

論文 RCボックスカルバートの大型せん断土槽振動実験 シミュレーション

松尾豊史*1・金津 努*1・大友敬三*2・松本恭明*3

要旨：本論文はRCボックスカルバート試験体を用いた大型せん断土槽振動実験を詳細なRC構成則を用いた地盤-構造物連成動的非線形有限要素法によって数値解析した結果を述べたものである。解析の結果、鉄筋降伏域までは、地盤は全応力履歴モデルにより表現可能であり、RC試験体隅角部の鉄筋の抜け出しを考慮することにより、変形挙動も良好に評価可能であることを確認した。塑性変形域については、底面支持条件が岩着の場合概ね良好に評価することが出来るが、底面支持条件が非岩着のモデルの場合には地盤と構造物の相互作用の影響を適切に考慮する必要があることが分かった。

キーワード：構造物-地盤連成, RCボックスカルバート, 有限要素解析, 塑性変形

1. はじめに

筆者らは鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の確立を目標として、実験と数値解析の両面から実証的な研究を進めている。コンクリート標準示方書・耐震設計編¹⁾では、鉄筋コンクリート構造物の耐震性能を従来の耐力評価に代って構造物の塑性変形について照査するように定めている。本論文では、科学技術庁防災科学技術研究所の大型せん断土槽(幅11.6m, 高さ6.0m, 奥行3.0m)を使用した振動台実験²⁾(以下、大型せん断土槽振動実験と呼ぶ)におけるRCボックスカルバート構造の変形挙動に関する数値シミュレーション結果について述べたものである。

大型せん断土槽振動実験は、**図-1**に示すようにRC試験体の埋設条件を変えることにより2ケース実施した。このうち、試験体を土槽底版に完全に固定したケースを岩着モデル、試験体を土槽中央に設置したケースを非岩着モデルと呼ぶ。この2ケースにより、土被り厚さが異なることによる周辺地盤から作用する地震荷重の相違や底面岩着状態の相違が、試験体の塑性変形に及ぼす影響について検討した。

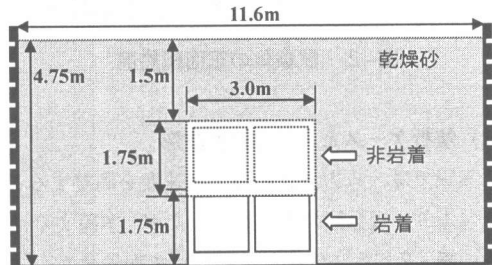


図-1 大型せん断土槽振動実験の概念図

2. 解析概要

2.1 実験における諸条件

(1) RC試験体の仕様

図-2に試験体の仕様と寸法を示す。岩着モデルと非岩着モデルは全く同一の試験体である。試験体の内空寸法は1.35m×1.35m, 幅3.0m, 高さ1.75m, 試験体の側壁, 隔壁, 頂版の部材厚は10cmである。試験体に用いた鉄筋は、降伏強度を250(N/mm²)に下げたD6鉄筋であり、降伏し易い条件を与えている。側壁, 隔壁の部材標準断面において、鉄筋比は0.59%であり、芯かぶり厚は1.5cmである。RC試験体の材料の諸物性は**表-1**に示す通りである。

*1 (財)電力中央研究所我孫子研究所 構造部 工修 (正会員)

*2 (財)電力中央研究所我孫子研究所 地盤耐震部 工博 (非会員)

*3 関西電力(株) 土木建築室 工修 (非会員)

表-1 材料物性

コンクリート圧縮強度 f'_c	32.4 (N/mm ²)
コンクリート引張強度 f_t	2.30 (N/mm ²)
コンクリートヤング係数 E_c	2.26x10 ⁴ (N/mm ²)
鉄筋降伏強度 f_y	257.6 (N/mm ²)
鉄筋ヤング係数 E_s	1.78x10 ⁵ (N/mm ²)

