

# 杭頭と構造物底盤を絶縁・分離する 杭頭絶縁免震工法の開発

西村 晋一・木全 宏之・福武 毅芳・田地 陽一

筆者らは千葉大学と共同で、地震時における杭応力や上部構造物の慣性力を低減することを目的として、杭頭と基礎スラブを剛結しないで完全に切り離す基礎構造「杭頭絶縁免震工法（以下「本工法」という）」を提案している<sup>1), 2)</sup>。30g場の遠心模型実験により、1) 杭頭絶縁基礎は杭頭を剛結した基礎よりも構造物の加速度応答が低減されること、2) 構造物と杭頭の間地盤にジオテキスタイルを介在させることにより構造物の沈下や構造物と地盤の相対沈下が抑制されること、が明らかとなった。また、屋外に設置した免震効果検証用の構造物により実際の地震時の挙動観測を開始している。

キーワード：免震、杭基礎、杭頭接合、遠心実験、ジオテキスタイル、沈下

## 1. はじめに

近年、我国は地震活動期に入り、東海地震等の巨大地震が切迫している。地震対策の一つに免震技術があるが、土木構造物に対しては道路橋支承部を除いて導入が遅れているのが現状である。このような状況下から、土木構造物に対する合理的な免震技術のニーズが一段と高まってきている。

そこで、筆者らは地盤・基礎に着目した免震技術として、基礎杭の頭部と構造物底盤を結合しない本工法に関し、平成20年4月から千葉大学の中井正一教授のご指導のもとで開発を行ってきた。本免震工法の開発にあたり、遠心模型振動実験を行い、杭応力と挙動に関する杭頭剛結の場合との比較を行った。さらに地盤内の杭頭レベルにジオテキスタイルを敷設することにより、構造物の残留沈下を抑制する効果についても検討した。

本報告では、①本工法の概要、②遠心模型実験による検証、③屋外に設置した免震効果検証用の地震時挙動観測システムについて述べる。

## 2. 本工法の概要<sup>3)</sup>

杭基礎を採用する構造物では、建築・土木を問わず一般に、杭頭と構造物の底盤とを一体化（剛結合）している。剛結合すると地震力が杭から構造物に直接伝播して、構造物の加速度が大きくなるとともに杭頭部に大きな力が作用する。したがって、杭の断面積と

強度は、地震時に杭頭に作用する力と平常時に杭頭に作用する上部構造物の荷重の両方を勘案し、決定している。

そこで今回、逆転の発想で杭基礎の概念を覆し、杭頭と構造物の底盤を絶縁・分離する全く新しい免震技術を開発した。杭頭と構造物の底盤を分離すれば、構造物に伝播する地震力を大幅に低減できると同時に、杭頭に作用する力が大幅に小さくなるため杭の断面積と強度を削減できる可能性がある。

本工法の概念を図1に示す。従来の杭頭剛結合基礎に比べ、本技術では杭と構造物を結合しないことにより、構造物に作用する加速度と杭に発生する応力を低減することができる。また、杭の応力低減により杭のコストダウンも可能となる。杭と構造物を繋がないので施工も簡単になり、杭頭部と構造物部分の過密配筋の問題も解消される。なお、地盤内の杭頭レベルに、構造物の残留沈下を抑制するためのジオテキスタイルを敷設する。

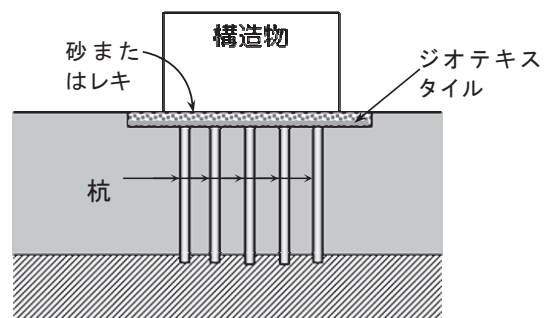


図1 本工法の概念

### 3. 遠心模型実験による検証<sup>4)</sup>

杭とスラブ間を杭径 D (1D) 離れた杭基礎構造物を対象として、遠心模型実験により免震効果の検討を行った。また、地盤内の杭頭レベルにジオテキスタイルを敷設することにより、構造物の残留沈下を抑制する効果についても検討した。

