論文 密な地盤に埋設された RC 立坑の地震応答に関する実験的検討

渡部 龍正*1・松尾 豊史*2・石丸 真*3・加藤一紀*4

要旨:本研究では、遠心載荷実験に基づいて密な地盤の地震時挙動およびRC立坑模型の損傷・変形性状を評価した。この結果、密な地盤(Dr=90%)で液状化範囲が限定的であり、構造物が埋設された条件では、大加振入力(最大振幅 2436gal)を行った場合でも、明確な液状化には至りにくいことが明らかになった。また、 飽和状態の地盤下層が過剰間隙水圧の上昇に伴って軟化し、乾燥状態の上層とともに変形することよって、 上層と下層の境界部において、構造物にせん断変形が生じることが確認された。

キーワード:鉄筋コンクリート,三次元構造,一部液状化,遠心載荷実験,地盤・構造物連成挙動

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 製地中構造物の耐震性能照査 は、地盤・構造物連成系の二次元有限要素 (FEM) 解析 を用いて横断面に対して行われるのが一般的である¹⁾。 一方で、地震応答評価の高精度化を図るためには、三次 元 FEM 解析が有効となる場合もある。また、密な地盤 が限定的に液状化(過剰間隙水圧の上昇に伴う軟化)す る場合に対しては適用性が十分に検討されていなかった。

地中に埋設された条件下で三次元 RC 構造物の地震応 答について検討した実験的な事例は少ない。面内力と面 外力を同時に受ける RC 構造物の地震応答に着目した既 往実験としては、宮川ら²⁾のRC 立坑を対象とした振動 台実験が挙げられる。地盤においても、緩い液状化地盤 に埋設された構造物の振動台実験は多く存在するが、密 な飽和地盤中に埋設された構造物の地震時挙動を検討し た事例は少ない。密な飽和地盤中に埋設された RC 構造 物の地震時挙動に着目した既往実験としては、河井ら³⁾ の飽和地盤中に埋設されたボックスカルバートを対象と した遠心模型実験が挙げられる。いずれも, RC 構造物の 三次元挙動もしくは密な飽和地盤の液状化による構造物 の影響検討を行った実験ではあるが、それらの影響を併 せて検討を行った事例はない。また,既往研究の結果⁴⁾ から,地盤の一部の層のみが軟化・液状化した場合には, 境界部において構造物の損傷や変形が顕著になる可能性 がある。

これらより,本研究では,上層を乾燥状態(不飽和層), 下層を飽和状態(飽和層)とした密な地盤の地震時挙動 および面内力と面外力を同時に受ける RC 立坑模型の非 線形領域までの損傷・変形性状を明らかにするとともに, 地盤・構造物連成系の三次元非線形地震応答解析手法の 適用性を検証するための実験データを取得することを目 的として,密な地盤に埋設された RC 立坑模型の遠心載 荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 実験方法と計測機器

地盤物性は拘束圧に依存するため,縮尺模型で実物の 挙動を検討する場合,遠心加速度を与えて地盤模型内の 応力状態を実物に近づける必要がある。そこで,遠心重 力 30G の遠心載荷を行った。相似則に基づき,実物に対 する縮尺は変位・長さ・時間が 1/30 倍,速度・密度・応 力・間隙水圧が1倍,加速度・振動数が 30 倍となる。以 降,断りがない限り,相似則に基づき実物換算値を示す。

構造物模型は断面外形が4.5m×4.5m,内空3.0m×3.0m, 壁厚 0.75m の RC 立坑を想定した。図-1 に実験概要図 および計測機器設置位置図(模型スケール)を示す。計 器名は,後述する計測結果に使用した計器のみを示す。



*1(一財)電力中央研究所地球工学研究所構造工学領域主任研究員 修(工) (正会員)
*2(一財)電力中央研究所地球工学研究所構造工学領域上席研究員 博(工) (正会員)
*3(一財)電力中央研究所地球工学研究所地震工学領域主任研究員 博(工)
*4(株)大林組 技術本部技術研究所構造技術研究部 博(工)

