

杭頭絶縁基礎の開発

清水建設株式会社 土木技術本部 設計第二部
坂井康伸

1. はじめに

近年、我が国は地震活動期に入ったと言われており、1995年兵庫県南部地震をはじめ、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震等、大規模地震が頻発している。また、近い将来、南海トラフ地震等の巨大地震の発生も懸念されている。一方、設計の観点からみると、入力地震動はますます大きくなり、構造物はより頑強なものへとなりつつあるが、過密配筋などの問題もあり、剛な構造物で巨大地震に対抗するには限界がある。

このような状況下において、土木学会をはじめとして各種提言がなされ、巨大地震に対し、従来の耐震構造では耐震安全性確保に限界があり、免震・制震構造の導入が不可欠であることが指摘されているが、免震技術については、建築構造物への導入が一般化しているのに対し、土木構造物への導入は橋梁を除き推進されておらず、研究開発も十分でないのが現状である。

このように、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中、免震デバイスを適用せず、特に地盤・基礎に注目した斬新かつ効率的な杭頭絶縁基礎による免震技術の開発に着手することとした。

本稿では、杭頭絶縁基礎の免震効果確認のために実施した遠心模型振動実験^{1)~5)}と、そのシミュレーション解析の結果について述べる。

2. 杭頭絶縁基礎による免震の概要

杭頭絶縁基礎による免震の概念図を図-1に示す。杭を構造物に結合させる従来の杭基礎に対し、杭頭絶縁基礎は杭頭を上部構造物と絶縁することで構造物に伝播する地震動(波動エネルギー)が抑制され、構造物に作用する加速度(慣性力)が低減される。また、構造物に作用する加速度が低減することで、杭頭部に発生する応力も低減される。

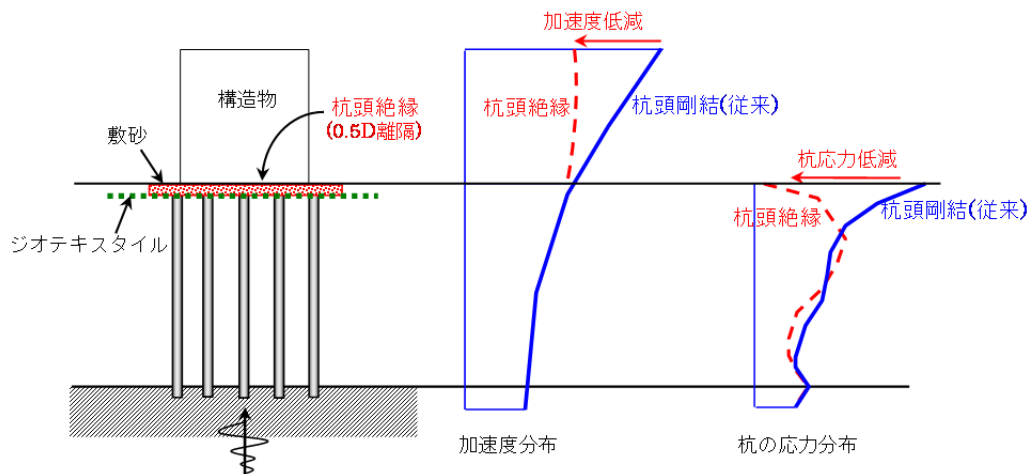


図-1 杭頭絶縁基礎による免震の概念図

3. 遠心模型振動実験による免震効果の検証

(1) 実験概要

杭頭絶縁基礎による免震効果を検証するため、遠心模型振動実験を実施した。実験は、**図-2**に示すように、長さ770mm、幅470mm、高さ370mmのせん断土槽を用い、遠心加速度30g場(模型縮尺1/30)で実施した。模型地盤は乾燥地盤であり、地盤材料として7号珪砂を用い、空中落下法により相対密度 $Dr=60\%$ を目標に作製した。

