

砂・洪積砂地盤における防潮壁杭基礎の地震時挙動に関する遠心力模型実験

大林組 正会員 ○加藤一紀, 樋口俊一
電力中央研究所 正会員 石丸真, 沢津橋雅裕
セレス 平賀健史

東京電力ホールディングス 及川兼司
中部電力 正会員 中村秀樹
関西電力 正会員 横田克哉

1. はじめに

原子力発電所の耐震性検討では、地震時の地盤の液状化に対する判定や、液状化の影響を考慮した安定性評価が行われている。しかし、耐震性検討において対象となる密な砂や洪積砂等の地盤では要素試験や模型実験の事例が少ないことから、合理的な評価が難しい可能性がある。

本研究では、要素試験や模型実験によりこれらのデータを蓄積するとともに、数値解析により液状化の影響評価を合理的に行う方法を確立することを目的としている。本稿では、砂・洪積砂地盤の液状化を対象とした遠心力模型実験について報告する。

2. 実験条件

図1に鋼製せん断土槽（内寸 1950mm × 600mm × 660mm）に作製した杭基礎を有する防潮壁模型、地盤模型、および奥行中央断面における計測器の配置を示す。遠心重力は 50G とし、図中の数値は表1の相似則に基づき実物換算した寸法を表す。以降、断りのない限り実物換算した値を用いる。地盤模型は下部から、ソイルセメントによる支持層 ($q_u=1.06\text{MN/m}^2$)、洪積砂を模擬した地盤材料¹⁾による洪積砂層 ($\rho_d=1.506\text{Mg/m}^3$, $q_u=0.329\text{MN/m}^2$)、沿岸部の表層付近の風成層から採取した細砂²⁾による砂層

($\rho_d = 1.663\text{Mg/m}^3$, $G_s = 2.668$, $\rho_{d\max} = 1.649\text{Mg/m}^3$, $\rho_{d\min}=1.429\text{Mg/m}^3$, 拘束圧 50kN/m^2 の液状化強度 0.3) より構成されている。間隙流体には粘度 $50\text{mN/m}^2 \cdot \text{s}$ のシリコンオイルを脱気して用い、重力場において真空引きしながら支持層上部より地盤模型へと注水した。水位は地表面とした。防潮壁模型の杭先端は土槽に溶接した鉄板とボルト固定し、杭頭とフーチング、フーチングと壁はボルト固定した。防潮壁模型の壁はアルミで作製し、ターゲットとする実物と重量、固有周期が合うように高さと同様に調整した。また、フーチングも同様にアルミ製とし、幅と重量が実物と同一となるように板厚を調整した。杭はステンレス製の中空パイプ（模型寸法： $\phi=24\text{mm}$, $t=0.5\text{mm}$ ）を用い、図1に示す深度の内側にひずみゲージを設置した。

加振ステップと支持層上端における最大加速度を表2に示す。模擬地震波は、直前の加振による地盤の過剰間隙水圧が消散したことを確認した後に、加振履歴を受けた状態で入力した。