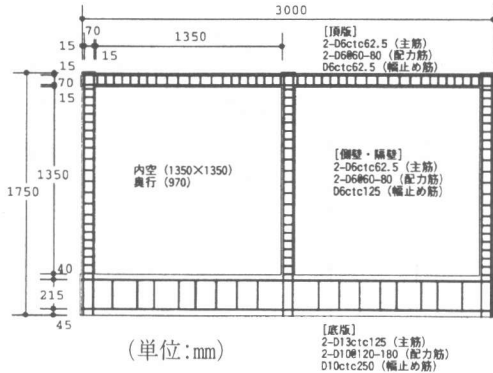


図-2 試験体の正面配筋図

(2) 解析ケースと入力加速度波形

実験では、入力波形の最大加速度を調整することにより、複数回の加振を行ったが、本論文では、特に表-2に示す3ケースについて報告する。

振動台加振に用いた入力加速度波形は、1995年兵庫県南部地震における神戸大学観測波のNS成分に基づいたものであり、観測波の時間縮尺を1/2とした。岩着1127Galのケースの入力波形を図-3に示す。

表-2 解析ケース

加振レベル	岩着	非岩着
鉄筋降伏域	(記載せず)	223Gal
塑性変形域	1127Gal	1041Gal

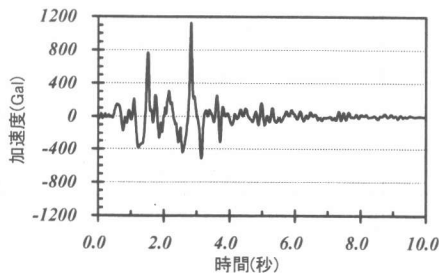


図-3 振動台入力加速度波形(岩着1127Gal)

(3) 地盤物性

実験では、地盤材料として乾燥状態の栃木産珪砂5号(真比重2.688, 最小間隙比0.683, 最大間隙比1.091)を用いた。珪砂5号の動的変形特性試験結果に基づいて、初期せん断剛性の拘束圧依存性を評価した。解析では、地盤材料の非線形性をRamberg-Osgoodモデル(以下ではR-Oモデル)により考慮した。図-3にR-Oモデルを示す。本解析では、地盤ひずみ5%までは、R-Oモデルによりフィッティングし、地盤ひずみ5%以降は、5%ひずみの剛性を維持することとした。これは、解析上で局所的に大きなひずみが出て解が発散する現象を防止することを意図したものである。

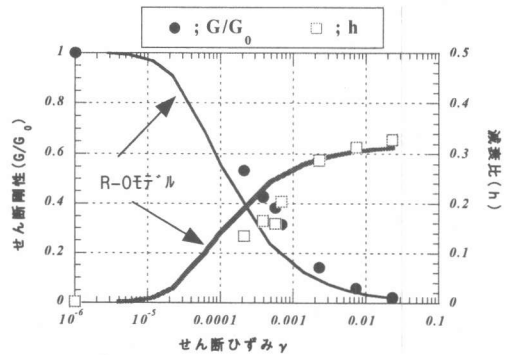


図-4 珪砂5号の動的変形特性とR-Oモデル

2.2 解析モデル

解析は、鉄筋コンクリート要素として材料非線形性を組み込んだ分散びわれモデルを用いた³⁾。解析コードは、東京大学の前川らにより開発された非線形FEMプログラム「WCOMD-SJ」(ver7.2)を使用した。解析モデルを図-5に示す。解析モデルの底面境界は水平・鉛直ともに固定とし、側方境界は水平ローラー、鉛直固定とした。地盤と構造物の間の接触面における滑りや剥離などの挙動に関するモデル化は行っていない。なお、せん断土槽外部にせん断土槽の大きさ分の地盤要素を左右に付加させている。

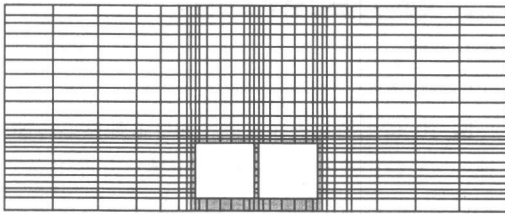


図-5 要素分割図(岩着モデル)

3. 解析結果

3.1 全体系での応答の比較

(1) 鉄筋降伏域

図-6 に非岩着 223Gal ケースの構造物頂底板間相対変位と構造物高さに相当する土槽枠変位の時刻歴波形を示す。この結果、構造物が鉄筋降伏レベル、およびこの解析で生じている地盤ひずみ約 1%以下の領域では、地盤応答、構造物応答とも良好に評価可能であることが分かった。