#### (1) 実験条件と方法

遠心模型実験は、長さ 770 mm、幅 470 mm、高さ 370 mm のせん断土槽を用い、30 g の遠心載荷場で実施した。図一 2 に遠心模型実験の概要を示す。模型砂地盤は空中落下法により相対密度が約 60% となるように作成した。模型地盤の材料は、7号珪砂 ( $G_s = 2.635$ ,  $e_{max} = 1.185$ ,  $e_{min} = 0.712$ ,  $D_{50} = 0.147$  mm) を用いており、乾燥状態である。

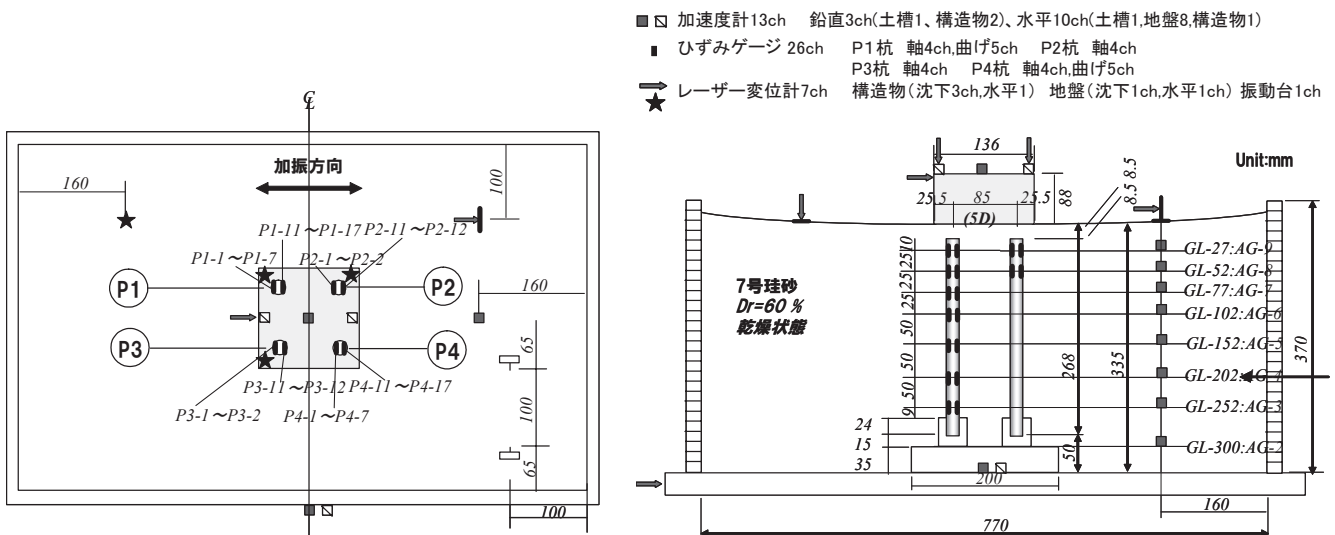
模型杭は、外径 17 mm、肉厚 1 mm、長さ 268 mm の真鍮製の 4 本杭構造とした。杭芯距離は 85 mm (5D) としており、杭先端は完全固定条件とした。上部構造物は、長さ 136 mm、幅 136 mm、高さ 88 mm のアルミ製ブロックであり、重量は 4.4 kg (実物換算 1,190 kN) で、接地圧は実物換算で 69.9 kN/m<sup>2</sup> である。

今回は、全部で 4 ケースの実験を実施した (表一 1)。Case1 は上部構造物と杭頭を剛結した実験 (普通の杭基礎構造物) で、Case2 ~ 4 は杭頭と上部構造物を 1D (17 mm) 切り離れた実験 (杭頭絶縁基礎) である。杭頭絶縁基礎実験のうち、Case3 と 4 は、地震後の残留沈下の抑制を担って、上部構造物と杭頭の間に沈下対策を施した。対策方法として Case3 は、碎石相当の材料 (3号珪砂) を用い、Case4 は碎石を (3号珪砂) ジオテキスタイルで巻き座布団状にしたものを用い

