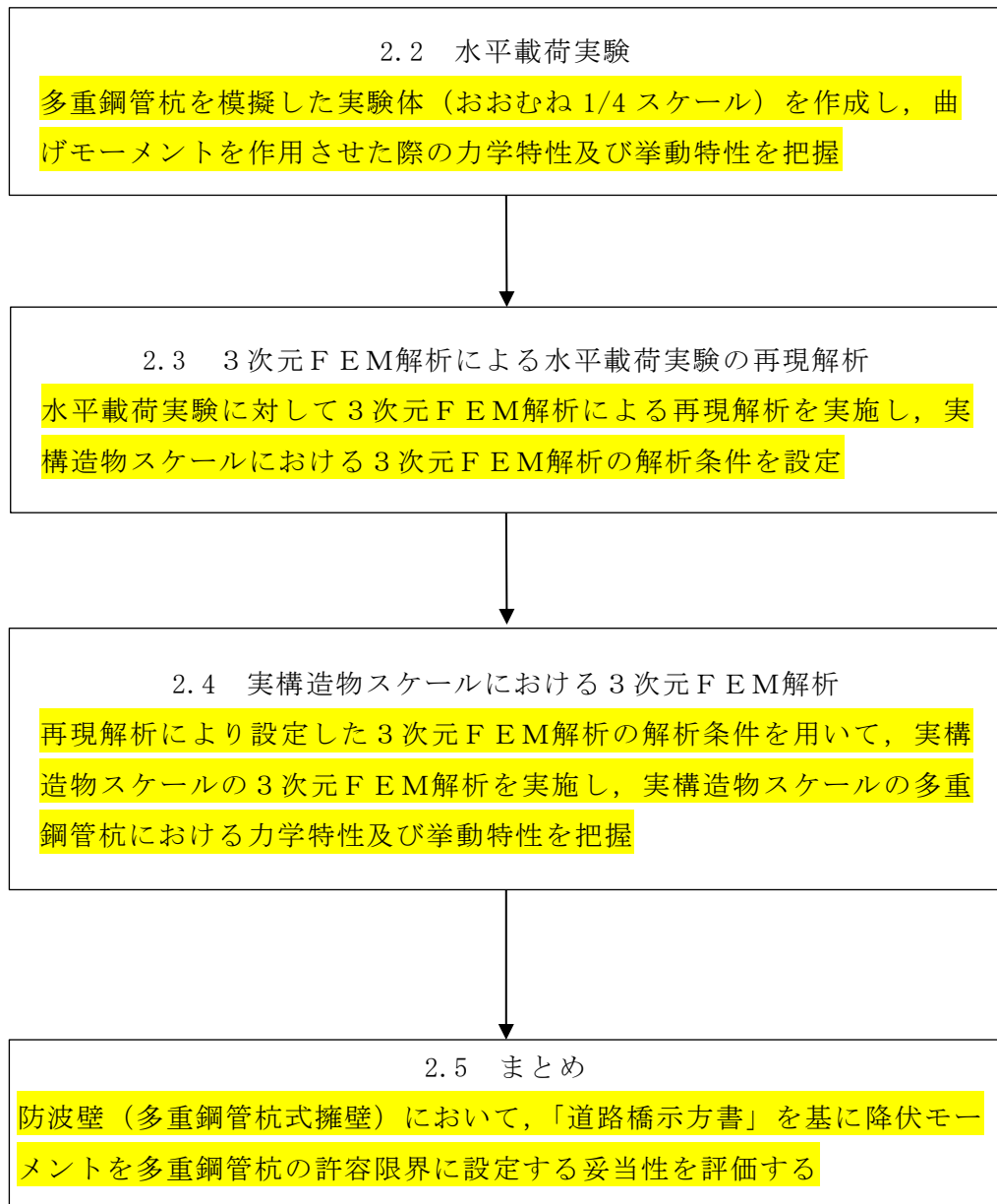


図 2.1-1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における多重鋼管杭の許容限界の妥当性検討フロー

### 2.1.1 多重鋼管杭の構造概要及び設計概要

多重鋼管杭は、図 2.1-2 の構造概要図で示すとおり、径の異なる 4 本または 3 本の鋼管杭を外側から内側に多重で建て込み、鋼管間はモルタルで充填し、最内管内にはコンクリートを地表面付近まで打設している。施工中の杭頭部の状況を図 2.1-3 に示す。

多重鋼管杭の設計においては、「道路橋示方書」を基に降伏モーメントを許容限界とし、耐震評価及び耐津波評価を実施する方針とした。

中詰コンクリート及びモルタル（充填材）は設計上考慮していないが、これらを施工することで、多重鋼管杭に曲げモーメントが作用した際に、多重鋼管杭の局部座屈の進行を抑制し、延伸度が向上されることにより、局部座屈が発生後も直ちに耐力が低下しない粘り強い構造を有している（参考 1 参照）。

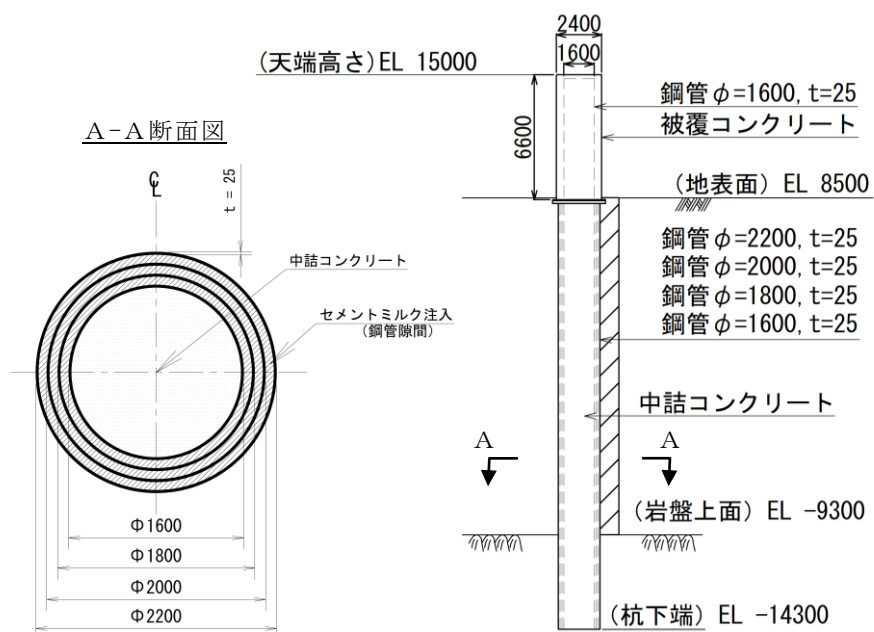
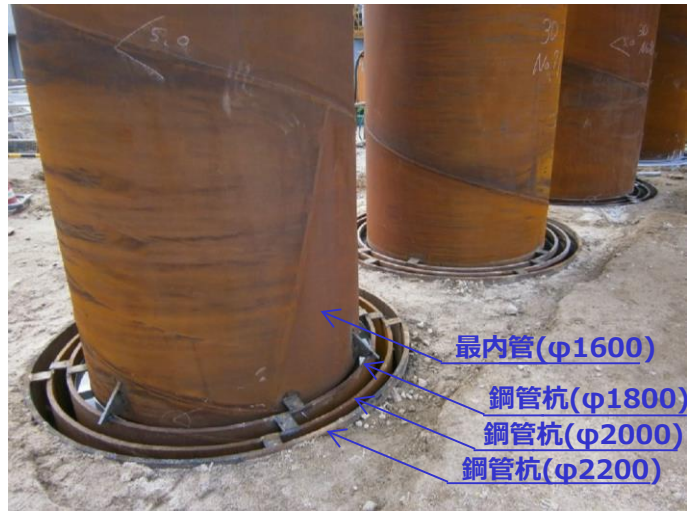