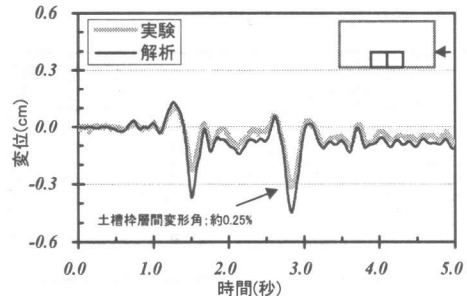
実験後の試験体の観察から、試験体隅角部の曲げひびわれ部分の回転が変形に寄与していることが明らかとなったため、解析上、この位置に設定要素を用いて鉄筋の抜け出しを考慮した解析を行った。その結果を図-7 に示すが、解析精度が向上していることが分かる。

(2) 塑性変形域

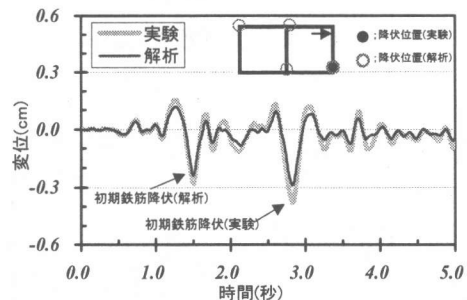
図-8 に岩着 1127Gal, 図-9 に非岩着 1041Gal の構造物高さに相当する土槽枠変位と構造物頂底板間相対変位の時刻歴波形を示した。この結果、岩着モデルについては、塑性変形レベル鉄筋降伏変位 δy の 10 倍程度、地盤ひずみ 5%程度の領域では、地盤応答、構造物応答ともに概ね良好に評価出来ていると考えられる。また、別途実施した解析から、地盤物性や地盤モデルの違いが敏感に地盤の応答変位や残留変位に影響することが明らかになっており、この領域における地盤物性の設定法及び地盤モデルの選択方法については、さらに検討する必要がある。

非岩着の場合は、地盤応答、構造物応答ともにやや過小に評価している。地盤と構造物の接触面における剥離や滑りの影響と考えられ、これらの

現象を明らかにして、適切にモデル化する必要があると考えられる。地盤と構造物の剥離と滑り影響については、別途検討している⁴⁾。実験では、せん断土槽内の構造物と地盤との境界に CCD カメラを設置し、その挙動を観察したが、剥離は生じておらず、滑りは構造物と地盤の境界ではなく、部材の数 cm 上面で生じているようであった。



(a) 土槽枠変位



(b) 構造物層間変位

図-6 変位波形比較(非岩着 223Gal)

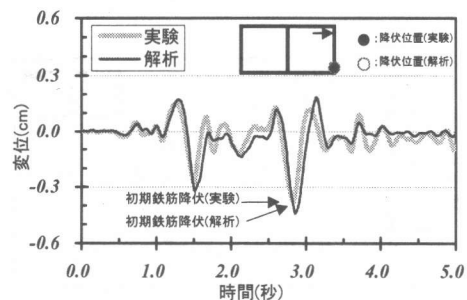
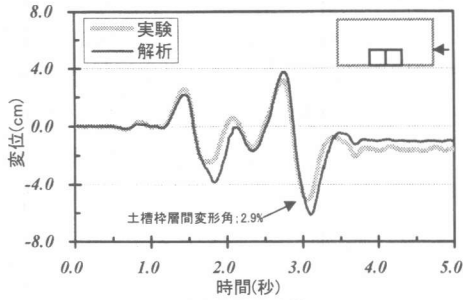
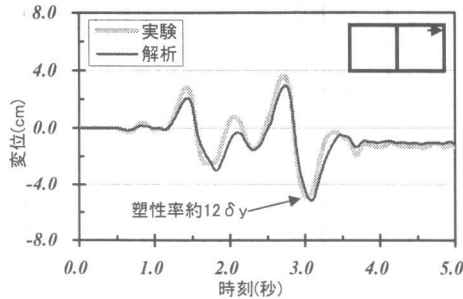


図-7 変位波形比較(非岩着223Gal;接合要素有)

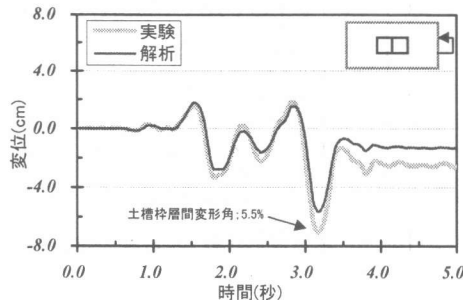


(a) 土槽層間変位

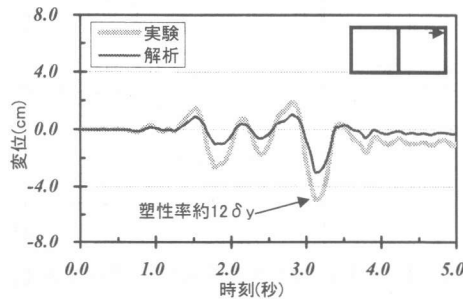


(b) 構造物層間変位

図-8 変位波形比較(岩着 1127Gal)