杭模型は、外径 $D=17\text{mm}$ 、肉厚 $t=1\text{mm}$ 、長さ268mmの真鍮製パイプで9本杭構造とし、杭芯距離は42.5mm(2.5D)とした。構造物模型と杭頭を8.5mm(=0.5D)絶縁し、杭頭部には真鍮製のキャップをして杭内部に砂が入らないようにした。杭先端はセメント系改良体(せん断波速度 $V_s=300\text{m/s}$)に37mm根入した。構造物模型は、長さ136mm、幅136mm、高さ88mmのアルミ製ブロックとし、重量は4.4kg(実物換算1,190kN、接地圧 69.9kN/m^2)である。構造物の残留沈下の抑制を目的に、杭頭にジオテキスタイル(204mm×204mm、引張り強度12kN/m)を敷設した。

図-2には、併せて杭頭絶縁基礎の計測器配置を示しているが、構造物から157mm離れた位置に加速度計を3深度設置し、地盤の沈下と水平変位を計測するために、レーザー変位計を2箇所を設置した。また、構造物については、加速度計(水平、鉛直)を設置するとともに、レーザー変位計により1箇所の水平変位と3箇所の鉛直変位を測定した。杭内部にはひずみゲージを貼り付け、P1杭が7深度、P2杭とP3杭が6深度、P4杭が1深度で杭ひずみを計測した。

実験は**表-1**に示す4ケースについて行った。なお、**図-2**はCase2の遠心模型振動実験モデルと計測器配置を示すものであるが、他のケースも同様である。入力波は**図-3**に示す60Hz10波(実物換算2Hz)の正弦波であり、最大加速度は9g(実物換算300gal)を目標とした。

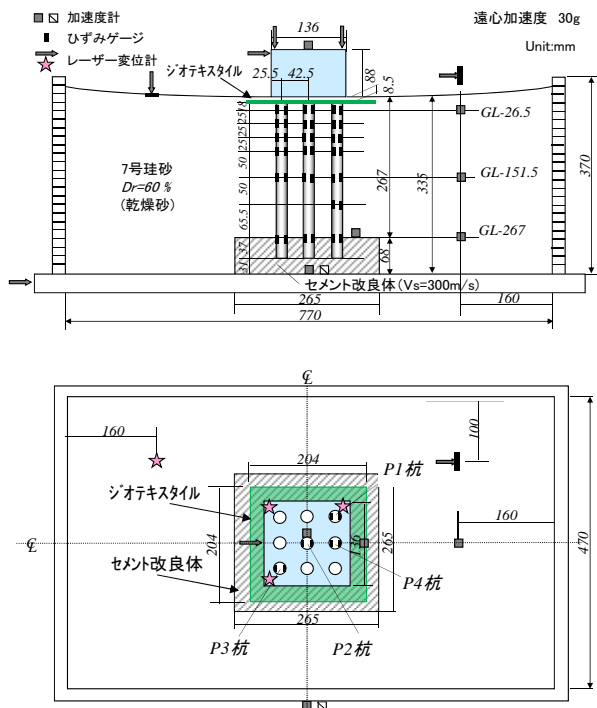


図-2 遠心模型振動実験モデルと計測機器配置

表-1 実験ケース

ケース	基礎	最大入力 加速度(Gal)
Case1	杭頭絶縁基礎	309
Case2	杭頭絶縁基礎 +ジオテキスタイル	298
Case3	杭頭剛結基礎	336
Case4	直接基礎	243

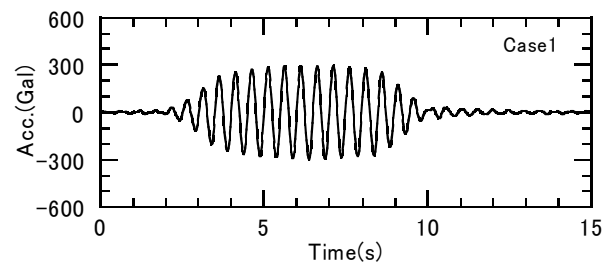


図-3 入力波形(プロトタイプ)

