

論文 レベル2地震動を受ける水道用PCタンク杭基礎の耐震性能照査法に関する基礎的研究

野口 文孝*1・秋山 充良*2・西尾 浩志*3・鈴木 基行*4

要旨：レベル2地震動を受ける水道用PCタンク杭基礎の耐震設計に用いる解析モデルとして、地盤抵抗の非線形性や杭体(PHC杭)の曲げ剛性の変化を考慮した2次元骨組モデルとそのプッシュオーバー解析に用いる地震荷重モデルを提案した。本モデルでは、タンク杭基礎の形状を反映し、タンク底版に作用する慣性力や動水圧などの地震荷重を2次元骨組モデルに載荷するための単純化がなされている。そして、3次元解析との比較から、提案した2次元骨組モデルを用いたプッシュオーバー解析は、レベル2地震動を受けるタンク杭基礎の耐震性能照査法として有用な解析モデルであることを確認した。

キーワード：水道用PCタンク、PHC杭、動水圧、耐震設計、プッシュオーバー解析

1. はじめに

図-1に示される水道用PCタンクにおいて、側壁、内容量、および屋根から構成されるタンク躯体は、その耐震設計基準である「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」¹⁾(以下、PCタンク指針)に示されるレベル2地震動(兵庫県南部地震時に観測された地震波を基に規定)を上回る強震動の作用に対しても、ほぼ弾性応答を示し、所用の耐震性能を十分に保持できることが確認されている²⁾。

一方、PCタンク杭基礎は、通常、道路橋示方書³⁾(以下、道示)の震度法でのみ耐震設計がなされており、レベル2地震動を受けたタンク躯体の弾性応答の結果として生じる大きな水平力の作用に対する耐震性能照査は行われていない。これは、兵庫県南部地震も含め、これまでのところタンク側壁やその杭基礎に震災例が報告されていないことの他に、橋脚基礎などと異なり、同心円状に杭が配置されるタンク杭基礎の形状的な特徴や、それに作用する3次元的な地震荷重(躯体慣性力、動水圧)のモデル化の困難さが関係している。今後のPCタンクの性能

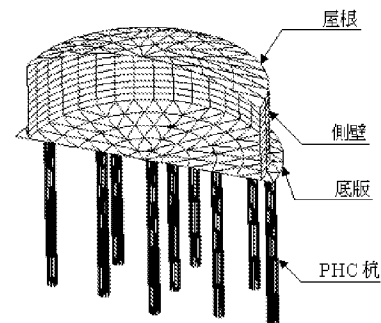


図-1 PCタンクのFEMモデル

照査型設計法への移行に際し、レベル2地震動を受けるタンク杭基礎の耐震安全性を容易に照査できる解析モデルを構築する必要がある。

そこで本研究では、レベル2地震動を受けるPCタンク杭基礎の耐震性能照査法を構築するための基礎的研究として、タンク杭基礎・地盤系を2次元のラーメン構造(2次元骨組モデル)にモデル化し、そのプッシュオーバー解析に用いる地震荷重モデルを提案する。そして、3次元解析との比較を行うことで、本モデルのPCタンク杭基礎の耐震設計への適用性を検討する。

2. PCタンク杭基礎の耐震設計に用いる2次元骨組モデルと地震荷重のモデル化

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻 博(工) (正会員)

*3 (株)安部工業所 東京支店支店長 工修 (正会員)

*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

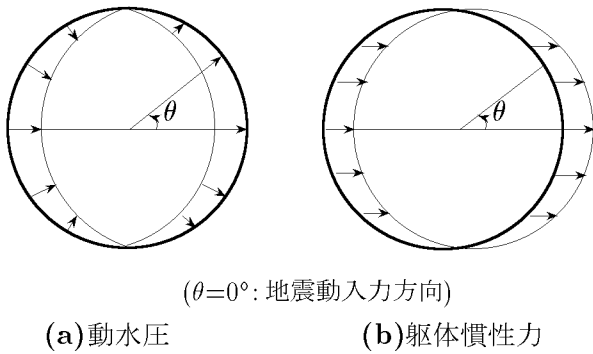


図-2 側壁に作用する動水圧及び躯体慣性力

2.1 PC タンク杭基礎に作用する地震荷重

(1) 概説

本研究で考慮した PC タンクに作用する常時荷重は、タンク躯体（屋根、側壁および内容量）の自重のみであり、地震荷重は、側壁および底版に作用する動水圧と躯体慣性力である。