図 2.1-2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造概要図



多重鋼管杭建込み状況

(モルタル(充填材)打設前)

図 2.1-2(1) 杭頭部の状況



多重鋼管杭建込み状況

(モルタル(充填材)打設後)

図 2.1-2(2) 杭頭部の状況

## 2.2 水平載荷実験

### 2.2.1 実験概要

現地に施工された、鋼管杭、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）で構成される多重鋼管杭を模擬した実験体を製作し、曲げモーメントを作用させた際の力学特性及び挙動特性を把握する。なお、力学特性及び挙動特性に関してスケール効果の影響が小さいことから、おおむね 1/4 スケールで模擬する。

水平載荷実験で使用する実験体で模擬する範囲を図 2.2-1 に示す。水平載荷実験においては、実構造物のうち杭下端から杭頭部までの範囲を模擬した実験体を製作する。

多重鋼管杭の降伏モーメントは、「道路橋示方書」を基に鋼管杭 1 本当たりの降伏モーメントを合算した値とし、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）は考慮しない。実験体の降伏モーメントの算出方法を表 2.2-1 に示す。

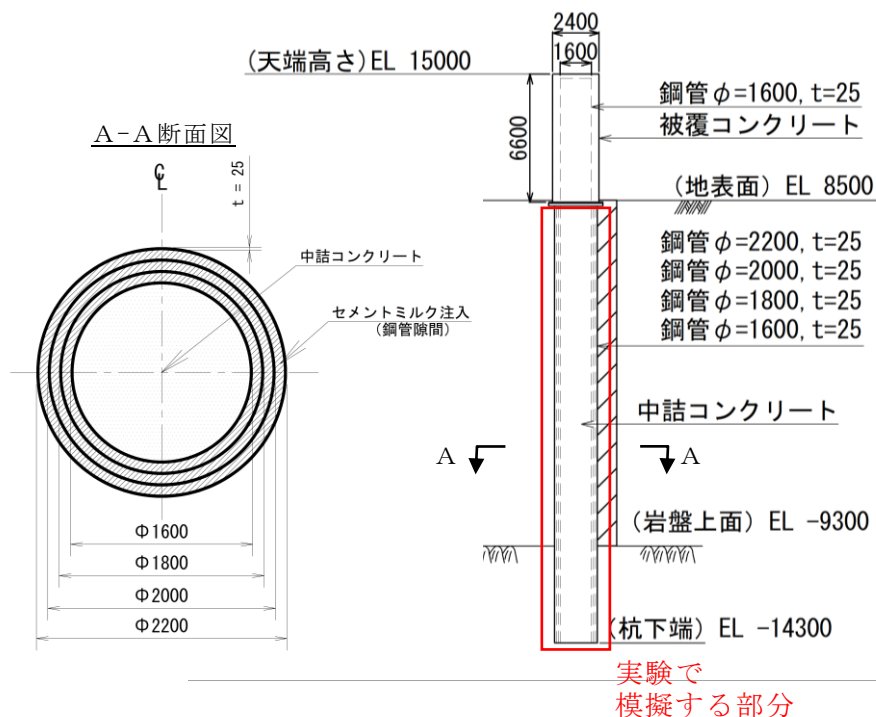


図 2.2-1 水平載荷実験で使用する実験体で模擬する範囲



表 2.2-1 実験体の降伏荷重の算出方法

杭径 (mm)	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	肉厚 (mm)	断面係数 (cm <sup>3</sup> )	降伏モーメント (kN・m)		アーム長 (mm)	降伏荷重 (kN)
φ 528	400	6	1270	508	1528	2800	546
φ 480			1046	418			
φ 432			843	337			
φ 384			663	265			

降伏モーメント :  $M_y = (\sigma_y - N/A) Z_e$

$M_y$  : 降伏モーメント (kN・m)

$N$  : 作用軸力 (kN)

$\sigma_y$  : 鋼材の強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$Z_e$  : 鋼管の断面係数 (m<sup>3</sup>)

$A$  : 鋼管の断面積 (m<sup>2</sup>)

上記により算出した降伏モーメントをアーム長（固定端から荷重の載荷位置までの距離）で除すことで、降伏モーメントに相当する荷重（以下「降伏荷重」と言う。）を算出する。

降伏荷重 :  $P_y = M_y/L$

$P_y$  : 降伏荷重 (kN)

$M_y$  : 降伏モーメント (kN・m)

$L$  : アーム長 (m)

## 2.2.2 実験方法

### a. 実験体

実験体は鋼管，中詰コンクリート及びモルタル（充填材）から構成され，実験体の寸法は実構造物のおおむね1/4スケールとし，材料強度は同等の材料を使用する。表 2.2-2 に実構造物及び実験体の使用材料を示す。

表 2.2-2 実構造物及び実験体の使用材料

材料	仕様	
	実構造物	実験体（1/4スケール）
構造	4重管	4重管
	φ2200	φ528
	φ2000	φ480
	φ1800	φ432
	φ1600	φ384
材質	鋼管 SKK490	鋼管 SM490A
肉厚	25mm	6mm
引張強度	490N/mm <sup>2</sup> 以上	490N/mm <sup>2</sup> 以上
降伏強度	315N/mm <sup>2</sup> 以上	315N/mm <sup>2</sup> 以上
中詰コンクリート 一軸圧縮強度	24N/mm <sup>2</sup> 以上	24N/mm <sup>2</sup> 以上
モルタル（充填材） 一軸圧縮強度	24N/mm <sup>2</sup> 以上	24N/mm <sup>2</sup> 以上