RC 立坑の配置は、水平 1 方向加振で水平 2 方向加振 の影響(壁に面内・面外力が同時に作用する状況)を把 握できるように、各壁を加振方向に対して 45°回転させ て配置した。計測項目は、振動台上の加速度、地盤の加 速度、RC 立坑頂部および底部の加速度、RC 立坑頂部の 変位、自由地盤部地表面の変位、せん断土槽の各層変位、 RC 立坑とせん断土槽の土圧とした。それに加えて構造 物の応答として、鉄筋ひずみ(主筋)と軸方向ひずみを 計測している。図-2 に鉄筋ひずみと軸方向ひずみの計 測位置図(模型スケール)を示す。鉄筋ひずみゲージは 基部を中心に配置し、飽和層と不飽和層の境界付近まで 配置した。立坑の変位分布(特に飽和層と不飽和層の分 布)を把握するため、RC 立坑内部にアルミ板を設置し、 それに深度方向にひずみゲージを配置し、計測した。



2.2 実験条件

地盤模型に用いた砂は、栃木産珪砂5号(以降, 珪砂 5号と称す)である。図-3に実験で用いる珪砂5号の 粒度分布を示す。最大粒径は 2mm で細粒分含有率は 0.2%と少なく、粒径の揃った地盤材料である。相対密度 は90%と密に締固められた状態とした。地盤模型の作製 方法として, 乾燥した砂試料を用いて, 高さ方向に分割 した層ごとに相対密度が90%となるように、バイブレー タによる振動締固めで地盤模型を作製した。その後、地 盤模型を土槽ごと真空箱の中に設置し,-0.1MPa の環境 下で予め脱気した粘性流体 (30cSt のシリコンオイル)を 支持層上部より注水した。なお、水位管理は土槽壁面に 設けた水位計側管により実施した。本実験の地盤条件は, 上層を乾燥状態とし,下層を飽和状態とした。層厚(模 型スケール) は不飽和層を 340mm, 飽和層を 170mm と して、飽和層と不飽和層の層厚比率が 1:2 となるように 設定した。図-4 に拘束圧 120kPa における珪砂 5 号 (Dr=90%)の非排水繰返し中空ねじりせん断試験(液状 化強度試験)における繰返しせん断応力振幅比と繰返し 載荷回数の関係を示す。図-4より液状化強度 RL20=0.31 程度である。また、図-5 に液状化強度に相当するせん 断応力比 0.3 での液状化強度試験の要素挙動を示す。せ ん断ひずみの時刻歴より、ひずみは徐々に増幅する傾向 を示しており,緩い砂地盤特有の急激なひずみ増加とは なっていない。また,過剰間隙水圧比の時刻歴において も,過剰間隙水圧比が 1.0 に到達しても剛性の回復によ り,上昇と下降を繰り返す傾向がみられる。以上より, 本実験に使用する珪砂5号(Dr=90%)は、一般的な液状 化(緩い砂地盤等の液状化で側方流動等を起こすもの) ではなく,密な地盤特有の剛性の回復(サイクリックモ ビリティ)を伴った地盤材料である。



2.3 RC 模型

構造物模型は、外寸 150mm×150mm、内寸 100mm× 100mm、部材厚 25mm、高さ 546mm の中空正方形断面の RC 立坑模型である。縦筋・横筋ともに 25mm 間隔で D1.9 の縮尺鉄筋を配筋している。配筋図を図-6 に示す。こ こで用いた縮尺鉄筋は、一般に使用される異形鉄筋と同 様に節を有している。縮尺鉄筋の材料試験結果を表-1 に示す。底部は鋼板と主筋を溶接することにより、固定 条件とした。コンクリートは遠心模型実験を対象とした 既往研究の配合⁵⁾を参考とし、表-2 に示す配合のマイ クロコンクリートを採用した。表-3 にマイクロコンク リートの材料試験結果を示す。



図-6 試験体断面の配筋図(単位:mm)

表-1 鉄筋の材料試験結果

ホティング	ヤング係数	降伏強度	引張強度
呼び佺	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
D1.9	203	307	335

表-2 マイクロコンクリートの配合						
W/C	s/a	Air	単位量 kg/m ³			
%	%	%	W	С	S	G
110	43.0	6.0	195	177	788	1037
 C:普通ボルトランドセメント(密度3.16g/cm³,太平洋セメント) S:東北産硅砂,石灰石微粉末(特級) 混合重量比3:7 G:瀬戸産硅砂4号,5号,6号 混合重量比3:4:3 混和材:高性能AE減水剤3.0%,増粘剤0.02% (セメント+石灰石微粉末の単位量に対する比) 						