以下に、これら 3 次元的に PC タンク底版に作用する地震荷重により生じる側壁下端の鉛直方向モーメントなどを示す。

(2) 側壁下端の鉛直方向モーメント

動水圧と躯体慣性力により側壁下端に生じる鉛直方向モーメントは、非軸対称荷重が作用する円筒形シェルの支配方程式¹⁾を解き、図-2に定義される角度 θ の $\theta=0^\circ$ 位置の側壁下端に生じる鉛直方向モーメント M_{0d} と M_{0i} を基に導く。側壁に作用する動水圧は、図-2(a) に示されるように、 $\theta=0^\circ$ 位置で最大、 $\theta=90^\circ$ 位置でゼロとなり、躯体慣性力は図-2(b) に示されるように θ に関わらず一様であることから、動水圧および躯体慣性力による角度 θ の側壁下端位置の鉛直方向モーメントは次式で算出する。

$$M_{0d}(\theta) = M_{0d} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$M_{0i}(\theta) = M_{0i} \quad (2)$$

(3) 側壁下端の鉛直方向力

動水圧および躯体慣性力により $\theta=0^\circ$ 位置の側壁下端に生じる鉛直方向力 N_0 は、それぞれの荷重による側壁下端のモーメント M_{0T} と、PC タンクを薄肉の円環とした場合の中立軸から圧縮縁までの距離に対する断面係数 Z_c ¹⁾から式(3)

で算出する。

$$N_0 = \frac{M_{0T} \cdot t}{Z_c} \quad (3)$$

ここに、 t : タンク壁厚

地震時に、側壁下端に生じる鉛直方向力は、 $\theta=0^\circ$ 位置で最大、 $\theta=90^\circ$ 位置でゼロとなることから、式(1)と同様に、角度 θ の側壁下端に作用する鉛直方向力 $N_0(\theta)$ は式(4)で算出する。

$$N_0(\theta) = N_0 \cdot \cos \theta \quad (4)$$

(4) 内容量に作用する慣性力

内容量 $1,000\text{m}^3$ 程度のタンク躯体の固有値解析より得られる固有周期は、0.1 秒以下と短く、主に入力地震動の短周期成分に応答する衝撃圧が側壁に作用する。そこで、内容量に作用する慣性力 H_r は、衝撃圧を生じさせる固定水¹⁾のみを考慮し、式(5)で算出する。

$$H_r = W_r \cdot K_h \quad (5)$$

$$W_r = \tanh \frac{\sqrt{3}R}{H} / \frac{\sqrt{3}R}{H} \quad (6)$$

ここに、 R : タンクの内径、 W_r : 固定水重量、 K_h : 水平震度、 H : 水深

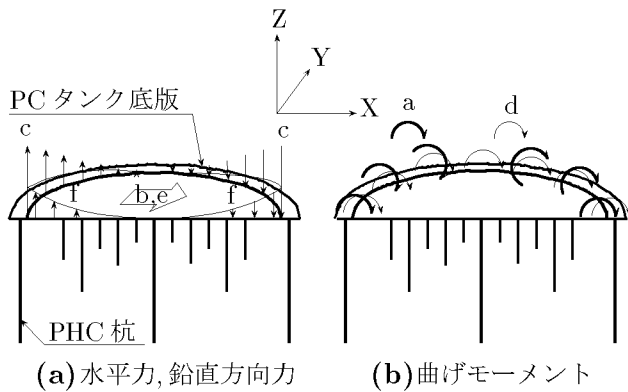
(5) 底版に作用する動水圧

底版中心から距離 r 、角度 θ の位置に作用する鉛直下向きの動水圧 $P_b(r, \theta)$ は、速度ポテンシャル法に基づき式(7)で算出する¹⁾。

$$P_b(r, \theta) = \rho K_h \left(r - 2R \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{k_s^2 - 1} \times \frac{J_1(k_s \frac{r}{R})}{J_1(k_s) \cosh(k_s \frac{H}{R})} \right) \cos \theta \quad (7)$$

ここに、 ρ : 水の単位体積重量、 $k_s: \frac{d}{dk_s}(J_1(k_s)) = 0$ を満足する正根 (J_1 : ベッセル関数)

図-3に、以上の PC タンク底版に作用する地震荷重の概略を示す。なお、PC タンク側壁および杭体をシェル要素およびファイバー要素にてモデル化した有限要素解析より得られる杭頭位置の各断面力が、式(1)～(7)を載荷して得られる値と概ね一致することを確認している。