図 2.2-2 に実験体を示す。また、図 2.2-3 に実験体構造図を示す。



図 2.2-2 実験体

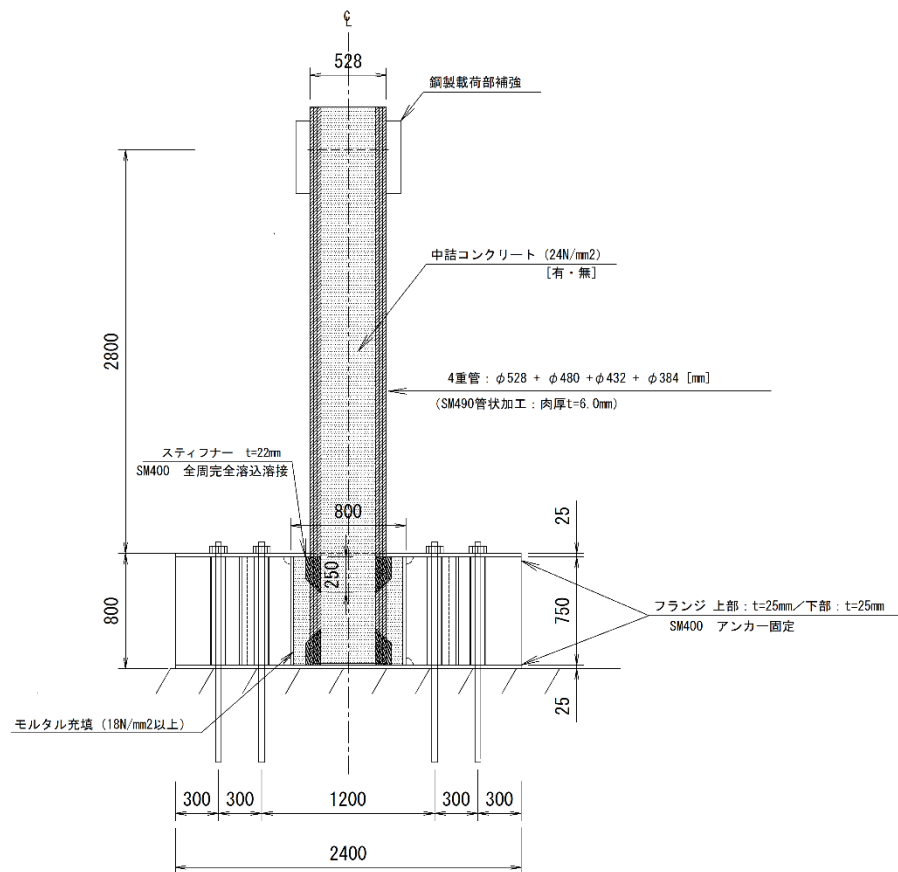


図 2.2-3 実験体構造図

b. 実験ケース

実験は、表 2.2-3 に示す 2 ケースについて行う。なお、各実験ケースにおける実験体の仕様は同一とする。

実験ケース①では、水平一方向に載荷することにより、多重鋼管杭の挙動特性及び力学特性を確認する。多重鋼管杭の挙動特性及び力学特性を把握する上で製作過程におけるばらつきの影響を抑制するために、3つの実験体を製作する。

実験ケース②では、地震動による繰返し荷重が多重鋼管杭に与える影響を確認するために正負交番載荷を実施する。その後、実験ケース①と同様に水平一方向載荷する。

各実験ケースの実験体の諸元を図 2.2-4 に示す

表 2.2-3 実験ケース

実験ケース	鋼管構造	中詰コンクリート	載荷方法	実験数
①	4重管 φ 528 φ 480	有	水平一方向載荷	3
②	φ 432 φ 384	有	正負交番載荷後 水平一方向載荷	1

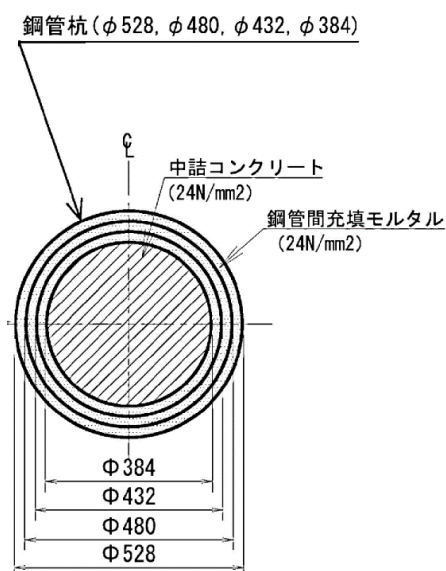


図 2.2-4 実験体の諸元

c. 荷荷方法

実験体及び荷荷装置の概要図として図 2.2-5 に、荷荷状況を図 2.2-6 に示す。

(a) 水平一方向荷荷

実験ケース①において、高さ 2800mm の位置で水平に設置した 2000kN 油圧ジャッキにより、最大荷重が確認されるまで水平一方向に荷荷する。

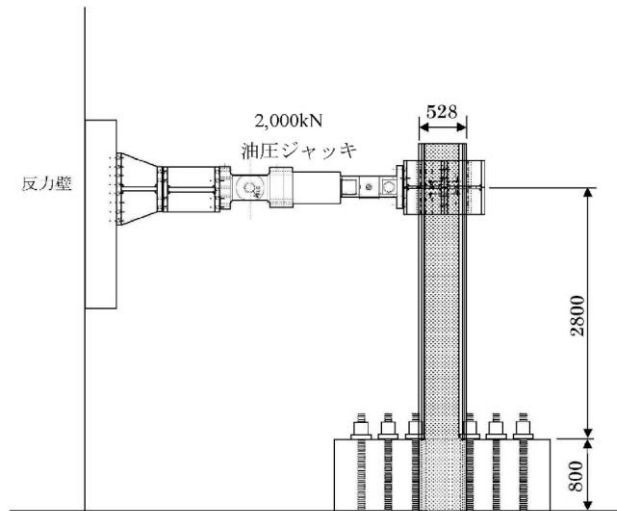


図 2.2-5 実験体及び荷荷装置



図 2.2-6 荷荷状況

(b) 正負交番载荷

実験ケース②において、地震動による繰返し荷重の作用が多重鋼管杭の耐力に与える影響を確認するため、正負交番载荷を実施する。正負交番载荷は図 2.2-7 及び表 2.2-4 に示すように、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$  をそれぞれ 3 回繰返し载荷する。その後、実験ケース①と同様に最大荷重が確認されるまで水平一方向载荷し、正負交番载荷後の多重鋼管杭の耐力を確認する。

$\delta_y$  は実験ケース①より得られた多重鋼管杭の最外管の降伏時変位を指す。鋼管杭の降伏判定は、 $\sigma = E \cdot \varepsilon_y$  より得られる計算上  $\varepsilon_y$  (降伏ひずみ) に到達した時点とした。

