論文 三次元 RC 立坑を対象とした地盤・構造物連成系の地震応答評価

島端 嗣浩*1·渡部 龍正*2·松尾 豊史*3·松居 伸明*4

要旨:本研究では、せん断土槽に埋設された立坑型 RC 試験体の振動台実験に対するシミュレーション解析 および地震動の入力方向や三次元形状に対する影響評価を行った。この結果、地盤と構造物の材料非線形性 ならびに境界部のモデル化を適切に考慮することで、地盤と構造物の変位応答ならびにひび割れ状況や鉄筋 降伏などの損傷状況を弾性から塑性変形に至るまで概ね精度よく再現可能であることを確認した。また、正 方形断面を有する立坑の塑性変形が小さい範囲では、地震動の入力方向が全体応答に及ぼす影響は小さい結 果となったが、隅角部における局所的な損傷に及ぼす影響は大きいことなどが分かった。 キーワード:鉄筋コンクリート、材料非線形、せん断土槽振動台実験、三次元地震応答解析、耐震性能照査

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 により、弱軸方向である横断面に対して行われるのが一 般的である¹⁾。一方で、構造物が多軸応答を示す場合や 応答挙動を厳密に評価する場合などには、三次元 FEM 解析が有効となる場合もある。しかしながら、地中に埋 設されたRC 部材に面内力と面外力が同時に作用する条 件下で、三次元地震応答解析手法の適用性を検討した事 例は極めて少ない。そこで, 地盤・構造連成系の三次元 地震応答解析手法の適用性を確認することを目的として, まず、せん断土槽に埋設された立坑型 RC 模型の振動台 実験に対するシミュレーション解析を実施した。次に、 RC 模型の振動台実験では模型寸法も小さく、せん断土 槽による境界条件の影響も考えられることから, 実規模 での RC 立坑の地震時挙動,特に入力方向の影響につい て明らかにすることを目的として、振動台実験の RC 立 坑モデルを参考にして実物大の構造形状・寸法を想定し, 解析を実施した。

三次元 RC 立坑模型のせん断土槽振動実験シミュレ ーション

2.1 実験概要

(1) 実験方法

対象とした実験は、文献¹⁾に記載されたせん断土槽(幅 3.15m×長さ4.65m×高さ2.76m)を使用した RC 立坑の 振動台実験である。図-1 に試験概要図およびせん断土 槽の寸法を示す。模型地盤に用いた砂は、乾燥状態の栃 木産5号珪砂である。地盤の平均単位体積質量は1.53t/m³、 相対密度は87%と密に締め固められた条件であった。

(2) 試験体

試験体は、一辺 800mm,部材厚 60mm,高さ 3000mm の中空正方形断面の RC 立坑模型で、実構造物の 1/5~ 1/10 程度のスケールである。縦筋・横筋ともに 70mm 間 隔で D4 鉄筋を 2 層配筋している。表-1,表-2 に材料 試験結果を示す。配筋図を図-2 に示す。



^{*1} 東電設計(株) 土木本部耐震技術部 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主任研究員 修(工)

*3 (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)

*4 関西電力(株) 土木建築室 地震津波評価グループ 修(工)



(3) 加振条件

入力波は、3Hzの漸増正弦波を用いている。最初の10 波で最大加速度まで漸増し、5 波の最大加速度振幅領域 を経て、漸減する。加振は、最大加速度振幅を変化させ て6波入力している。表-3 に加振ケースと最大加速度 振幅を示す。図-3 に例として最も加速度振幅の大きい CASE6の入力波形を示す。





2.2 解析概要

(1) 解析手法

解析コードには COM3(Ver9.20)^{3),4)} を用いた。構成 則については、地盤は R-O モデルの骨格曲線と Masing 則による履歴特性、構造物は分散ひび割れ型の RC 構成 則により材料非線形性をそれぞれ考慮した^{5),6)}。積分手 法については Newmark β 法(β =1/4)を、非線形収束計 算には Newton-Raphson 法を用いた。なお、解析では履歴 減衰のみ考慮している。

解析メッシュを図ー4に示す。RC 試験体,地盤,せん 断土槽は全て8節点ソリッド要素(1次要素)でモデル 化した。RC 試験体-地盤間とせん断土槽-地盤間には, 剥離一滑りを考慮したジョイント要素を設けた⁶⁾。せん 断土槽-地盤間のジョイント要素は、圧縮方向のみを高 剛性として圧縮力のみを伝達するものとし、引張・せん 断方向は十分に低い剛性とした。また、せん断土槽各層 は節点間を共有させず、実挙動を再現できるよう滑りを 考慮したジョイント要素を設けた。節点数は 64,636、要 素数は 59,296 である。