3. 実験結果と考察

図2(a)~(d)にケース d04 における水平加速度・過剰間隙水圧比・鉛直変位・水平変位の時刻歴を示す。

図2(b)より自由地盤における過剰間隙水圧は、

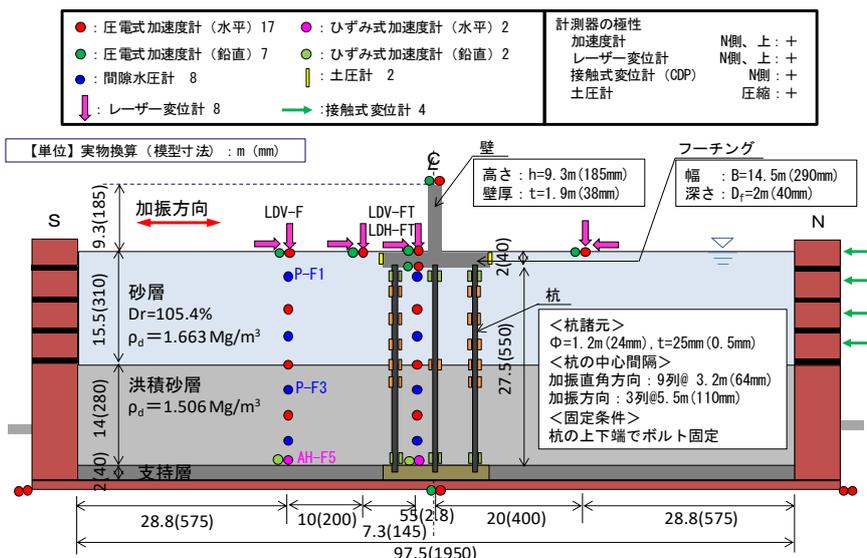


図1 地盤模型と計測器配置（中央断面）

● : 圧電式加速度計 (水平) 17	● : ひずみ式加速度計 (水平) 2	計測器の極性 加速度計 N側、上 : + レーザー変位計 N側、上 : + 接触式変位計 (CDP) N側 : + 土圧計 圧縮 : +
● : 圧電式加速度計 (鉛直) 7	● : ひずみ式加速度計 (鉛直) 2	
● : 間隙水圧計 8	● : 土圧計 2	
↓ : レーザー変位計 8	→ : 接触式変位計 4	

表1 相似則

物理量	縮尺
変位・長さ	1/50
速度	1
加速度	50
密度	1
時間	1/50
振動数	50
応力	1
間隙水圧	1

表2 加振ステップ

ケース	加振波	支持層上端最大加速度
d01	ホワイトノイズ	-
d02	ホワイトノイズ	0.3m/s ²
d03	模擬地震波	0.2m/s ²
d04	模擬地震波	9.6m/s ²
d05	ホワイトノイズ	0.3m/s ²
d06	模擬地震波	13.8m/s ²
d07	ホワイトノイズ	0.4m/s ²

キーワード 洪積砂, 液状化, 杭基礎, 遠心力模型実験

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株)大林組技術研究所構造技術研究部 TEL042-495-1264

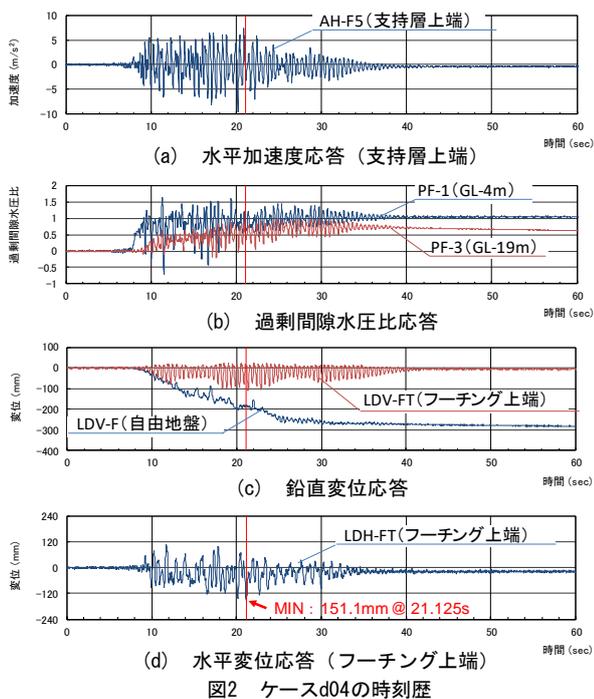


図2 ケースd04の時刻歴

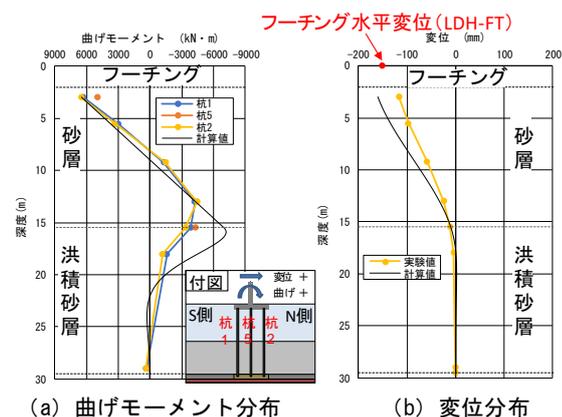


図3 杭の深度方向の応答 (ケースd04)