(a) 土槽層間変位



(b) 構造物層間変位

図-9 変位波形比較(非岩着 1041Gal)

3.2 細部の挙動に関する検討

(1) 地盤

① 応答加速度

図-10 に土槽地表面位置における地盤応答加速度波形の比較の一例を示す。土槽地表面に近い領域、および、フリーフィールドと考えられる領域では、実験と解析は概ね良好な一致を示している。しかし、構造物周辺に関しては、解析の収束性が悪く、加速度波形に高周波成分が混入する場合があります、実験結果を良好に表現出来なかった。

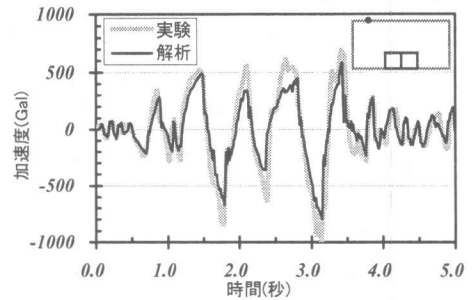


図-10 加速度波形比較(岩着1127Gal)

② 地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係

図-11 に岩着 1127Gal の(1)構造物側壁中央高さにおける地盤部と(2)構造物高さ位置における構造物周辺のせん断応力-せん断ひずみ関係の解析結果を示す。フリーフィールドに近い地盤でのせん断ひずみは4%程度であるのに対して、構造物周辺、特に構造物の剛な隅角部と地盤との周辺では、6%程度の地盤ひずみが発生しており、局所的にはさらに大きなひずみが発生している。

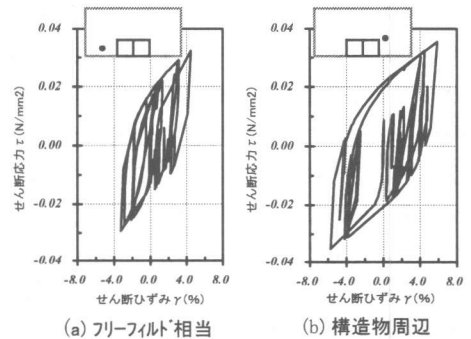


図-11 地盤の τ - γ 曲線(岩着 1127Gal)

③水平変位分布および加速度分布

岩着 1127Gal ケースの土槽枠最大水平方向変位分布、およびフリーフィールド位置における地盤の最大水平加速度分布を図-12に示す。構造物埋設位置高さまでの最大変位は、実験値と解析結果は比較的一致しているが、地表付近では余り一致していない。これは、実験ではせん断土槽の加振に伴う挙動の影響で大きく変位したものと考えられる。最大加速度については、構造物埋設位置高さ付近では構造物の影響を受けて高周波成分が発生していたので、10(Hz)の高周波フィルターを用いて除去したが、実験と解析は比較的一致していると考えられる。

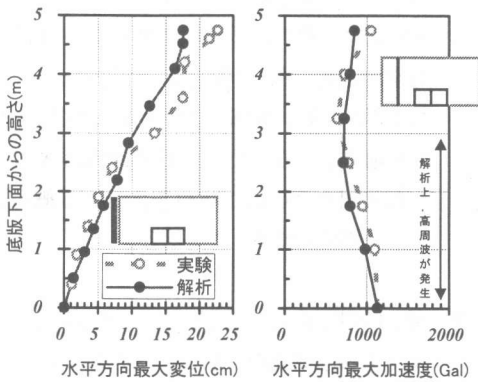


図-12 最大値分布図(岩着1127Gal)

(2) 構造物

①鉄筋降伏箇所とその順番

図-13に岩着 1127Gal ケースの鉄筋降伏部位と降伏する順番についての比較を示す。降伏する順番に若干の違いは見られるが、降伏する部位は実験結果と解析結果で対応が取れていると考えられる。