境界条件は,解析モデル底面は固定境界とし,自重解 析時にはせん断土槽の節点を鉛直ローラーとし,動的解 析時にはその節点を水平ローラーとした。



図-4 解析メッシュ (シミュレーション解析)

(2) 解析条件

試験体の解析物性値は表-1 および表-2 に示す材料 試験結果に基づいて設定したが、コンクリートの引張強 度については乾燥収縮などの影響を考慮して50%低減す ることとした。

地盤の解析物性値は文献²)に基づいて設定し, せん断 剛性およびせん断強度については深度方向で初期拘束圧 に依存する物性値とした。

入力波は加速度振幅の小さい地震波(構造物,地盤と も概ね弾性領域)である CASE3 を入力したケースと加 速度振幅の最も大きい CASE6 を入力したケースとした。 また,加速度履歴の影響を考慮するため, CASE5,CASE6 を連続入力したケースも併せて行った。

2.3 解析結果

(1) 弾性域での応答

図-5には、CASE3加振時でのRC試験体とせん断土 槽における地表面変位計測位置での水平変位時刻歴を示 す。同図より,解析のせん断土槽およびRC試験体の変 位は,実験結果の変位を概ね再現できている。

(2) 地盤・構造物の全体応答

図-6 に図-4 に示す A-A'断面において, RC 試験体 の頂部における水平変位が最大となる時刻での変形図お よびせん断ひずみ (γ_{xz})分布図 (CASE5,6 連続加振した ケース)を示す。同図から,せん断土槽は各層で節点を 共有していないことによる不連続な挙動となっており, さらに、地盤との間では剥離・接触、滑りが生じている ことが確認できる。また、RC 試験体-地盤との境界にお いても剥離・接触、滑りが確認でき、引張力が作用しな い等のモデル作成時に想定した挙動となっていることを 確認した。

図-7に CASE6 単独加振したケースと CASE5,6 連続 加振したケースでの RC 試験体とせん断土槽における地 表面変位計測位置での水平変位時刻歴を示す。CASE5,6 連続加振ケースは、せん断土槽および RC 試験体ともに、 実験結果の変位を概ね再現できている。また、入力加速 度波形漸増時刻においても実験結果を概ね再現すること ができた。CASE6 単独加振ケースは、せん断土槽および RC 試験体ともに、最大変位は概ね再現しているが、加速 度履歴の影響による地盤の履歴特性や構造物の損傷を考 慮していないため、入力加速度波形漸増時刻においては、 実験の変位よりも小さな値となり、変位の位相も実験と 若干異なる結果となった。

図-8 にせん断土槽の地表面位置における水平変位が 最大となる時刻での変形モードを示す。CASE6 単独加振 ケースと CASE5,6 連続加振ケースの解析結果は最大変 形時においては,せん断土槽および RC 試験体ともに概 ね同じ変形となり,最大応答に対しては相対的に加速度 レベルの小さい段階の加速度履歴の影響は小さいことが 確認された。また,実験結果では,最大変形時において せん断土槽および RC 試験体の変形は,地表面に近いほ ど下層からの水平変位増分が大きくなり,構造物の全体 応答は地盤よりも小さくなる変形モードとなったが,解 析結果は最大応答時における地盤と構造物の変形状況を 概ね良好に再現可能であった。







(3) 構造物の損傷状況

図-9に実験と解析でのRC試験体の損傷状況を示す。 解析でのRC試験体のひび割れ状況(図-9(a))は、最 大主ひずみの最大値分布で確認することとし、鉄筋降伏 の状況(図-9(b))については、鉛直方向ひずみの最大 値分布で確認することとした。実験で生じたRC試験体 のひび割れは基部に集中しており、主に曲げ変形による ものと判断できる。解析でのひずみ発生領域は試験体基 部に集中しており、実験で確認された曲げ変形に伴うひ び割れ領域と概ね対応している。また、解析で得られた



鉛直ひずみ分布図も実験での鉄筋降伏状況を概ね再現で きている。

3. 地震動の入力方向および三次元形状の影響評価 3.1 検討条件

(1) 構造条件

2.の振動台実験における RC 試験体は,部材厚 6cm, 一辺 80cm の箱型構造物であった。この RC 試験体の構 造諸元が概ね実大構造物相当となるように,寸法調整し たモデルを作成した。寸法の調整として,内空および高 さは,RC 試験体の5倍,部材厚は10倍とした。内空は 3.4m×3.4m,構造物の高さは15m とし,部材厚は60cm と した。使用材料として,コンクリートの圧縮強度は fc=30N/mm²,鉄筋の降伏強度はfy=390N/mm²とした。配 筋条件は振動台実験の鉄筋比と等価となるように,図-10に示す配筋とした。なお,せん断補強筋は,振動台実 験での試験体と同様に配筋しない。