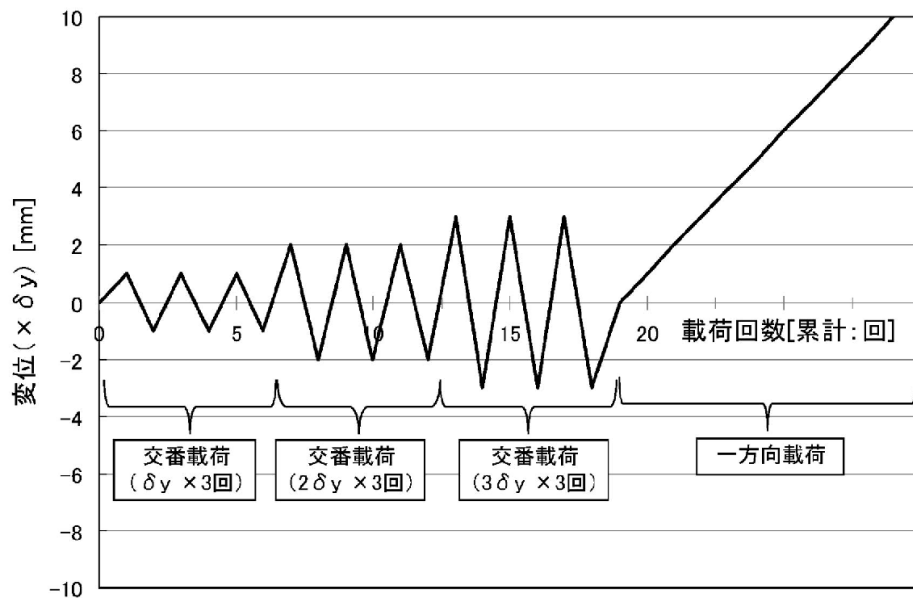


図 2.2-7 正負交番载荷の方法

表 2.2-4 正負交番载荷の振幅

	$1\delta_y$	$2\delta_y$	$3\delta_y$
正負交番载荷の振幅	15mm	30mm	45mm

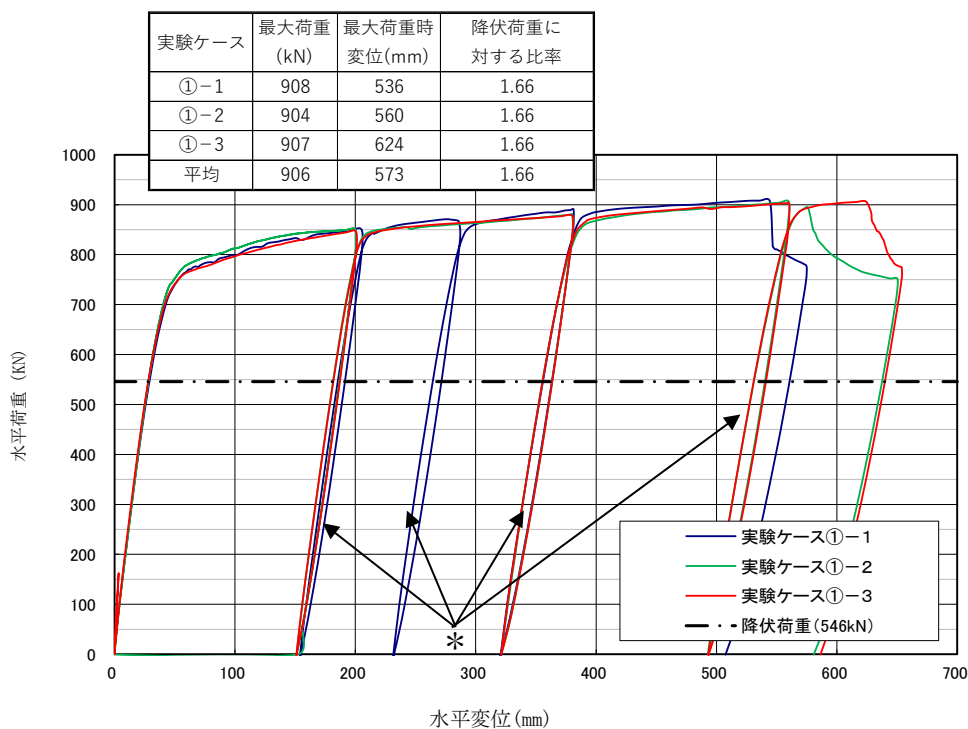
d. 計測方法

計測は荷重計及び変位計により実施し、荷重計及び変位計は载荷位置に設置する。

### 2.2.3 実験結果

#### a. 実験ケース①（水平一方向載荷）

実験ケース①の水平荷重と水平変位の関係を図 2.2-8 に、実験終了時の状況を図 2.2-9～11 に示す。降伏荷重に至るまで弾性挙動を示していることを確認した。降伏荷重の 1.2 倍付近で最外管の圧縮縁に局部座屈が発生した後に、荷重は緩やかに増加し、最大荷重到達後に最外管の引張縁で破断が生じて荷重が低下した。なお、本実験においては、荷重作用位置の水平変位 530～620mm で最大荷重 904～908kN となり、降伏荷重 546kN に対して 3 つの実験体の平均で 1.66 倍であった。



注記\*：実験装置の制約上、水平変位 200mm までしか載荷できないため、荷重低下が確認されない場合には一度除荷し、調整材（100～200mm）を設置後に載荷を継続した。

図 2.2-8 水平荷重と水平変位の関係（実験ケース①）

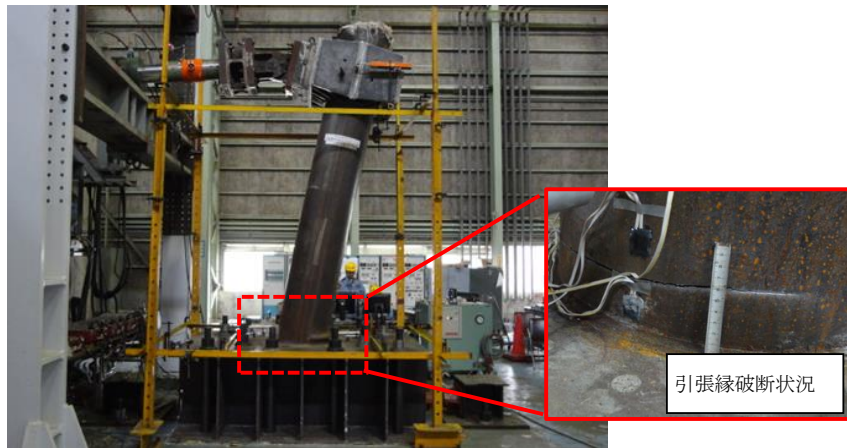


図 2.2-9 水平載荷実験終了時の状況（実験ケース①-1）



図 2.2-10 水平載荷実験終了時の状況（実験ケース①-2）

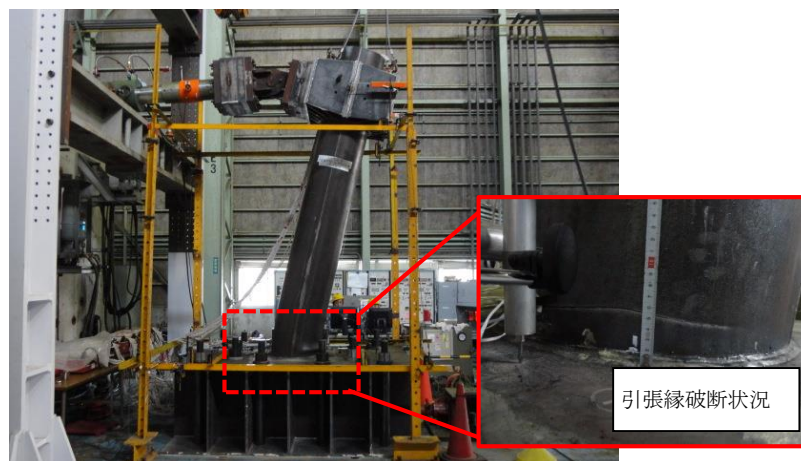
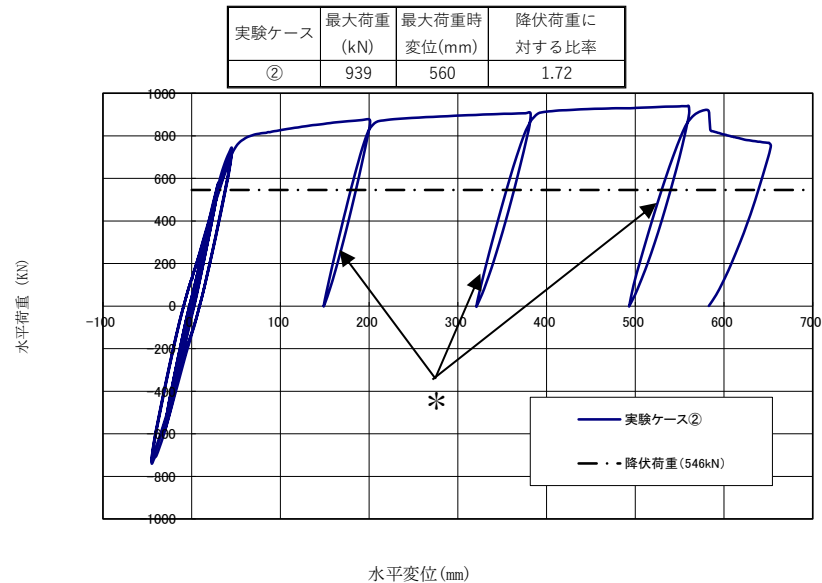