(a) 水平力, 鉛直方向力 (b) 曲げモーメント
a: 側壁下端の動水圧による鉛直方向モーメント (円周まわり), b: 内容液に作用する慣性力, c: 側壁下端の鉛直方向力, d: 側壁下端の躯体慣性力による鉛直方向モーメント (Y 軸まわり), e: 底版に作用する水平力, f: 底版に作用する動水圧

図-3 PC タンク底版に作用する地震荷重

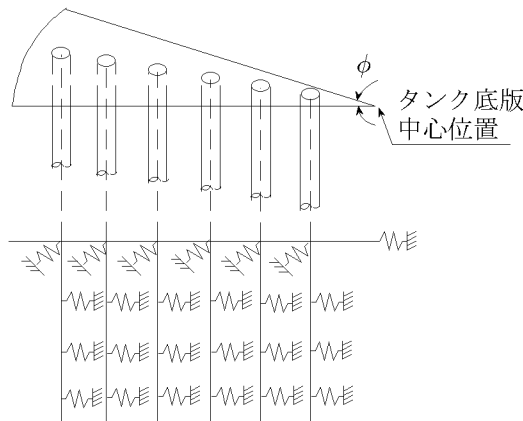


図-4 2次元骨組モデルの概略図

2.2 2次元骨組モデルとプッシュオーバー解析で用いる地震荷重

(1) 2次元骨組モデル

図-3に示される荷重を載荷した3次元解析では、X方向への入力に対して、杭頭位置のY軸回りのモーメントが同位置のX軸回りのモーメントに比べ卓越し、また、Y軸方向の地盤抵抗の設定が杭体の断面力の算出に大きく影響しないことが確認された。そこで、図-3の解析モデルの2次元化を図る。

提案する解析モデルは、道路橋基礎の耐震設計に用いる解析モデル³⁾と同様に、杭基礎・地盤系を2次元骨組モデルでモデル化したものである。2次元骨組モデルでは、図-4に示すように、タンク底版の中心から、底版を角度 $\phi(\text{rad})$ で切り出し、杭列の各周毎に1本の杭を剛結させる。タンク杭基礎では、通常、引抜き側の杭

が最初に降伏するため、底版中心に位置する杭と引抜き側の最外周($\theta=180^\circ$)に位置する杭を含むようにモデル化することになる。なお、角度 ϕ は、 2π を最外周に配置される杭体数で除した値である。底版の剛性は、タンク中心位置からの広がり方を考慮したはりの曲げ剛性として与えられる。従って、図-4のラーメン構造では、タンク底版の中心に近いほど、その曲げ剛性が小さい。杭基礎の地盤抵抗は、杭軸方向、杭軸直角方向の抵抗特性ともに、道示³⁾に示されるバイリニア型を仮定してモデル化し、杭体は、ファイバー要素によりモデル化した。なお、杭体の曲げ剛性の変化は、ファイバー要素ではなく、適当な軸力の大きさを仮定して計算した杭体のモーメント-曲率関係を基に考慮することも可能と考えられ、今後の課題としたい。

以降では、この2次元骨組モデルによるプッシュオーバー解析で用いる地震荷重をモデル化する。

(2) 側壁下端の鉛直方向モーメント

式(1)の側壁下端の鉛直方向モーメントに対し、杭体に作用するY軸回りのモーメントは、 $M_{0d}(\theta)$ の $\cos \theta$ 成分である。そこで、2次元骨組モデルでは、 $M_{0d}(\theta)$ に変わり、式(8)の $\bar{M}_d$ を作用させる。

$$\begin{aligned}\bar{M}_d &= \int_0^\phi M_{0d} \cos^2 \theta \cdot (R d\theta) \\ &= \frac{M_{0d} R}{2} \left(\phi + \frac{1}{2} \sin 2\phi \right) \quad (8)\end{aligned}$$

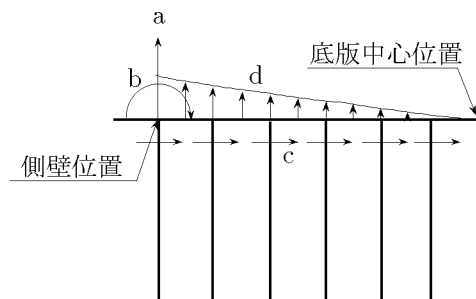
躯体慣性力は、地震動入力方向に作用するため、2次元骨組モデルでは、式(2)の $M_{0i}(\theta)$ に変わり、式(9)の $\bar{M}_i$ を作用させる。