た。また、上部構造物の下端の位置は地表面としており、地盤の埋め込みは考慮していない。Case4 の碎石をジオテキスタイルで巻いた実験では、ジオテキスタイル上に構造物を乗せ、1 g 場での引っ張り試験を実施した。構造物とジオテキスタイルの動摩擦係数は、0.483 ( $\phi_u = 25.8^\circ$ ) であり、一般的な砂材料の内部摩擦角よりは小さい。

杭頭絶縁基礎の模型実験のうち、図一 2 は Case2 における計測器配置図である。模型地盤中の 8 深度に加速度計を設置し、振動台と土槽底面に加速度計を設置した。地表面にはレーザー変位計を 2 箇所を設置し、水平変位と鉛直変位の時刻歴を測定した。上部構造物については、水平加速度、鉛直加速度、ならびに水平変位と 3 箇所において鉛直変位を測定した。模型杭のひずみゲージは、P1, P4 杭については 7 深度に設置し、P2, P3 杭は杭頭付近の 2 箇所に設置した。また、地盤のせん断剛性の把握ため、模型地盤中にベンダーエレメントを設置し、せん断波速度を計測した。さらに、上部構造物と杭頭の間には色砂を敷くことで実験後の残留沈下状況の把握を試みた。

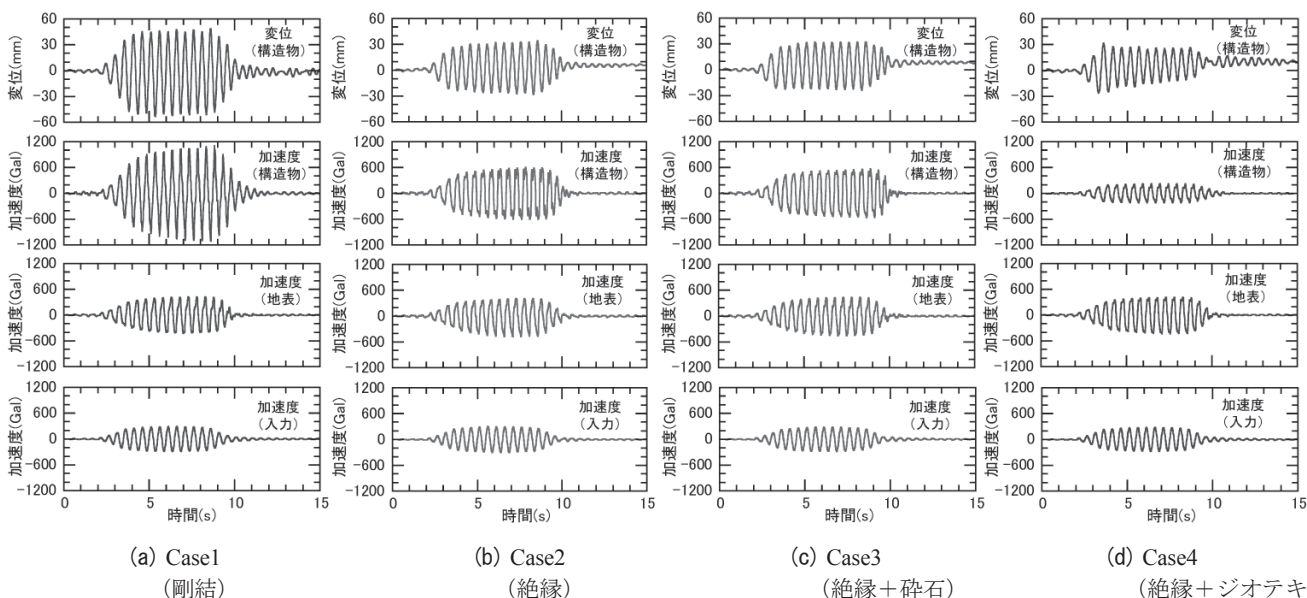
これらの実験条件を表一 1 にまとめて示す。ベンダーエレメントより計測された模型地盤のせん断波速度は、158 ~ 171 m/s 程度でややばらついているが、概ね同一の地盤条件であると考えられる。入力加速度は 60 Hz10 波 (実物換算 2 Hz) の正弦波加速度を用いており、最大加速度は 9 g (実物換算で 300 Gal) を目標とした。実際に入力された加速度は、土槽底面で計測された加速度の最大値であり、278 Gal ~ 299 Gal である。