洪積砂層 (GL-19m) では 25~30s まで水圧が上昇し、その後加振中に水圧が消散傾向にある。一方、砂層 (GL-4m) では 10s 付近で過剰間隙水圧が初期鉛直有効応力相当まで上昇している。ここで初期鉛直有効応力は、自重解析から算出した水圧計設置位置における値を示している。フーチング直下地盤においても概ね同様の応答が得られた。

図 2(c) よりフーチングでは鉛直変位はほとんど生じておらず、自由地盤では鉛直変位は約 300mm であった。図 2(d) よりフーチング上端の最大水平変位は 151.1mm であった。

図 3(a) にフーチング上端で最大水平変位が計測された時刻 21.125s における杭の曲げモーメント分布を示す。曲げモーメントは別途実施した杭模型の 4 点曲げ試験結果である M-φ 関係に基づき、遠心実験で得られた杭の曲げひずみから算出した。ケース d 04 における曲げひ

ずみの最大応答塑性率は 0.48 ($M_y = 15700\text{kN} \cdot \text{m}$) で、杭の応答は弾性領域内に収まっている。

曲げモーメント分布より、砂層と洪積砂層の層境界よりやや浅い地点で負曲げが最大値をとり、フーチング近傍 (杭頭) では正曲げとなっている。また、杭先端では土槽と杭はボルト固定されているものの、洪積砂層において深度方向に曲げモーメントはゼロに収束している。このことから、洪積砂層では間隙水圧が上昇するものの、本実験で生じた杭の変位に対して十分な抵抗力を発揮していると考えられる。

図 3(b) に、時刻 21.125s における杭 1 と杭 2 における曲げモーメント分布よりモーメントエリア法により算出した変位分布の平均値を示す。

ここで図 3(a), (b) に示す計算値は、突出杭に対する曲げモーメントおよびたわみを表す計算式³⁾に基づき算出した深度分布である。過剰間隙水圧比が 1.0 に達している砂層を地上部分 (地盤反力ゼロ) と仮定し、洪積砂層の地盤反力係数を一軸圧縮試験から得た変形係数 $E_{50} = 34\text{MN/m}^2$ より算定した。また、フーチングの慣性力、およびフーチングの N 側と S 側側面に作用する動土圧の合力から、杭一本当たりの水平荷重を杭軸直角方向力 H として導出した。

図より、曲げモーメント分布および変位分布は概ね一致した結果を示しているが、曲げモーメント分布については層境界、変位分布については杭頭付近で差が生じている。この要因として、砂層の下端部において過剰間隙水圧が初期鉛直有効応力相当まで上昇せず、地盤反力が残存していた可能性等が考えられる。

4. まとめ

- ・砂層は過剰間隙水圧比が 1.0 に達しているものの、地盤の鉛直ひずみは 1.9% であった。
- ・杭の応答は典型的な杭頭固定の場合の曲げモーメントおよび変位分布を示している。
- ・砂層について地盤反力を考慮しない突出杭での計算結果と実験値が概ね整合することから、砂層は間隙水圧上昇後、杭に対してほとんど抵抗力を発揮していないと考えられる。
- ・洪積砂層は、間隙水圧の上昇は見られたものの、杭基礎に対して水平方向の反力としての剛性を保持していた。

謝辞：本論文は、2018~2020 年度原子力リスク研究センター共通研究 (北海道電力、東北電力、東京電力 HD、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発、日本原燃) によって得られた成果である。

参考文献

- 1) 沢津橋他：人工材料による模擬洪積砂の液状化特性、第 56 回地盤工学研究発表会、2021、(投稿中)。
- 2) 石丸他：液状化強度の空間的なばらつきが砂地盤の地震時挙動に及ぼす影響、電力中央研究所報告、2021。
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編