(2) 実験結果

以下、遠心模型振動実験結果を示すが、値は全て実物換算で示したものである。

図-4 に最大加速度の深度分布を示す。地盤中の加速度は GL-10m~-4m ではほぼ一定の加速度を示し、GL-4m 以浅では深度が浅くなるにつれ加速度応答が増加する傾向を示している。この傾向はどの実験ケースにおいてもほぼ同様であった。構造物の最大加速度は、杭頭剛結基礎 (Case3) では 900gal を超えている。一方、杭頭絶縁基礎 (Case1, Case2) では 450~550gal 程度となっており、杭頭剛結基礎と比較して構造物の最大応答加速度が 40%~50% 低減していることが確認された。直接基礎 (Case4) の最大応答加速度も 600gal 以下で杭頭絶縁基礎と同程度であった。

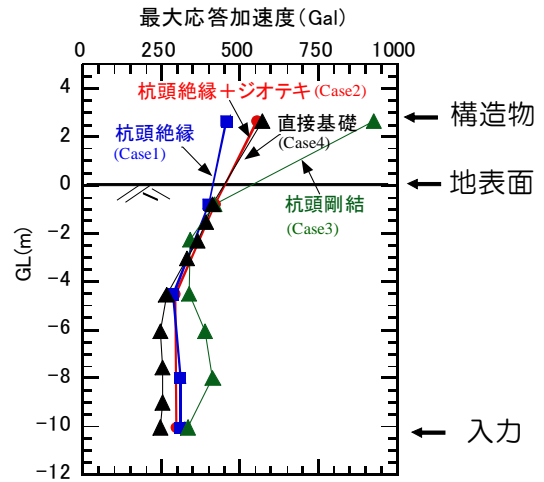


図-4 最大応答加速度の深度分布

図-5 に各実験ケースにおける杭の最大曲げひずみの深度方向分布を示す。杭頭付近において、杭頭剛結基礎 (Case3) では端部 P1 杭、P3 杭が中央部 P2 杭よりも曲げひずみが大きく、杭頭絶縁基礎 (Case1, Case2) では逆に中央部 P2 杭が端部 P1 杭、P3 杭よりも曲げひずみが大きくなっている。こうした傾向は軸ひずみでも同様であった。

杭頭絶縁基礎 (Case1, Case2) では杭頭剛結基礎 (Case3) と比較し、端部、中央部のいずれの杭においても杭頭付近で曲げひずみが大幅に低減している。また、深度方向でも端部 P1 杭、P3 杭では曲げひずみは低減し、ジオテキスタイルを敷設した Case2 では中央部 P2 杭も概ね曲げひずみは低減していることが確認された。