図一 2 遠心模型実験の概要

表一 実験条件

	実験条件	模型実験の概要
Case1	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭剛結</li> <li>最大入力加速度: 296 Gal</li> <li>地盤のせん断波速度: 164 m/s</li> </ul>	
Case2	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭絶縁(1D)</li> <li>沈下対策なし</li> <li>最大入力加速度: 299 Gal</li> <li>地盤のせん断波速度: 158 m/s</li> </ul>	
Case3	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭絶縁(1D)</li> <li>沈下対策: 碎石(珪砂3号)</li> <li>最大入力加速度: 285 Gal</li> <li>地盤のせん断波速度: 171m/s</li> </ul>	
Case4	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭絶縁(1D)</li> <li>沈下対策: ジオテキスタイル+碎石</li> <li>最大入力加速度: 278 Gal</li> <li>地盤のせん断波速度: 161 m/s</li> </ul>	



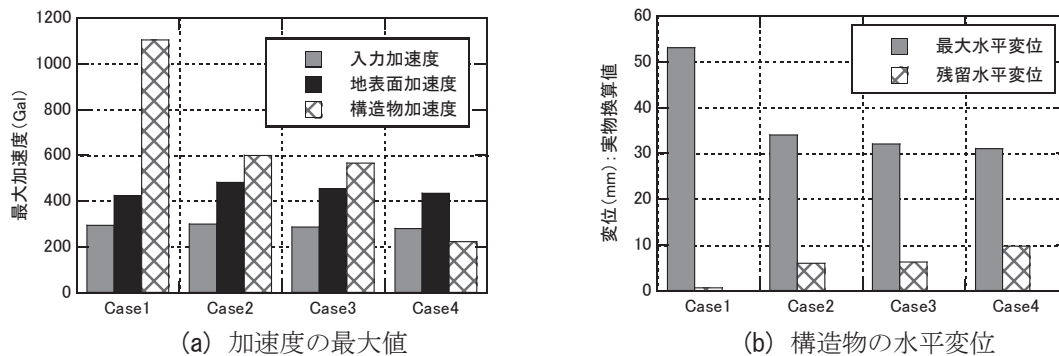
図一 3 加速度と変位の応答波形

(2) 実験結果

① 加速度・変位応答特性

図一 3 に入力加速度，地表面の応答加速度，構造物上部の応答加速度，および構造物の水平変位の時刻歴を，図一 4 には各々の加速度の最大値と構造物の

最大水平変位と残留変位を示す。これらの図によれば，地表面の加速度応答倍率は 1.5 程度と概ね同様な値を示しているが，上部構造物の水平加速度は，Case1 の杭頭剛結では 1,000 Gal を超える大きな応答になっている。一方，Case2 ~ 4 の杭頭絶縁基礎の実験では，



図—4 応答加速度の最大値と構造物の変位

表—2 構造物の残留沈下量 (実物換算値)

Case	杭頭剛結	鉛直残留変位 (mm)			相対沈下	
		上部工 (Z1)	上部工 (Z2)	上部工 (Z3)	地盤	地盤構造物 - 地盤
Case1	杭頭剛結	0	0	0	81	-81
Case2	杭頭絶縁 (1D)	204	210	209	100	108
Case3	杭頭絶縁 (1D) + 碎石	185	189	175	78	105
Case4	杭頭絶縁 (1D) + ジオテキ	47	39	58	55	-7

600 Gal を下回る値となっており、大きな免震効果が得られていることが分かる。特に、Case4 のジオテキ補強実験での構造物加速度応答は、220 Gal と最も小さい。

上部構造物の水平残留変位は、Case4 が 10 mm と最も大きい。この実験では、杭頭絶縁による免震効果と上部構造物がジオテキタイルとの間で滑ることによる免震効果の両者が作用したためである。模型実験の概要において記したように、Case4 での内部摩擦角 25° と一般的な砂材料よりは小さいため、滑りが生じて上部構造物に残留変位が生じた。このことは、Case4 の構造物の加速度や変位波形からも見てとれる。