(2) 地盤条件

本検討での地盤条件は、振動台実験と同等の材質の砂 質土が広がっている条件とした。せん断剛性およびせん 断強度は、振動台実験での地盤のモデル化と同様にして、 深度方向の地盤物性値は初期拘束圧依存性を考慮した。

(3) 入力波

入力波は水平方向のみとし,地震動の入力方向の影響 を比較検討することを目的として,振動台実験でも使用 した最も加速度振幅の大きい CASE6 (図-3)とする。

3.2 解析条件

(1) モデル化手法

解析メッシュを図-11 に示す。節点数は 36,624, 要素

数は 33,518 である。メッシュ分割は、モデル下端から構 造物幅程度の高さの範囲については 0.5m 程度の要素厚 となるよう分割し、それより以浅は、層厚 1.0m 程度で分 割した。水平方向の分割は、構造物高さ 15m 程度の構造 物周辺領域に関しては、要素寸法比が 1:5 以内となるよ うに配慮した。解析領域については、振動台実験と同等 の領域とすると、側方境界の影響が構造物の応答に含ま れることとなる。したがって、本検討においては、構造 物高さおよび地盤層厚の 10 倍以上の領域を確保するよ うに考え、構造物中心から 100m の範囲まで(計 200m) をモデル化した。

側方の境界条件は,自重解析時は鉛直ローラーとし, 動的解析時は水平ローラーとした。下端はいずれの解析 においても固定とした。



(2) 解析ケース

地震動の入力方向が構造物に及ぼす影響について確認 するため,表-4に示す2ケースの検討を行った。

表-4 解析ケース (パラメータ解析)

| 解析 ケース | 地震動の 入力方向 | 備考 |
|-----------|--------------|--------------------------|
| V-1 | 0° | 振動台実験のモデルを 概ね実規模相当に修正 |
| V-2 | 45° | 地震動入力方向の影響確認 |

3.3 構造物の全体挙動

(1) 水平相対変位時刻歴

構造物上下端における水平相対変位時刻歴を図-12 に示す。相対変位は加振方向の変位で整理している。V-1, V-2 ともに同様な変形をしており,最大で 3.2cm 程度 で,層間変形角では 0.2%程度であった。



(2) 荷重-変位関係

本構造物のような箱型構造物においては、その形状を モデル化した場合、地震動の入力方向によって、各部材 の面内せん断抵抗力や鉛直方向鉄筋による抵抗特性など の影響が異なると考えられるため、地震動の水平入力方 向と同じ方向の構造物の荷重-変位(上下端間相対変位) 関係を確認した。荷重-変位関係を比較した結果を図-13に示す。2ケースとも基部の局所的な鉄筋降伏が確認 されたが、構造物全体は概ね弾性であったため、入力方 向の影響は小さい結果であった。



(3) 長方形断面での検討

正方形断面の検討では、地震動の入力方向の影響は小 さい結果であったため、弱軸・強軸が明確な長方形断面 で検討を行った。構造形状としては、部材厚は変更せず に内空を3.4m×5.1mとし、1:1.5の長方形断面とした。 入力波については、正方形断面での検討では概ね弾性領 域であったため、入力地震動の最大振幅を倍にして検討 を行った。

長方形断面で荷重-変位関係を比較した結果を図-14に示す。長方形断面で検討した結果,0°と45°加振 で地震時応答(全体挙動)の違いが確認され,かつ90° 加振(弱軸方向)では荷重は小さく,変形が大きくなっ た。これより,耐力および変形の評価に対して,地震動 の入力方向が任意に与えられた場合は弱軸方向で設計・ 解析を行うことは安全側の評価となるものと考えられる。



3.4 構造物の損傷状況

(1) 主ひずみ分布

構造物水平方向相対変位最大時の最大主ひずみ分布 図および最小主ひずみ分布図を図-15,図-16に示す。 最大主ひずみ分布図から V-1, V-2 ともに RC 立坑下端か ら 2m 程度の範囲で鉄筋降伏がみられる。V-1, V-2 の最 大主ひずみの分布領域は異なり,入力方向の影響が確認 できる。最大主ひずみの最大値は RC 立坑基部で V-1 が 5800µ 程度, V-2 が 6100µ 程度発生しており, V-2 の方が 大きい傾向であった。また,V-1 の最小主ひずみは小さ く,局所的な発生はみられない。一方,V-2 は V-1 より も大きい局所ひずみが生じている。よって,地震動の入 力方向が 0°と 45°では,圧縮領域および損傷領域が異な ると考えられる。