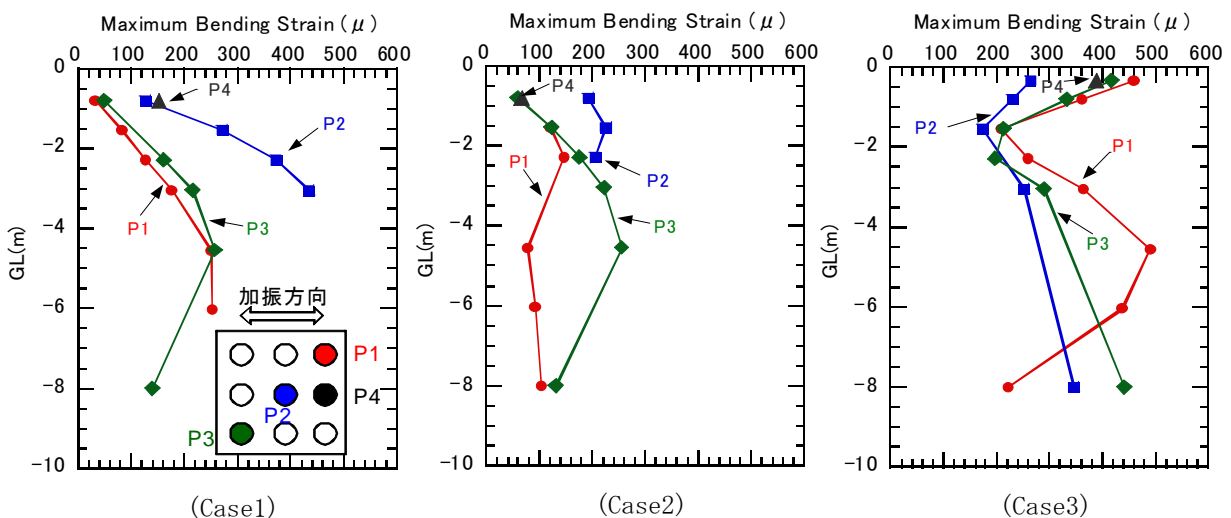


図-5 杭の最大曲げひずみの深度方向分布

図-6 に構造物と地盤の沈下量を比較したグラフを示す。構造物の沈下量は、構造物頂部の3箇所で計測した鉛直変位(絶対沈下量)の平均値として算定した。

地盤の沈下量について、直接基礎(Case4)の実験では、杭頭絶縁基礎の実験と比較して入力加速度が小さいため、15mm程度小さくなっている。一方、構造物の沈下量は、直接基礎(Case4)では160mm程度、杭頭絶縁基礎(Case1)では120mm程度、ジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎(Case2)では90mm程度となっており、直接基礎(Case4)の沈下量と比較して、杭頭絶縁基礎(Case1)では約25%、さらに、ジオテキスタイルを敷設した杭頭絶縁基礎(Case2)では約40%、構造物の沈下が抑制されている。

また、地盤と構造物の相対沈下量を比較すると、直接基礎(Case4)に対し、杭頭絶縁基礎(Case1, Case2)では大幅に小さくなっている。特にジオテキスタイルを敷設したCase2では、地盤の沈下量より構造物の沈下量が小さくなっている。これは、杭の存在と、写真-1の実験後の模型地盤断面に示すように、ジオテキスタイルのテンション抵抗によって杭頭部地盤の移動が抑制されたため、構造物と地盤の相対沈下を抑えることができたためと考えられる。

4. シミュレーション解析

杭頭絶縁基礎の実構造物への適用に向け、Case2(杭頭絶縁基礎+ジオテキ)の遠心模型振動実験のシミュレーション解析を行った。

シミュレーション解析は実物換算の形状寸法で実施することとし、地盤、構造物はソリッド要素、杭は梁要素、ジオテキスタイルはシェル要素でモデル化した。杭頭付近の解析モデルを図-7に示すが、外径 D=510mm の杭形状を考慮し、地盤(ソリッド要素)の節点と対応する同一レベルの杭(梁要素)の節点とに同変位条件を付与して杭体積を考慮した。非線形性については、

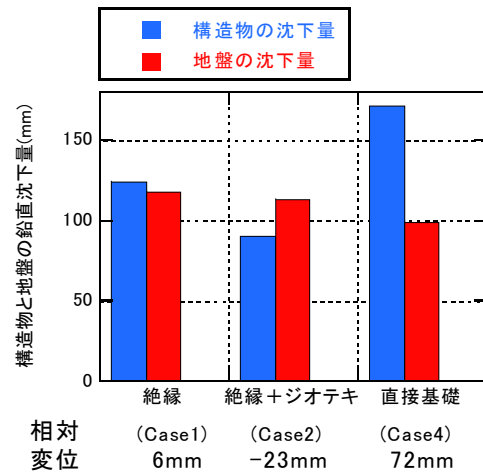


図-6 構造物と地盤の沈下量

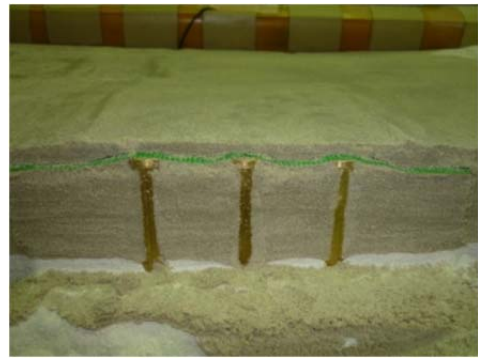


写真-1 実験後の模型地盤断面 (case2)