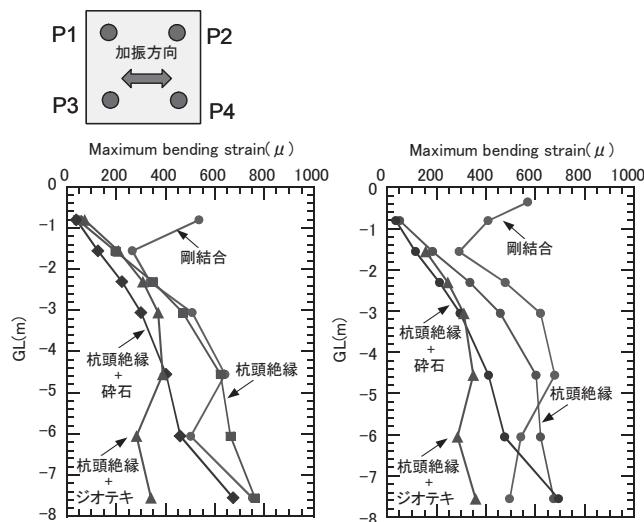
② 構造物の残留沈下量

構造物の相対残留沈下量は、構造物の 3 箇所計測した鉛直変位 (絶対沈下量) の平均値から地盤の鉛直変位を差し引いて算定した。表—2 に Case1 ~ 4 の構造物の鉛直変位、地盤の鉛直変位、構造物の相対残留沈下量を示す。Case2, 3 での構造物の相対残留沈下量は 100 mm をやや上回る値となっている。一方、沈下対策としてジオテキスタイルを用いた Case4 での相対残留沈下量は -7 mm であり、構造物の沈下抑制効果は大きい。

ジオテキスタイルにより、地盤が繰り返し変形に抵抗できず移動する欠点を補うことができ、地盤の変位が拘束された。すなわち、地震時の地盤の移動を、ジオテキスタイルのテンション抵抗によって防ぎ、構造物の沈下が抑制できた。

③ 杭基礎の断面力

図—5 に全深度においてひずみを計測した P1 杭、

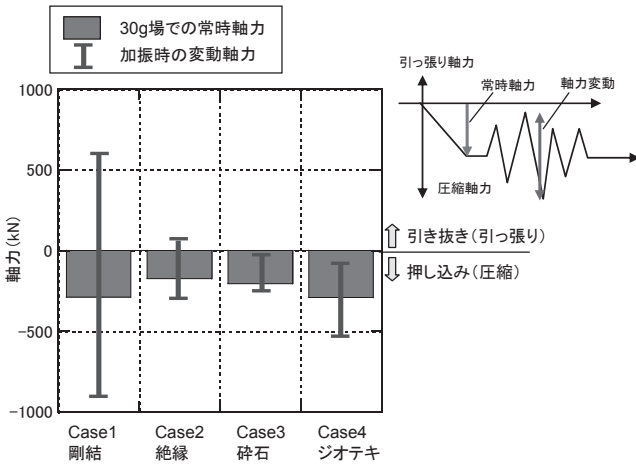


図—5 杭基礎の曲げひずみの深度分布

P4 杭における曲げひずみの深度分布を示す。杭頭絶縁基礎での杭頭曲げひずみは、杭頭剛結基礎と比較して大きく低減されている。各々の実験における曲げひずみの深度分布は多少ばらついているが、概ね同様な傾向を示している。

④ 杭基礎の軸力

加振中における杭 1 本当たりの変動軸力を図—6 の赤色で示す。同図中に青色の棒グラフで表示したのは、遠心加速度が 30 g に達したとき (常時) の杭頭軸力である。杭頭の常時軸力は Case1 と Case4 では 280 kN であり、上部構造物重量である 1,200 kN のほぼ 1/4 を分担しており、構造物の重量を杭で負担している。一方、Case2, Case3 での常時軸力は、構造物



図一六 杭頭の常時軸力と変動軸力 (1本当たり)