図 2.2-11 水平載荷実験終了時の状況（実験ケース①-3）



b. 実験ケース②（正負交番载荷）

実験ケース②の水平荷重と水平変位の比較関係を図 2.2-12 に、実験終了時の状況を図 2.2-13 に示す。降伏荷重に至るまで弾性挙動を示していることを確認した。実験ケース①と同様に降伏荷重の 1.2 倍付近で最外管に局部座屈が発生した後に、荷重は緩やかに増加し、最大荷重到達後に最外管の引張縁で破断が生じて荷重が低下した。なお、本実験においては、荷重作用位置の水平変位 560mm で最大荷重 939kN となり、降伏荷重 546kN に対して、1.72 倍であった。



注記\*：実験装置の制約上、水平変位 200mm までしか載荷できないため、荷重低下が確認されない場合には一度除荷し、調整材（100～200mm）を設置後に載荷を継続した。

図 2.2-12 水平荷重と水平変位の関係（実験ケース②）



図 2.2-13 水平載荷実験終了時の状況（実験ケース②）

#### 2.2.4 実験結果のまとめ

- 実験ケース①（水平一方向載荷）より，多重鋼管杭の力学特性としては，「道路橋示方書」を基にした降伏モーメントを上回る耐力を有していることを確認した。
- 実験ケース①（水平一方向載荷）より，多重鋼管杭の挙動特性としては，降伏モーメントに至るまでは弾性挙動を示すことを確認した。
- 実験ケース②（正負交番載荷）より，繰返し荷重を作用させることによる多重鋼管杭の耐力への影響については，降伏モーメントに至るまで弾性挙動を示すことから，実験ケース①（水平一方向載荷）により確認された挙動特性及び力学特性と同等であることを確認した。

## 2.3 3次元FEM解析による実験の再現解析

### 2.3.1 概要

水平載荷試験は実構造物に対して1/4スケールで実施しているため、実構造物スケールにおける多重鋼管杭の許容限界について3次元FEM解析を用いて確認する。実構造物スケールにおける3次元FEM解析の解析条件の設定に当たり、水平載荷試験に対する再現解析を実施する。

### 2.3.2 評価フロー

水平載荷試験の実験体を再現した解析モデルを用いて3次元FEM解析を実施し、水平載荷試験結果と比較することで解析条件及び解析モデルの妥当性を評価する。3次元FEM解析の評価フローを図2.3-1に示す。

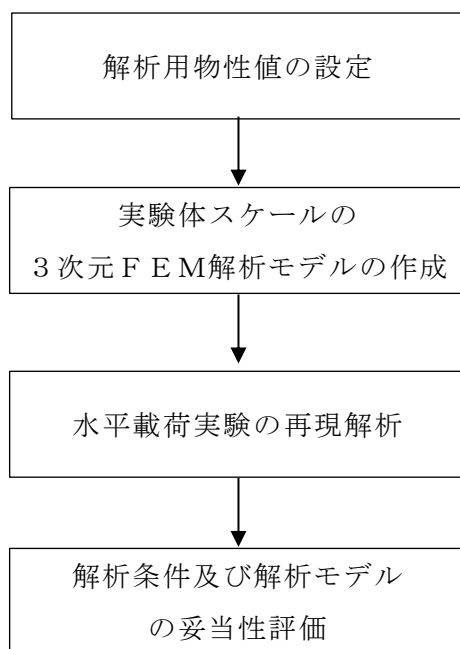


図 2.3-1 水平載荷試験に対する再現解析の評価フロー

### 2.3.3 解析用物性値の設定

#### a. 中詰コンクリート及びモルタル（充填材）

表 2.3-1 に中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の解析用物性値を示す。圧縮強度は実験体打設時に採取した供試体の強度実験結果（参考 2 参照）を用い、その他の物性値は「コンクリート標準示方書（土木学会，2007 年改定）」により設定する。ただし、中詰コンクリートの弾性係数は設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  に基づき設定し、モルタル（充填材）は強度試験結果から中詰コンクリート以上の強度を有しているが、厚さが薄く影響が小さいことから中詰コンクリートと同等とした。

表 2.3-1 中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の解析用物性値

材料	弾性係数	一軸圧縮強度	ポアソン比
中詰コンクリート	$2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$	$29\text{N/mm}^2$	0.2
モルタル（充填材）	$2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$	$53\text{N/mm}^2$	0.2

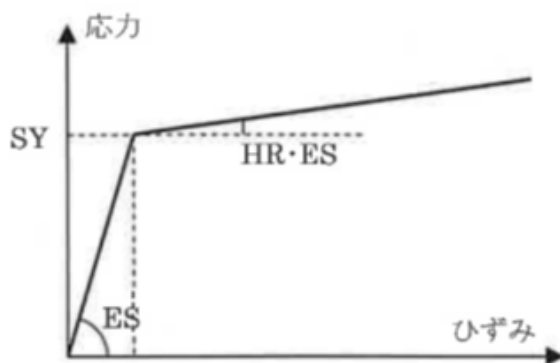
b. 鋼材

表 2.3-2 に鋼材の解析用物性値を示す。解析においては、降伏モーメントを超え、多重鋼管杭が破壊するまで行った実験を再現するため、鋼材の応力-ひずみ関係には図 2.3-2 に示すバイリニアモデルを用いる。

ここで、鋼材の降伏強度については「軸力と水平力を受ける鉄骨系柱材の弾塑性挙動に関する研究，津田圭吾，九州大学博士論文（建築），1993 年）」によると、水平載荷実験で使用した実験体と同程度の径厚比で、ほとんど軸力が発生しない場合の全塑性モーメントは 0.9 倍になるとされている。水平載荷実験の再現を行うことで解析条件の妥当性を確認するとの目的を踏まえ本解析における降伏強度は鋼材の材料実験結果から得られた降伏強度を 0.9 倍して用いる。また、鋼管の剛性低下率は材料実験結果から算出する。

表 2.3-2 鋼材の解析用物性値

	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	剛性 低下率
ケース①	4重管 φ528	6.0	2.08×10 <sup>5</sup>	0.3	360	0.004
	φ480					
ケース②	φ432					
	φ384					



剛性低下率 (HR) はバイリニアモデルの第2折線の勾配を指す係数で、弾性係数に対する比で表される。  
 HR：剛性低下率  
 SY：全塑性モーメント  
 ES：鋼材の弾性係数