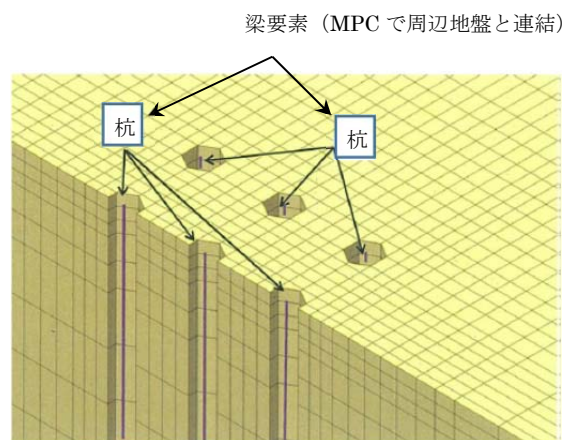


図-7 解析モデル (杭頭付近)

MPC (Multiple Point Constraint : 多点拘束)

地盤にのみ多重バネRamberg-Osgoodモデルとおわんモデル⁶⁾を適用した非線形性を考慮し、地盤以外は線形弾性体と仮定した。解析定数を表-2に示す。

シミュレーション解析結果の一例を図-8、図-9に示す。地盤については、水平加速度ならびに鉛直変位とも遠心模型振動実験の結果を精度良く模擬できていることがわかる。一方、構造物について、水平加速度は概ね実験結果を模擬できているものの、鉛直変位については、解析結果は実験結果の1/4程度と小さな値となった。ところで、最大合ひずみ分布において、杭頭付近の地盤には局所的に40%近くの大きなひずみが発生している。このような大ひずみ発生現象を模擬するためには、破壊規準を導入する等、地盤の構成則を改良する必要がある。

表-2 解析定数

	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ヤング係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)
構造物	26.5	2.10×10^7	0.2	—	—
杭	21.0	1.01×10^8	0.2	4.520×10^{-2}	1.308×10^{-3}
シボキス タイル	6.8	1.01×10^6	0.2	— ($t=0.006\text{m}$)	—

	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	規準ひずみ $\gamma_{0.5i}$	ポアソン比 ν
地盤*)	13.6	3.666×10^3	—	8.171×10^{-5}	0.33
セメント系改良体	13.6	—	1.088×10^5	—	0.33