の重量の全てを杭が分担した場合の杭1本当たりの常時軸力を下回っており、杭頭と構造物の間の地盤が重量を分担している。また、図一六中に赤線で示した加振中の変動軸力は、Case1では引き抜き側、押し込み側ともに大きな値を示しているのに対し、杭頭絶縁基礎では、杭頭が接合されていないため引き抜き側の力は、ほとんど作用していない。杭基礎の押し込み側への圧縮力は、残留沈下に対して効果的であったCase4の実験で若干大きくなる傾向にある。杭頭を剛結ではなく絶縁構造とすることにより、杭頭曲げモーメントの低減のみならず、押し込み、引き抜き力の低減に対しても大きな効果がある。

(3) まとめ

本工法の有効性を検証するため、4本杭による構造

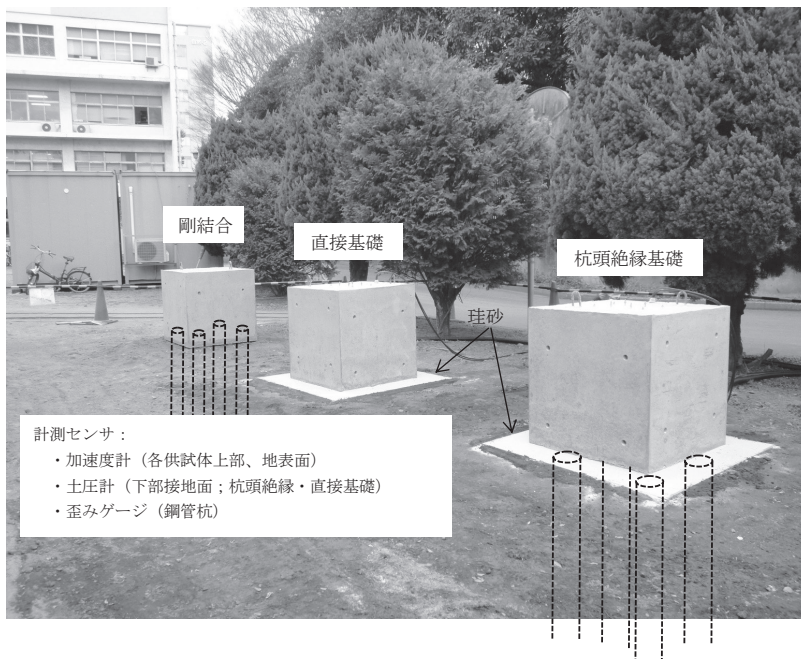
物～地盤系の遠心模型実験を実施した。実験結果より以下の成果が得られ、杭頭絶縁基礎の有効性を確認した。

- ①杭頭絶縁は杭頭剛結に比べ、構造物の加速度が低減した。
- ②杭頭絶縁 Case2, 3は杭頭剛結に比べ、杭応力(曲げひずみ)や軸力が大きく低減するが、残留沈下が生じた。
- ③杭頭絶縁 Case4は、杭応力(曲げひずみ)や軸力の低減効果に加え、残留沈下も抑制できた。これは、ジオテキスタイルの張力による。