図 2.3-2 解析で適用するバイリニアモデル

c. 鋼管と中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の境界設定

鋼管と中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の境界設定に用いる解析用物性値を表 2.3-3 に示す。鋼管と中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の付着強度として「水平力を受ける鋼管・コンクリート複合構造橋脚の挙動評価（土木学会論文集 Vo. 648/V-47, 89-108, 2000.5）」で得られた結果を用いる。本論文では、コンクリートと鋼管の間で生じる付着強度を実験的に確認するとともに、得られた付着強度を用いて、水平力を受けた鋼管及びコンクリートの複合構造体（鋼管内部をコンクリートにより中詰めする）の挙動を解析的に再現している。

本解析モデルにおいては、鋼管と中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の境界要素に付着強度を設定する。なお、付着強度以上の応力が発生した場合には剥離し、剥離後は鋼管とコンクリートの境界で生じる摩擦抵抗は考慮しない。

なお、耐震計算書及び強度計算書において、鋼管杭の照査として2次元動的FEMを実施しており、被覆コンクリート壁の照査として2次元動的FEMで抽出した応答を用いて3次元静的FEMを実施している。2次元動的FEMにおける多重鋼管杭は、はり要素でモデル化し、鋼管杭のみの剛性を考慮する。中詰コンクリート及びモルタル（充填材）はモデル化せず、自重を考慮するため境界設定を行わない。3次元静的FEMにおける多重鋼管杭は、シェル要素で鋼管杭をモデル化し、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）はモデル化せず自重を考慮するため、境界設定を行わない。本解析は、水平載荷実験の再現を行うことで解析条件の妥当性を確認することが目的であることを踏まえ、鋼管とコンクリートの境界には付着強度を設定する。

表 2.3-3 鋼管とコンクリートの境界設定に用いる解析用物性値

付着強度
0.49N/mm <sup>2</sup>

### 2.3.4 解析モデル及び諸元

実験体の3次元モデルを図2.3-3に示す。

#### a. 構造物のモデル化

鋼管杭は3次元シェル要素でモデル化する。

中詰コンクリート及びモルタル（充填材）はソリッド要素でモデル化する。

#### b. 荷重方法

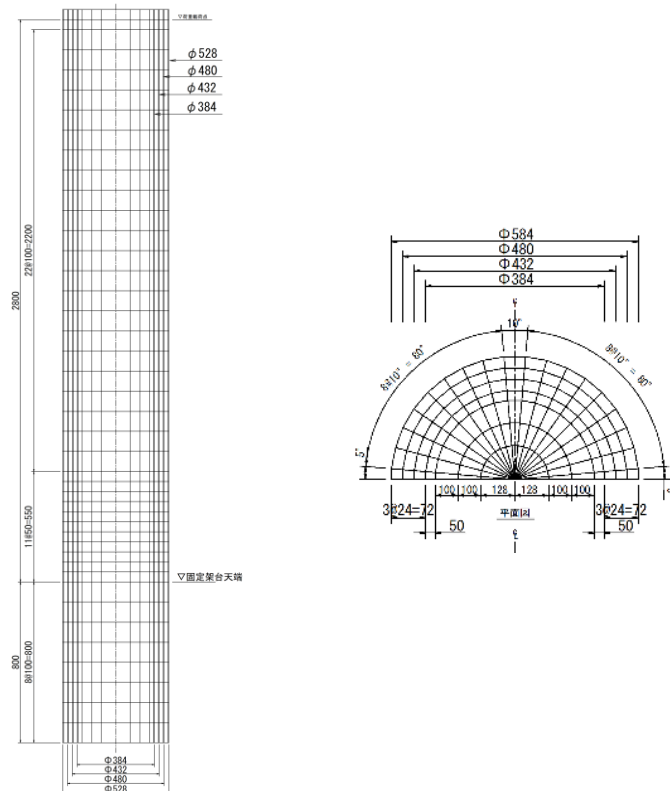
水平荷重実験では、実験体下端は実験架台により拘束しているため、モデル底面及び実験架台天端までの側面は完全拘束とする。

#### c. 境界条件及び荷重条件

多重鋼管杭が降伏モーメントに達する荷重等を参考に荷重増分法で荷重する。

#### d. 解析コード

解析コードは「FINAL」を使用する。



正面図（断面）

図 2.3-3 3次元FEM解析モデルの概形

### 2.3.5 解析結果

実験ケース①及び②の実験結果と3次元FEM解析の荷重－変位関係の比較を図2.3-4及び図2.3-5に示す。解析結果は、実験結果とおおむね同じ挙動を示し、降伏荷重に至るまで弾性挙動を示していることを確認した。なお、実験ケース①の再現解析結果については、最大荷重908kNとなり、実験時の最大荷重平均値906kNに対して、同等の結果であった。実験ケース②の再現解析結果についても、最大荷重930kNとなり、実験時の最大荷重939kNに対して、同等の結果であった。