表-3	マイクロ:	コンクリー	トの材料試験	験結果
	ヤング係数	圧縮強度	引張強度	

インン休奴	几個强度	力成强度
kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
30.7	33.0	1.87

2.5 加振条件

自重として 30G の遠心力を作用させながら,水平1方向に加振を行った。加振は地震波による微小加振から開始し,振動台で入力できる最大レベルの地震波を作用させた。図-7に入力波形を示す。



3. 地盤・構造物連成系の地震応答評価

3.1 実験結果および考察

(1) 加速度応答

図-8 に各深度で計測された自由地盤部の水平加速度 時刻歴を示す。入力加速度(振動台上面)の最大振幅 2436gal に対して, 地表面では最大加速度 2957gal が計測 された。(b) 飽和層と不飽和層の境界の加速度時刻歴に おいて、飽和層の間隙水圧の上昇によって、剛性低下す るため、概ね加速度振幅は減少傾向ではあるが、12,20、 24s 付近に短周期のスパイク状の波形がみられる。これ は、後述する過剰間隙水圧比の時刻歴からその付近で負 圧が確認されており,初期の地盤剛性よりも大きくなっ たことにより、加速度がスパイク状の波形を示したもの と考えられる。このことから、密な地盤特有のサイクリ ックモビリティ現象を示したことが、加速度波形から分 かる。(a) 地表面の加速度においても、その影響で 12, 20, 24s 付近にスパイク上の波形がみられる。図-9 に RC 立坑頂部の加速度時刻歴を示す。加速度振幅は、入力 加速度に比べて小さくなっている。また、地盤でみられ たスパイク状の波形はみられない。図-10に加速度応答 スペクトルを示す。底面 (AH-F5), 地表面 (AH-F1), RC 立坑頂部(AH-T)を示しており、地表面に近づくにした がって RC 立坑, 地盤ともに応答加速度は小さくなる傾 向となる。しかしながら、地盤においては周期 0.05~0.1s 付近の短周期で応答加速度が増幅している。地盤の初期 固有周期が 0.3s であることから、地盤剛性の軟化により 0.3s 以上の加速度応答が大きくなることは考えられるが, 短周期で増幅傾向となっているため、サイクリックモビ リティの影響による地盤剛性の増大が原因と考えられる。





RC 立坑については、短周期の応答加速度の増幅はみら れない。加速度時刻歴および加速度応答スペクトルから、 構造物の応答加速度は、地盤剛性の増大による短周期加 速度の影響は小さいと考えられる。また、周期0.1s以上 の応答加速度は地盤よりも大きい傾向を示している。

(2) 過剰間隙水圧比

図-11 に自由地盤部の過剰間隙水圧比の時刻歴を示 す。過剰間隙水圧比は過剰間隙水圧を初期の鉛直有効応 力で除した値である。10~14sの間で最大値を示してお り、入力加速度時刻歴での最大振幅が発生している部分 と整合する。最大過剰間隙水圧比は概ね 0.5~0.6 程度で あり、地盤は剛性を有しており、液状化には至っていな い。過剰間隙水圧比の値は、一瞬ではあるが 1.0 を超え ている部分があるが、密な地盤特有のサイクリックモビ リティの影響で、剛性が回復し、一瞬は水圧が上昇する が、すぐに下降する傾向を示している。また、14s以降は 加振中にも関わらず、水圧の消散がみられ、加振終了時 (30s以降)には概ね水圧が消散し終わり、0となってい る。これは、飽和層の層厚が薄かったことと、砂の透水 係数が大きかったことで、加振中に非排水条件になりに くかったと推察される。図-12 に RC 立坑周辺の過剰間 隙水圧比の時刻歴を示す。自由地盤部に比べて過剰間隙 水圧比が小さい傾向を示している。これは, RC 立坑の影 響で変位が拘束されることによって、間隙水圧の上昇が 抑制されたものと考えられる。