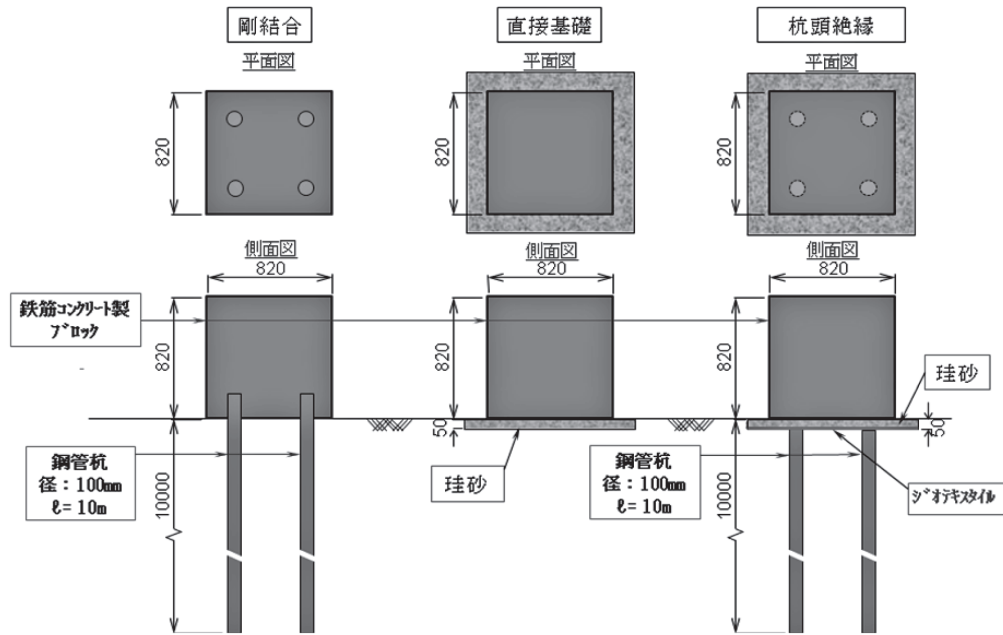
4. 地震観測システム

本技術の実用化を目的として、千葉大学の構内に1/10スケールの構造物モデルを設置し、免震の効果を確認するための地震時挙動観測を2012年の1月から開始した(写真一1, 図一7)。今回設置した構造物モデルは一辺が82cmの立方体の鉄筋コンクリートブロック、杭は径100mmの鋼管であり、地震時挙動を比較するために杭頭絶縁、杭頭剛結合、直接基礎の計3体を設置した。杭頭絶縁基礎は、杭の直上部にジオテキスタイルを敷き、その上に6号珪砂を50mmの厚さ(杭径Dの0.5倍)で敷設した。各モデルには加速度計、土圧計、杭のひずみゲージを設置している。

今後は引き続き観測を継続し、地震観測記録の蓄積・分析を定期的に行い、杭頭絶縁基礎の免震効果の有効性検証を行っていく予定である。



写真一1 地震時挙動観測システムの全景 (千葉大学構内)



図一七 地震時挙動観測用の構造物～杭モデル

### 5. おわりに

地震時における杭応力や上部構造物の慣性力を低減することを目的として、杭頭と基礎スラブを剛結しないで完全に切り離す基礎構造「杭頭絶縁免震工法」を提案した。そして、30g場の遠心模型実験により、1) 杭頭絶縁基礎は杭頭を剛結した基礎よりも構造物の加速度応答が低減されること、2) 杭応力が低減されること、3) 構造物と杭頭との間の地盤にジオテキスタイルを介在させることにより構造物の沈下や構造物と地盤の相対沈下が抑制されることを示した。さらに、1g場におけるより大きな模型構造物に対しても効果を実証するため、屋外に設置した構造物により実際の地震時の挙動観測を開始し、実証データを収集している。

近年の地震活動期においては、地震対策技術の整備が急務である。今後は実際の地震に対する免震効果を検証・確認したうえで、プラント基礎などの杭基礎を有する各種土木構造物に展開していく考えである。

JICMA

### 謝辞

本稿執筆に当たり多大な協力を頂いた千葉大学中井正一教授に誌面を借りて心よりお礼を申し上げます。

#### 《参考文献》

- 張 至鎬, 田地陽一, 福武毅芳, 中井正一, 関口 徹, 木全宏之, 西村晋一: 遠心模型実験による杭頭絶縁基礎の地震時挙動の検討, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010.

- 田地陽一, 張 至鎬, 福武毅芳, 中井正一, 関口 徹, 木全宏之, 西村晋一: 遠心振動実験による杭頭絶縁基礎の地震時挙動に関する研究, 第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, 2011.
- 田地陽一, 福武毅芳, 中井正一, 関口 徹, 木全宏之, 西村晋一: 杭頭絶縁基礎の地震時挙動に関する遠心模型実験, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.
- 福武毅芳: 軟弱地盤の非線形特性を利用した免震基礎, 特別寄稿, MENSIN, No.34, pp.26-40, 2001.

#### 【筆者紹介】



西村 晋一 (にしむら しんいち)  
清水建設㈱  
土木技術本部 技術開発部  
主査



木全 宏之 (きまた ひろゆき)  
清水建設㈱  
土木技術本部 設計第二部 設計技術グループ  
グループ長



福武 毅芳 (ふくたけ きよし)  
清水建設㈱  
技術研究所 総合解析技術センター 地盤解析グループ  
グループ長



田地 陽一 (たじ よういち)  
清水建設㈱  
技術研究所 総合解析技術センター 地盤解析グループ  
主任研究員