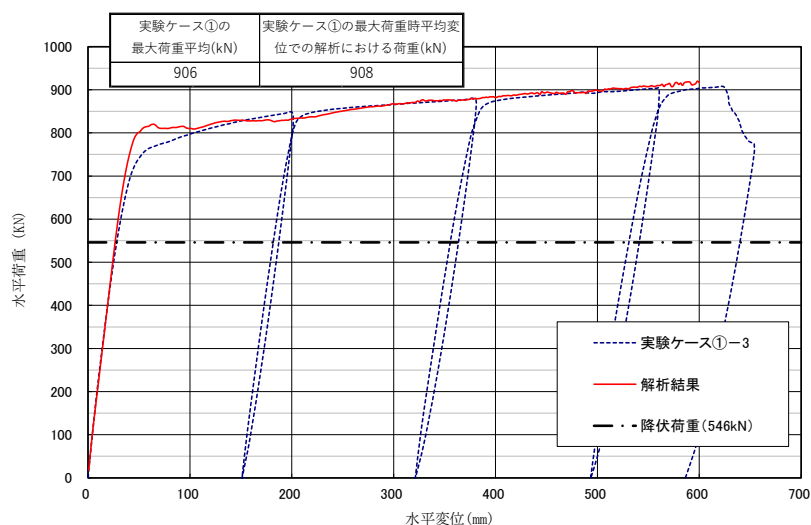


図 2.3-4 実験ケース①と3次元FEM解析の荷重－変位関係の比較

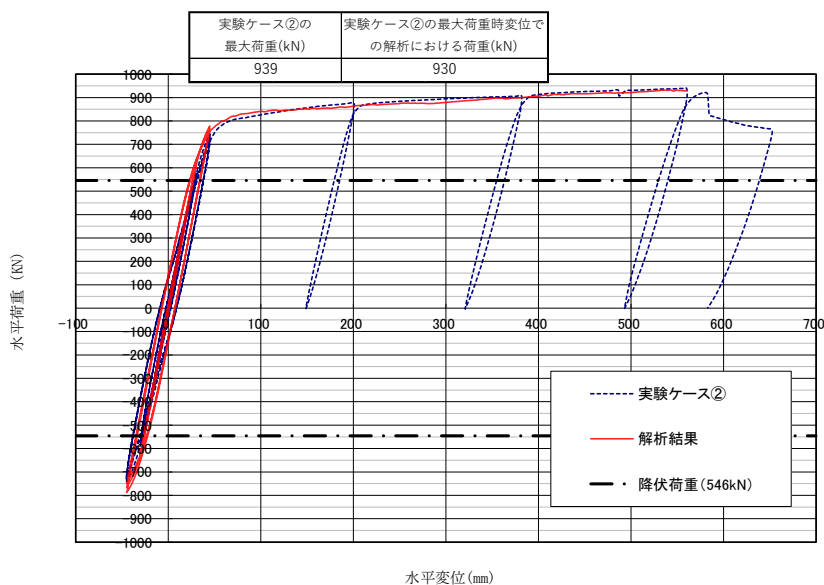


図 2.3-5 実験ケース②と3次元FEM解析の荷重－変位関係の比較



実験ケース①の解析結果のうち，許容限界として用いる降伏モーメント到達時点及び塑性化が進行した時点における鋼管杭及び中詰コンクリートの応力状態を示す。

追而

#### 2.3.6 3次元FEM解析モデルの妥当性評価

水平載荷実験の多重鋼管杭の挙動特性及び力学特性をおおむね再現するとともに、多重鋼管杭の耐力が実験値と解析値でおおむね一致することを確認した。本検討で得られた解析条件を用いて実構造物スケールの3次元FEM解析を行い、実構造物の設計の許容限界として降伏モーメントを設定する妥当性検討を行う。

## 2.4 実構造物スケールにおける3次元FEM解析

### 2.4.1 概要

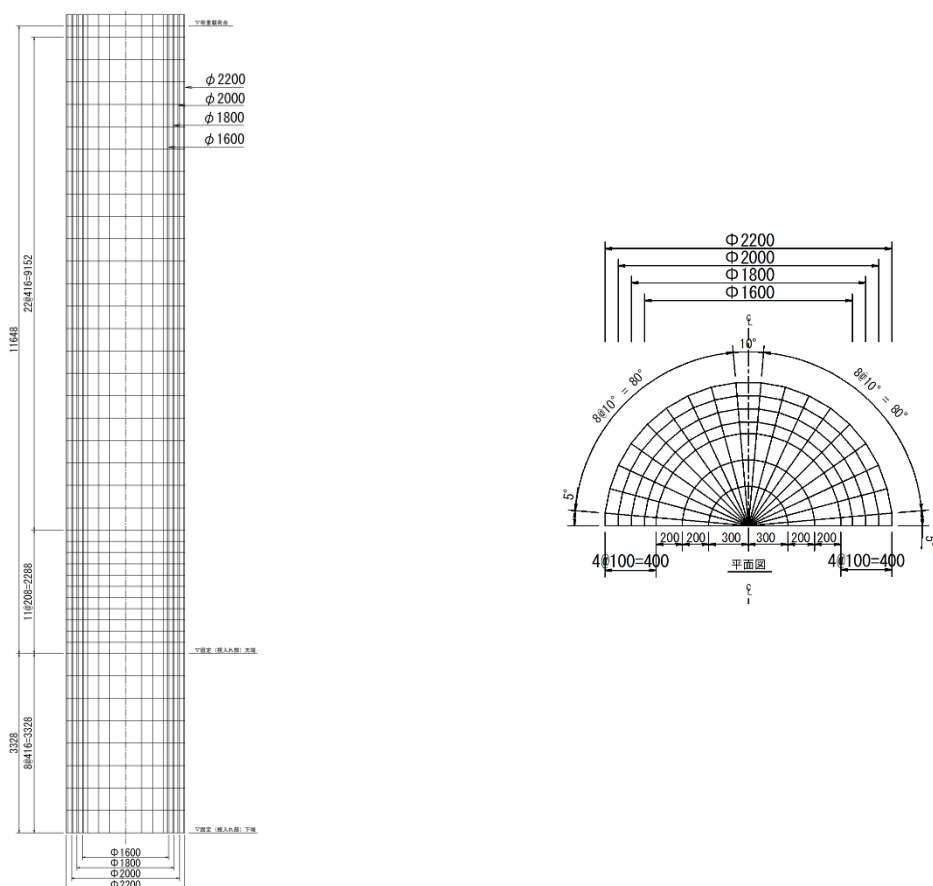
「2.3 3次元FEM解析による実験の再現解析」の検討結果より、実験の再現解析で使用した条件を用いて、実構造物スケールの多重鋼管杭の設計に用いる許容限界の妥当性を確認する。

### 2.4.2 解析用物性値の設定

「2.3 3次元FEM解析による実験の再現解析」の条件と同様とする。

### 2.4.3 解析モデル及び諸元

実構造物の3次元モデルを図2.4-1に3次元FEM解析モデルを示す。各種条件は「2.3 3次元FEM解析による実験の再現解析」の条件と同様とする。



正面図（断面）

図 2.4-1 3次元FEM解析モデル

#### 2.4.4 実構造物スケールの降伏モーメント

実構造物スケールの降伏モーメントの算出方法を表 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 実構造物スケールの降伏荷重の算出方法

杭径 (mm)	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	肉厚 (mm)	断面係数 (cm <sup>3</sup> )	降伏モーメント (kN・m)		アーム長 (mm)	降伏荷重 (kN)
φ 2200	400	25	91842	36737	110583	11648	9494
φ 2000			75643	30257			
φ 1800			61015	24406			
φ 1600			47958	19183			

#### 2.4.5 解析結果

実構造物の解析結果を図2.4-2に示す。実験及び実験の再現解析結果と同様に、降伏荷重に至るまでは弾性挙動を示すことが確認された。なお、本解析においては、荷重作用位置の水平変位 2369mm で最大荷重 15830kN となり、降伏荷重 9494kN に対して、1.67 倍であった。

実構造物スケールにおける3次元FEM解析による結果より、「道路橋示方書」を基にした降伏モーメントに至るまでは、多重鋼管杭は弾性挙動を示しており、降伏モーメントを上回る耐力を有していることを確認した。

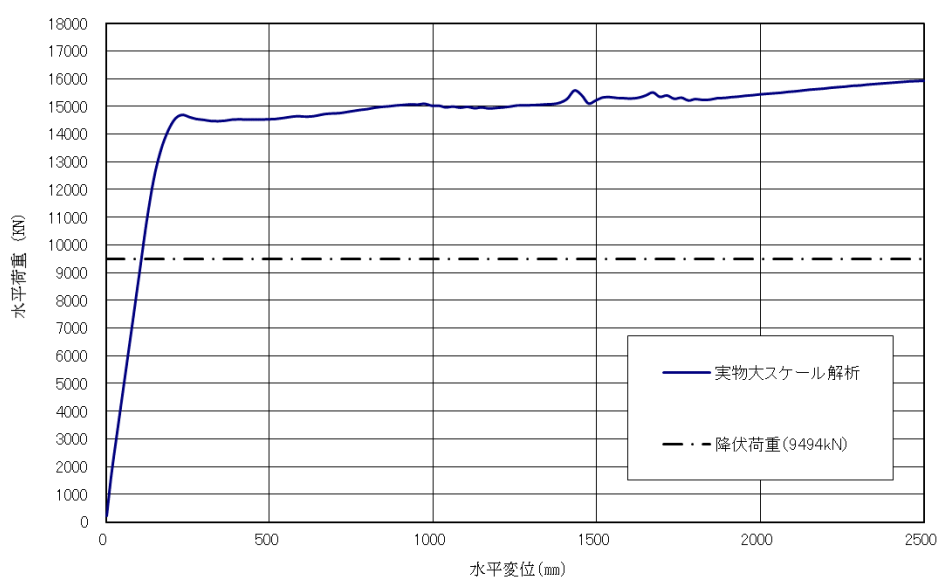


図 2.4-2 3次元FEM解析の荷重－変位関係の比較

実構造物スケールの解析結果のうち、許容限界として用いる降伏モーメント到達時点及び塑性化が進行した時点における鋼管杭及び中詰コンクリートの応力状態を示す。

追而

## 2.5 まとめ

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の設計における多重鋼管杭の許容限界について、水平載荷実験結果及び実構造物スケールの3次元FEM解析の結果から、以下の事項を確認した。