(3) RC 模型の損傷状況(ひび割れ,鉄筋ひずみ)

縮尺鉄筋の降伏ひずみは材料試験から 1517µ となる。 図-13 に鉄筋ひずみの時刻歴(I側のみ)を示す。+が圧 縮方向,一が引張方向となる。基部の I-0 のみ降伏に至 っており,それ以外は降伏まで至っていない。O側につ いても同様に基部のみ降伏に至った。時刻は 10s 付近で 降伏しており,1 つ目の主要動部分で降伏に至った。実 験後,RC 模型のひび割れ確認を行い,模型基部(隅角部 付近)の I-0,O-0 の両側でひび割れとコンクリートの欠 損を確認した。図-14 に構造物の損傷状況を示す。



図-14 構造物の損傷状況

(4) 変位応答

図-15 に自由地盤部の鉛直変位時刻歴を示す。鉛直変 位は加振中から沈下が漸増し,加振終了後には一定とな り,最終的に 92mm の沈下量が発生した。加振終了時点

で水圧消散し終わっているため、その後の沈下はなかっ た。図-16 に RC 立坑の水平・鉛直変位時刻歴を示す。 RC 立坑の頂部水平変位は最大 60.6mm であり, 変形角は 0.4%程度であった。鉛直変位は、10s 程度までは水平変 位の影響で、上下に鉛直変位が発生しているが、12s以降 は底部の主筋が降伏した影響により、伸長する傾向とな った。最終的な残留鉛直変位は+5~8mm 程度となった。 図-17 にせん断土槽の変位時刻歴を示す。代表として CDP-1,3,5 を示す。CDP-1,3 は不飽和層, CDP-5 は飽和層 の変位を示している。CDP-1,3 は 18~20s 付近で最大変 位を示しており,入力加速度時刻歴の2つ目の主要動部 分で最大応答となる。CDP-5 は 10~14s 付近で最大変位 を示しており、入力加速度時刻歴の1つ目の主要動部分 で最大応答となる。これは、過剰間隙水圧比が最も大き い時刻と整合的で、過剰間隙水圧の上昇による地盤の軟 化の影響で変位が増大したものと考えられる。図-18 に 鉄筋降伏前と鉄筋降伏後の RC 立坑の変形角と自由地盤 部の変形角の比較図を示す。鉄筋降伏までは, RC 立坑よ りも地盤変位の方が大きく, RC 立坑変形角/地盤変形 角の比率は 0.79 程度で 20%ほど地盤変位の方が大きい。 しかし,鉄筋降伏後の比率は1.01と地盤変位とRC 立坑 変位はほぼ等しい。これは、鉄筋の降伏により、地盤と 構造物の剛性差が小さくなったことが原因と考えられる。





3.2 密な地盤の軟化挙動が構造物に及ぼす影響(1) 飽和層と不飽和層の境界部の挙動

図-19にRC立坑内部に設置したアルミ板の最大軸方 向ひずみ分布図を示す。AI-2~AI-5までの飽和層と不飽 和層の境界部分を取り出して示す。ひずみの値はコンク リートのひび割れ発生程度であるが、飽和層と不飽和層 ではひずみの値が違うことがわかる。これは、飽和状態 の地盤下層が軟化することにより、乾燥状態の上層とと もに変形し、構造物にせん断変形が生じ、飽和状態の下 層部分の軸方向ひずみが大きくなったものと考えられる。