$$\bar{M}_i = M_{0i} \cdot R\phi \quad (9)$$

(3) 側壁下端の鉛直方向力

式(9)と同様に、側壁下端の動水圧および慣性力により生じる鉛直方向力は、式(10)の $\bar{N}_0$ を載荷する。

$$\begin{aligned}\bar{N}_0 &= \int_0^\phi N_0 \cos \theta \cdot (R d\theta) \\ &= N_0 R \sin \phi \quad (10)\end{aligned}$$



a: 側壁に作用する動水圧と慣性力による鉛直方向力, b: 側壁に作用する動水圧と慣性力によるモーメント, c: 水平力, d: 底版に作用する動水圧

図-5 2次元骨組モデルへの荷重載荷

(4) 底版に作用する動水圧

式(7)の動水圧 $P_{br}(r, \theta)$ を基に, 2次元骨組モデルの底版中心位置から距離 r_i に位置する節点 i に, 式(11)から計算される鉛直下向きの荷重 $\bar{P}_{bi}(r_i)$ を作用させる。

$$\bar{P}_{bi}(r_i) = \int_0^\phi P_{br}(r_i, \theta) d\theta \times \frac{\phi}{2\pi} \times \pi \left\{ \left(\frac{r_{i+1} + r_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_i + r_{i-1}}{2} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

(5) 動水圧と躯体慣性力による水平力

各杭に作用させる水平力は, 動水圧と躯体慣性力により生じる水平力の総和を各杭に等分配させたものと仮定する。

$$\bar{H}_i = \frac{(W_s + W_b + W_r)K_h}{N_T} \quad (12)$$

ここに, W_s : 屋根および側壁の総重量, W_b : 底版重量, N_T : 全杭本数

以上の2次元骨組モデルに作用させる地震荷重の概略を図-5に示す。なお, PCタンク側壁は, i) 側壁中間部が大きく膨れる振動モードのみが卓越し, 動水圧および躯体慣性力を同時に載荷した静的解析により, このモードに対応する側壁の変形状態を精度良く再現できる, ii) レベル2地震動作用時にもタンク側壁はほぼ弾性応答を示す, ことから²⁾, 2次元骨組モデルによるプッシュオーバー解析では, 載荷荷重の大きさに関わらず, 所定の震度まで以上の各荷重を一定の増分量で載荷し続けることにする。

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度	78.4N/mm ²
	弾性係数	3.92×10 ⁴ N/mm ²
PC 鋼線	引張強度	1.42×10 ³ N/mm ²
	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²

表-2 解析対象PCタンクの構造諸元

	容量 (m ³)	底版直径 (m)	杭径 (m)	杭長 (m)
タンク 1	616	17.0	0.7	10.0
タンク 2	1000	17.5	0.6	8.9

なお, 従来に比べ軟弱地盤上へのPCタンクの建設例は増加しているが⁴⁾, 未だIII種地盤³⁾を対象としたものは少なく, この範囲では地震時の地盤の水平変位量がタンク杭基礎の耐震安全性に影響しないと判断し, 本研究では, 杭基礎の応答値算出時に地盤変位の作用は考慮しない。

3. 2次元骨組モデルを用いたPCタンク杭基礎のプッシュオーバー解析

3.1 解析対象PCタンク

本研究では, 経済的であり, 実績の最も多い範囲にあるD/H=3.5(D: 内径, H: 水深)の形状を有する内容量616m³(タンク1)とD/H=3.2で内容量1,000m³(タンク2)の2つのタンクを解析対象とした。両タンクとも, 通常のPCタンクと同じく最小鉄筋量程度しか有しておらず, プレストレス量も静水圧によって生じるフープテンションに余裕圧縮力¹⁾を加えた値であるなど, これらはレベル2地震動に対する照査で決定されていない。参考文献²⁾で解析対象としたPCタンクは, 内容量10,000m³であるが, D/H=3.0~3.5の形状を有するタンクでは, 内容量が小さくなると, その側壁厚さがコンクリート打設時の施工性などの要件で決定されるため¹⁾, タンク側壁の耐震安全性はより大きなものとなる。その一方で, 主たる塑性化の発生部位が杭基礎となる可能性が高くなり, その非線形挙動がタンク躯体・杭基礎系の地震応答性状を支配するようになる。この理由により, 本研究では小規

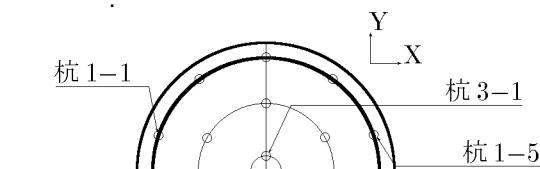


図-6 杭の配列 (タンク 1)