- ・多重鋼管杭は、「道路橋示方書」を基にした降伏モーメントを上回る耐力を有している。
- ・多重鋼管杭は、載荷開始から「道路橋示方書」を基にした降伏モーメントに至るまでは弾性挙動を示す。

以上より、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の設計において地震後及び津波後の再使用性を確保できるため、「道路橋示方書」を基に降伏モーメントを許容限界として設定することは妥当である。

また、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）により、鋼管杭の局部座屈の進行を抑制し、延伸度が向上していると考えられる。設計で用いる降伏モーメントには、中詰コンクリート及びモルタル（充填材）による延伸度の向上は考慮していないため、現地に施工された多重鋼管杭は、より安全裕度を有している。

(参考 1) 中詰コンクリートによる最大荷重への影響

中詰コンクリートの有無が多重鋼管杭に作用する最大荷重に与える影響を確認する。中詰コンクリートを充填している「2.2.3 実験結果」に示した実験ケース①と、別途実施した中詰コンクリートを充填していない実験ケース(以下「実験ケース③」と言う。)との比較を図1に示す。

なお、実験ケース①は3つの実験体で同様な挙動であることから、実験ケース①-3で代表する。

中詰コンクリートの有無に関わらず降伏モーメントを上回る耐力を有していること、降伏モーメントに至るまでは弾性挙動を示すことを確認した。実験ケース③での最大荷重は圧縮縁の局部座屈発生後に確認され、最大荷重発生後は荷重の低下が確認されたが、実験ケース①では圧縮縁の局部座屈発生後に荷重の低下は確認されず、緩やかに荷重が増加し続け、最終的には鋼管の引張縁の破断に伴い荷重が低下した。実験ケース①は実験ケース③と比較して、最大荷重が1.19倍、最大変位が約5倍であった。

中詰コンクリート及びモルタル(充填材)により、鋼管杭の局部座屈の進行が抑制され、延伸度が向上していると考えられる。設計では、「道路橋示方書」を基に降伏モーメントを許容限界とし、安全側の設計とするために、中詰コンクリート及びモルタル(充填材)を考慮しない方針であることから、現地に施工された実構造物は、地震又は津波に対して、より安全裕度を有すると考えられる。

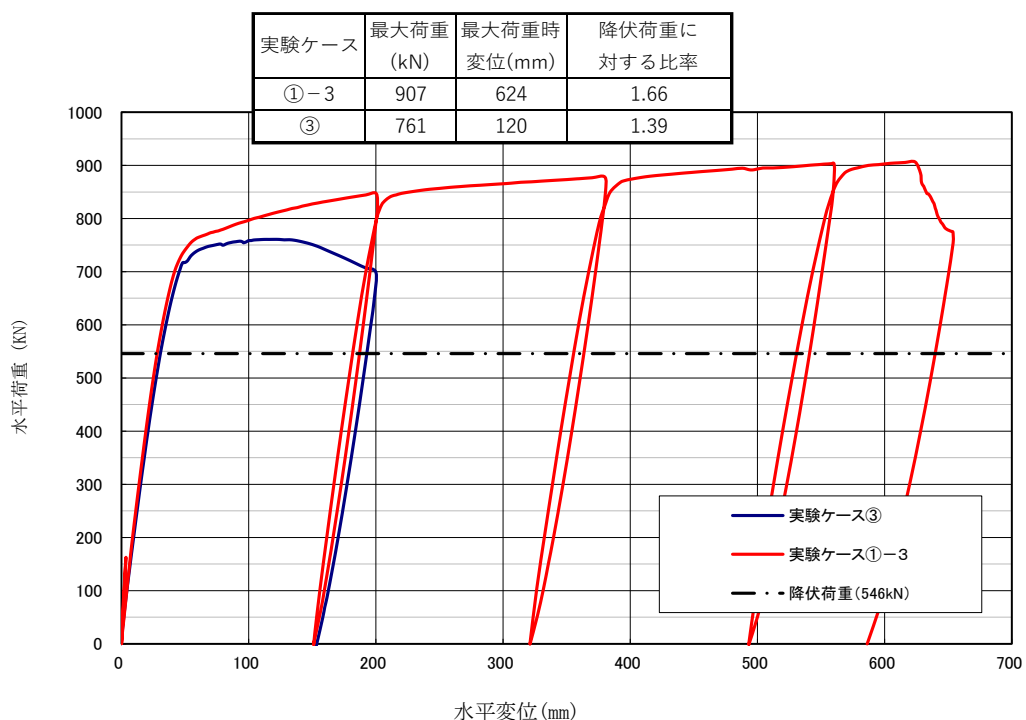


図1 水平荷重と水平変位の関係(実験ケース①及び実験ケース③)

(参考 2) 中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の圧縮強度試験結果

実験で使用した中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の圧縮強度試験結果の一覧を表 1 に示す。中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の解析用物性値は、実験ケース①の平均値を採用し、中詰コンクリートは 29N/mm<sup>2</sup>、モルタル（充填材）は 53N/mm<sup>2</sup>とした。

表 1 実験で使用した中詰コンクリート及びモルタル（充填材）の圧縮強度試験結果

実験 ケース	鋼管 構造	載荷方法	圧縮強度（材令 28 日） （N/mm <sup>2</sup> ）			
			中詰コンクリート		モルタル（充填材）	
①- 1	4 重管 φ 528 φ 480 φ 432 φ 384	水平一方向載荷	30.4	29.2	52.1	53.3
①- 2			29.5		55.6	
①- 3			27.8		52.2	
②		正負交番載荷後 水平一方向載荷	34.0		53.6	



(参考 3) 多重鋼管杭の一体挙動特性の把握

多重鋼管内部の変状から荷重伝達機能を把握するために、実験ケース②の実験後の実験体を鉛直方向に切断した。切断面の状況を図 1～3 に示す。

切断面の状況として、圧縮側のコンクリートにひび割れは確認されず、圧縮側の鋼管杭の座屈による変形量は内側ほど小さく、外側から内側にかけて順番に座屈が発生したと考えられる。引張側の鋼管破断は最外管のみであり、さらに曲げ変形が進んだ場合、順次内側が破断するものと考えられる。

多重鋼管は、最外管から内側の鋼管への荷重伝達機能を有しており、一体構造として挙動し、各鋼管が荷重分担すると考えられる。また、降伏変位を大きく超える大変形に対しても段階的に最大荷重が低下する粘り強い構造であると考えられる。



図 1 実験体切断面



図 2 切断面拡大図（圧縮縁）



図 3 切断面拡大図（引張縁）