(2) 既往研究との比較検討

河井ら3)の飽和地盤中に埋設されたボックスカルバー トを対象とした遠心模型実験は、全層乾燥地盤と全層飽 和地盤で検討している。全層飽和状態の場合は、全層乾 燥状態よりも地盤変位は大きくなるものの、構造物変位 は小さくなる傾向であった。また、全層乾燥状態は構造 物と地盤の変位がほぼ等しい結果であった。このため, 本実験のように地盤下層のみが飽和状態の場合は、全層 飽和状態よりも地盤変位は小さくなるものの, 全層乾燥 状態よりも地盤変位が大きくなり、結果として、剛性を 有している不飽和層が構造物に荷重(土圧)を与えるた め,構造物変位も大きくなる可能性があると考えられる。 このことは、著者らの解析的検討4)でも確認されており、 今回の実験結果はこれを裏付けている。図-20 に飽和状 態の地盤下層が液状化した場合の構造物変形最大時の変 形図およびせん断ひずみ分布図4)を示す。本解析は、飽 和層が液状化した場合であるが、上層と下層との境界で 地盤のせん断ひずみが大きくなっており、乾燥状態の上 層とともに変形することよって,構造物にせん断変形が 生じる傾向となっていた。今回の実験結果は、飽和層の 剛性が液状化のように0とはならず、飽和層と不飽和層 の地盤の剛性差が小さかったため、構造物のせん断変形 の傾向は小さかったが,既往研究から明確に液状化した 場合は、構造物のせん断変形がより顕著になると考えら れる。ただし、既往研究および本実験は、密な地盤での 検討であり、相対密度の小さい砂地盤においては、全層 飽和状態が構造物にとって厳しくなることも考えられる。 今後,この実験のシミュレーション解析を通して,液状 化の程度や液状化領域の影響,構造物への影響,三次元 効果などを検討する予定である。



図-20 変形図およびせん断ひずみ分布図⁴⁾ (変形倍率:10倍,地盤下層のみ液状化条件)

4. まとめ

本実験的研究において,得られた主な成果をまとめる と以下の通りである。

・本実験における加速度応答は、地盤と構造物で異なり、
 地盤はサイクリックモビリティの影響により、スパイク状の加速度が計測されたが、RC 立坑にはそのよう

な加速度はみられなかった。

- ・密な地盤(Dr=90%)で液状化範囲が限定的であり、構造物が埋設された条件では、大加振入力(最大振幅2436gal)を行った場合でも、地盤の過剰間隙水圧が加振中に消散する傾向にあり、明確な液状化には至りにくいことが明らかになった。
- ・RC 立坑の変位は、鉄筋降伏前は地盤変位の方が大きい 傾向を示し、鉄筋降伏後は地盤変位とほぼ同じ変形量 となった。これは、鉄筋の降伏により、地盤と構造物 の剛性差が小さくなったことが原因と考えられる。
- ・RC 立坑の鉄筋ひずみは基部のみ降伏しており、その影響で、伸長方向に残留変位が発生した。一方で、地盤には水平方向の残留変位が生じたのに対して、構造物の水平方向の残留変位はほとんどみられなかった。
- ・地盤上層と下層の境界部において、軸方向ひずみの変 曲点が確認された。これは、飽和状態の下層が軟化し、 乾燥状態の上層とともに変形することによって、構造 物にせん断変形が生じることを示している。
- ・既往研究との比較検討から、飽和状態の地盤下層のみ が液状化する場合には、全層飽和状態の場合よりも地 盤変形は小さくなるものの、全層乾燥状態よりも構造 物変位が大きくなる可能性があることが示唆された。
- ・密な地盤が限定的に軟化・液状化する場合に対して、
 地盤・構造物連成系の三次元非線形地震応答解析手法の適用性を検証するための実験データを取得した。

謝辞 本実験に対して,「地中構造物の耐震性照査高度化 委員会」(土木学会)の関係各位には貴重なご助言をいた だきました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 土木学会原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要 土木構造物の耐震性能照査指針,2018.10
- 2) 宮川義範,大友敬三,末広俊夫,河井正,金谷賢生, 岡市明大:3次元地中 RC 構造物に作用する地震荷 重およびその応答に関する実験的検討,第2回構造 物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシ ンポジウム論文集,d-14, pp.237-242, 2001.3
- 3) 土木学会原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要 土木構造物の耐震性能照査指針技術資料Ⅲ,2005.6
- 4) 渡部龍正,島端嗣浩,横田彩加,横田克哉:密な地盤の液状化が RC 構造物の地震応答に及ぼす影響 (その1)RCボックスカルバートの遠心載荷実験シミュレーションに基づく検討,土木学会第75回年次 学術講演会講演概要集,CS11-13,2020
- 5) 米澤健次,鈴木正寛,穴吹拓也,樋口俊一,伊藤浩二,江尻譲嗣:杭基礎に隣接した RC 地中構造物の 地震時挙動に関する研究,土木学会論文集 A1(構造・ 地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第 31-b 巻), I_652-659, 2012