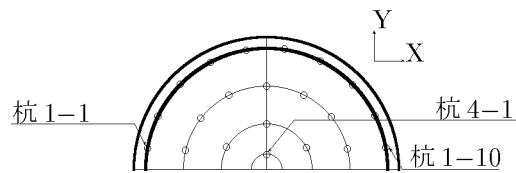


図-7 杭の配列 (タンク 2)

模タンクを解析対象に選定した。

地盤は、地盤種別としてII種地盤³⁾に分類される平均N値が9(砂質土)の様なモデルを仮定した。各杭基礎は、PCタンク指針¹⁾に従い、基礎の安定計算と杭体の許容応力照査で耐震設計されている。なお、杭種は、通常使用されるPCタンク杭基礎と同じく、PHC杭(有効プレストレス7.85MPa)とし、後述のファイバー解析時に用いたコンクリートおよびPC鋼線の各材料特性を表-1に示した。

表-2に両タンクの構造諸元を示し、図-6および図-7にはタンク1およびタンク2の杭の配列を示した。なお、図中の太線はタンク側壁位置を示す。地震動入力方向はX軸の正方向である。

3.2 PCタンク杭基礎における杭体降伏の進展過程

PCタンク杭基礎の非線形化の進展過程を検討するため、図-3の解析モデルに対し、常時荷重および初期プレストレスに相当する軸力を与え、次いで地震荷重を漸増させた。なお、前述の2次元骨組モデルと同じ杭軸直角方向の抵抗特性をX軸およびY軸方向に与えている。

タンク2から得られた(タンク躯体への作用水平震度 K_h)-(タンク底版中心位置の水平変位量 δ)の関係を図-8に示し、杭体の降伏の進展過程を図-9に示す。なお、PHC杭の降伏は、最外縁PC鋼線の降伏と定義している。図-9に示すように、作用軸力が小さくなり、杭体の降伏モーメントが最小な杭1-1(杭位置は図-7参照)で最初の杭体の降伏が発生し、引抜き側から押込

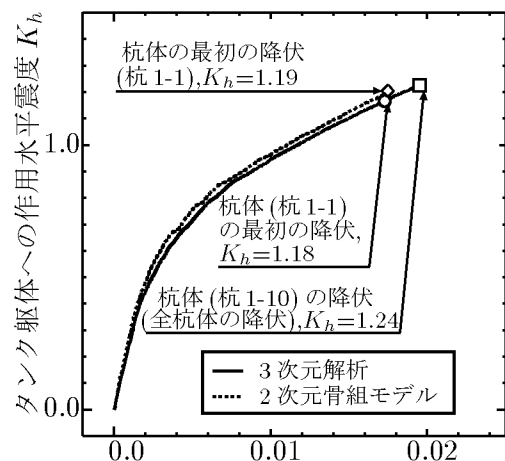


図-8 底版中央位置での $K_h-\delta$ 関係 (タンク 2)

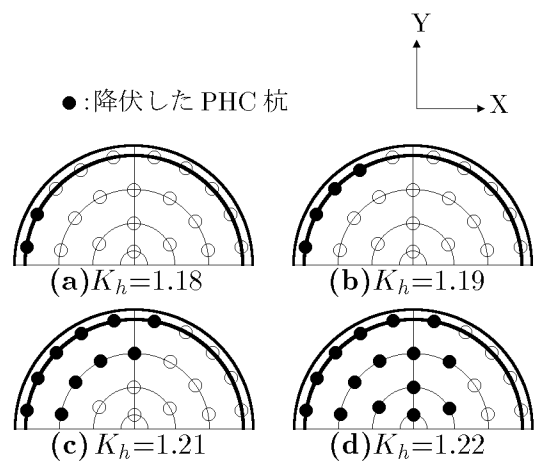


図-9 杭体降伏の進展過程 (タンク 2)

み側に向かい杭の降伏は急速に進展する。なお、タンク杭基礎では底版のロッキングに対し、並進の挙動が卓越するため、他に検討したPCタンク杭基礎も含め、押込み支持力の上限值³⁾は杭頭反力に対し十分な余裕が確保されていた。