(2) 圧縮ひずみの比較

RC 立坑基部の隅角部の一要素における最小主ひずみの時刻歴を確認した。隅角部の一要素の最小主ひずみ時刻歴を比較した結果を図-17に示す。文献¹⁾に示されている曲げの限界値(圧縮縁ひずみ1%)には2ケースとも達していないが,局所的なひずみはV-2の方がV-1に比べて大きく,最大値でV-1は800µ程度,V-2は1600µ程度と2倍程度大きな値であった。



(3) プッシュオーバー解析による評価

構造物の損傷過程から終局状態までを把握するため, 地盤・構造物連成系の三次元モデルに深度方向に一様な 水平方向の漸増震度を与え,構造物の応答を確認した。

図-18 にプッシュオーバー解析による荷重-変位関 係の比較図を示す。動的解析の変位は 3cm,荷重は 10000kN 程度であり、プッシュオーバー解析による荷重 -変位関係では0°載荷,45°載荷ともにその領域では、 概ね弾性で同様の挙動をしている。鉄筋降伏後の剛性お よび変形性能は入力方向の違いによる影響が確認できる。 構造物の全体挙動としては0°載荷と45°載荷の最大荷 重(耐力)は概ね同じであるが、構造物全体の変形性能 は0°載荷に比べて45°載荷は1/2 程度であった。

局所損傷として,図中に圧縮ひずみが1%に達した点 をプロットしているが、0°載荷と45°載荷は入力方向 の違いによる影響で異なる傾向となった。0°載荷は、最 大荷重が圧縮ひずみ1%到達時とほぼ一致している。し かし、45°載荷は圧縮ひずみ1%に達しても荷重は増加 する傾向にある。これは隅角部に局所的なひずみが発生 し、一部分が破壊したとしてもその周りの要素に荷重分 配されるため、全体系として耐力低下には至らなかった と考えられる。よって、45°載荷の場合、局所ひずみに より構造物の耐震性能を評価すると、構造物の終局限界 に対して安全側の評価となるものの、より合理的な耐震 性能評価をする場合は局所損傷と全体挙動(荷重-変位 関係等)に着目した評価が必要と考える。



図-18 荷重-変位関係の比較(プッシュオーバー解析)

4. まとめ

本解析的検討の範囲で得られた主な成果をまとめる と以下の通りである。

(1) 実験のシミュレーション解析に基づく検討

- ・シミュレーション解析は、地盤と構造物およびせん断 土槽の境界で剥離・接触、滑りが生じる状況を概ね良 好に再現していた。また、最大応答に対しては、相対 的に加速度レベルの小さい段階の加速度履歴の影響 は小さいことを示した。
- ・地盤と構造物の材料非線形性ならびに境界部のモデル 化を適切に考慮することで、地盤と構造物の変位応答 ならびにひび割れ状況や鉄筋降伏などの損傷状況を 弾性から塑性変形に至るまで概ね精度よく再現可能 であることを確認した。
- (2) 地震動の入力方向が地震応答に及ぼす影響評価
- ・地震動の入力方向の影響検討を実施した結果,正方形
 断面を有する立坑の塑性変形が小さい範囲では,荷重
 一変位関係は入力方向の影響は小さい結果であった。
 しかし,入力方向が隅角部における局所的な損傷に及ぼす影響は大きいことが分かった。
- ・プッシュオーバー解析では、45°載荷時は0°載荷時 と比べて、最大耐力に達する以前の段階で圧縮ひずみ が1%になる結果であった。隅角部における局所ひず みを指標として構造物の変形性能を評価した場合に は安全側になることが示された。

謝辞 本研究の一部は,電力9社と日本原子力発電(株), 電源開発(株),日本原燃(株)による原子カリスク研究 センター共通研究の一環で実施したものである。

参考文献

- 1) 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) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析 と構成則,技報堂出版,1991
- Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003
- Osaki, Y.: Some notes on Masing's law and non-linear response of soil deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.XXXV, No4,pp.513-536, 1980
- Shawkey, A. and Maekawa, K. : Computational approach to path-dependent nonlinear RC/soil interaction, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.557/V-30, pp.197-207, 1996