*) 地盤については拘束圧依存性を考慮する。表中の値は単位有効拘束圧 1kN/m²での G_0 、 $\gamma_{0.5i}$ を示す。

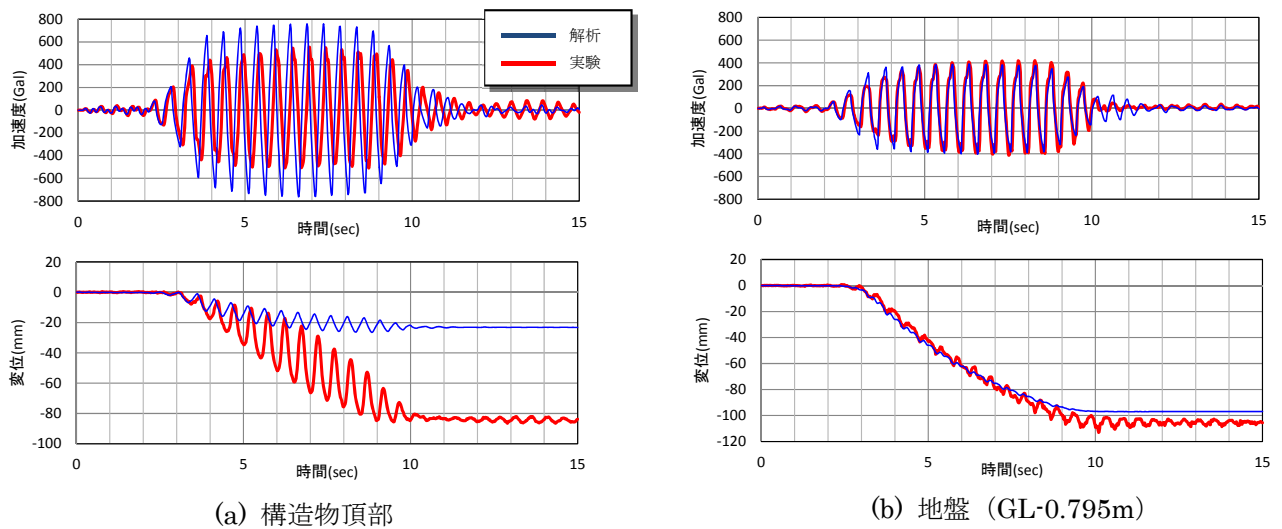


図-8 水平加速度・鉛直変位波形（プロトタイプ）

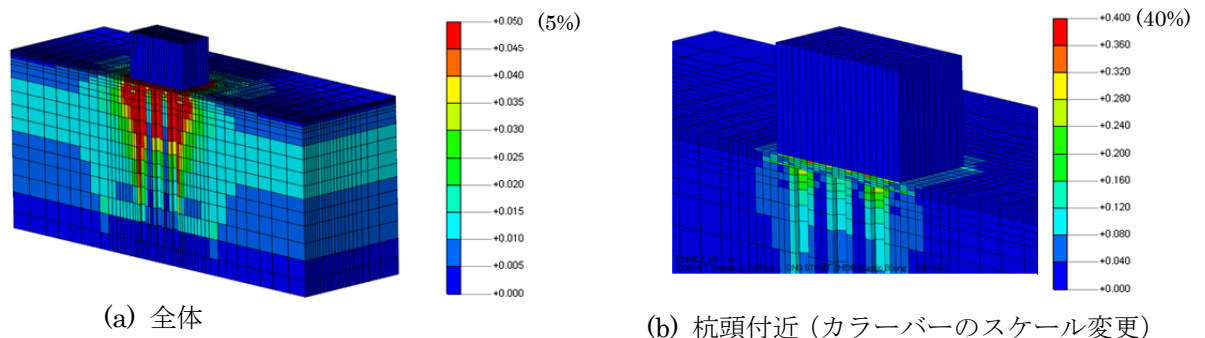


図-9 最大合ひずみ分布

5. まとめ

近い将来、南海トラフ地震等の巨大地震の発生が懸念されており、従来の耐震構造では耐震安全性確保に限界があり、免震・制震構造の導入が不可欠となっている。

杭頭絶縁基礎による免震は、地盤・基礎に注目した斬新かつ効果的な免震工法であり、免震デバイスを使用せず、かつ構造物との接合も行わないので、単純な構造で施工も簡単である。また、杭頭と床版の過密配筋の問題も解消される。さらに、既設構造物の耐震補強にも有用で、既設杭を再利用した新設構造物の基礎とすることも可能であり、大幅なコスト削減効果や環境負荷低減効果が見込まれる。

本稿では、杭頭絶縁基礎の免震効果確認のために実施した遠心模型振動実験およびシミュレーション解析の結果について述べた。遠心模型振動実験により、杭頭絶縁基礎の免震効果が検証され、従来の杭頭剛結基礎に対し、構造物の加速度や杭のひずみ（応力、断面力）が大幅に低減されることが確認された。また、遠心模型振動実験のシミュレーション解析では地盤の挙動は概ね実験結果を模擬でき、構造物についても水平加速度は概ね模擬することが確認できた。一方で、構造物の鉛直変位は実験結果の 1/4 程度であること、杭頭絶縁基礎の杭頭付近の局所的に 40%を超える大ひずみの発生等も確認され、破壊基準を導入した地盤の構成則の改良などの必要性が認識された。今後、より精度高いシミュレーション解析を試み、実構造物への適用に向けて本技術を確立していく予定である。

[参考文献]

- 1) 張至鎬他: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, pp.2446-2452, 2010.
- 2) 田地陽一他: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.
- 3) 田地陽一他: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.
- 4) 田地陽一他:杭頭絶縁免震基礎の地震時挙動に関する研究, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会, 2012.
- 5) 坂井康伸他:杭頭絶縁免震工法の開発, 土木建設技術発表会 2013, pp.275-280, 2013.
- 6) 福武毅芳:おわんモデルと履歴関数モデルを併用した構成式, 地盤材料の構成式ワークショップ(第 1 回), 地盤工学会, 2012.

[備考] 本稿は、参考文献 1)~5) にて発表済みの内容を含んでいる。