PHC杭のファイバー解析に用いたコンクリートおよびPC鋼線の応力-ひずみ関係は、表-1の材料特性を与えたバイリニア型でモデル化しており、今後、杭体の耐力低下が杭基礎全体の挙動に与える影響を検証し、地震時に許容するPCタンク杭基礎の非線形化の程度を決定する必要がある。しかし、レベル2地震動の作用にも、タンク側壁はほぼ弾性応答を示し、杭基礎に比べ非常に高い耐力、剛性を有する状況の中で、最初の杭体の降伏から全杭の降伏までの震度の差が小さいことや、PHC杭の最大耐力以降の急激な耐力低下挙動⁵⁾を考慮すると、側壁と

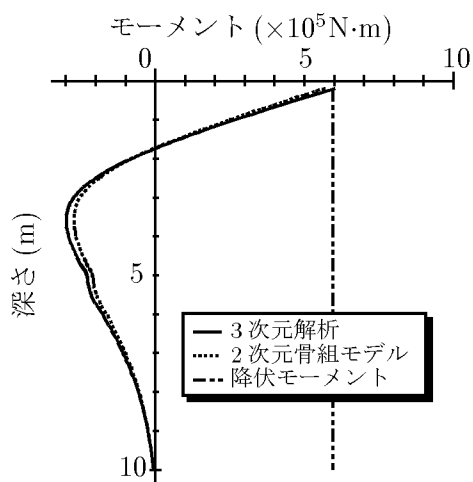


図-10 杭体の曲げモーメント(タンク1)

同様に、PCタンク杭基礎の地震後の「機能保持が可能」との耐震性能¹⁾を確保するためには、杭体に最初の降伏が生じる点をその耐震設計時の限界状態とすることが望ましいと考える。なお、この規模のPCタンクは固有周期が小さく(0.1秒以下)、ほぼ剛体振動することから、PCタンク指針に示されるレベル2地震動の作用に対して、PCタンク側壁および杭体を何れも弾性挙動内に抑える設計は十分可能と考える。

3.3 2次元骨組モデルを用いたPCタンク杭基礎のプッシュオーバー解析

提案した2次元骨組モデルと地震荷重モデルを用いたPCタンク杭基礎のプッシュオーバー解析を行った。2次元骨組モデルでは、底版中心に位置する杭(図-6、図-7の杭3-1、杭4-1)と引抜き側の最外周の杭(図-6、図-7の杭1-1)を含むようにモデル化した。実際には、底版中心と最外周の杭を結んだ直線上に各周の杭が位置すると仮定し、2次元のラーメン構造を構築している。タンク2を解析対象とした結果を図-8に示す。また、タンク1において、最初の杭の降伏(杭1-1の降伏)が生じた際の、杭1-1の曲げモーメントの分布を3次元解析から得られた結果とともに図-10に示す。

図-8より、2次元骨組モデルを使用することで、図-3の3次元の解析モデルから得られる $K_h - \delta$ の関係を杭体に最初の降伏が生じるまで十分に再現できることが確認される。なお、2次

元骨組モデルは、同心円状に配置される杭を2次元のラーメン構造に単純化しており、最初の杭体の降伏を除き、3次元解析より得られる杭体の降伏の進展過程との比較ができないため、図-8の2次元骨組モデルの結果には、杭体の最初の降伏が生じる点までを示した。このように、杭体の最初の降伏が生じる点をレベル2地震動に対する限界状態と定義する限りにおいて、図-8や図-10より、提案した2次元骨組モデルは、PCタンク杭基礎の耐震性能照査法として有用な解析モデルと考える。

4. まとめ

PCタンク杭基礎は、最初の杭体の降伏から全ての杭が降伏するまでの震度の差が小さく、また、PHC杭の最大耐力以降の急激な耐力低下挙動を考慮すると、杭体の最初の降伏が生じる点をレベル2地震動に対する限界状態と定義することが望ましいと判断された。

提案した2次元骨組モデルとそのプッシュオーバー解析に用いる地震荷重モデルは、杭体の最初の降伏が生じる点まで十分に3次元解析の結果を追従でき、PCタンク杭基礎の耐震性能照査法として有用な手法であることを確認した。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説，1998
- 2) 西尾浩志ほか：プレストレストコンクリート製タンク側壁のレベル2地震動に対する耐震性能照査，土木学会論文集，Vol.725/V-58，pp.85-100，2003.2
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
- 4) 中村秀明ほか：内容液と地盤の相互作用を考慮したコンクリート製液体貯蔵タンクの地震応答解析，土木学会論文集，Vol.655/V-48，pp.47-61，2000.8
- 5) 岩本勲ほか：正負交番荷を受ける高強度プレストレストコンクリート杭の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.1075-1080，1998.6