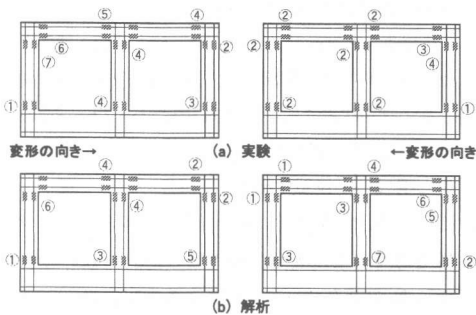


図-14 鉄筋降伏部位と順番(岩着 1127Gal)

②ひびわれ状況

図-14に岩着 1127Gal 加振ケースのひびわれ状況の実験結果と解析結果の比較を示す。実験では貫通ひびわれは試験体隅角部に集中しており、動土圧の影響で側壁内側に多くのひびわれが発生するものの、側壁外側のひびわれが試験体隅角部に限られている点など解析は実験を概ね良好に表現している。

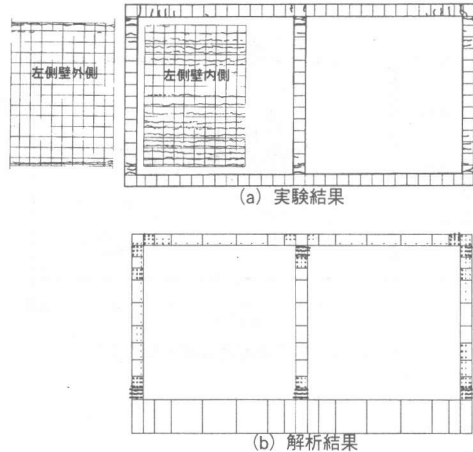


図-14 ひびわれ状況比較(岩着 1127Gal)

③鉄筋ひずみ

図-15に非岩着 1041Gal ケースにおける鉄筋ひずみ時刻歴応答の比較を示す。解析値は、鉄筋ゲージ貼付位置に最も近い要素ひずみの値である。これによると、局所的な現象であるので、鉄筋ひずみを正確にシミュレートすることは難しいが、大略的には傾向を捉えていると考えられる。

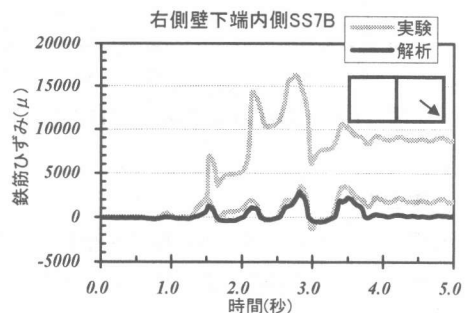


図-15 鉄筋ひずみ比較(非岩着1041Gal)

(3) 構造物と地盤の相互作用

①直土圧

図-16 に構造物に作用する直土圧の一例として、構造物右側壁中央の増分直土圧時刻歴応答結果を示す。側壁に作用する直土圧に関しては、必ずしも精度良く評価出来なかった。これは、剛性の異なる境界面において、加振直角方向の応力成分については、数値解析上の収束誤差が影響し易いためであると考えられる。

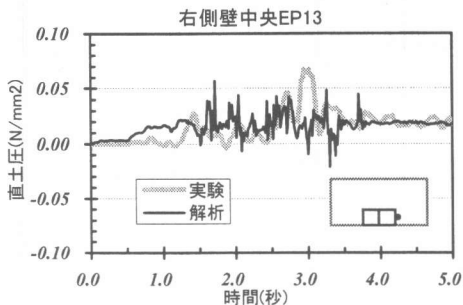


図-16 直土圧比較(岩着1127Gal)

②せん断土圧

図-17 に構造物に作用するせん断応力の一例として、構造物頂版中央のせん断応力時刻歴応答結果を示す。せん断応力については、実験データの信頼性に関する議論も別途必要であるが、概ね良好に評価出来ていると考えられる。

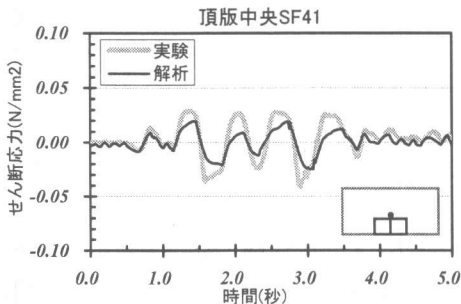


図-17 せん断応力比較(岩着1127Gal)

4. まとめ

RCボックスカルバート試験体を用いた大型せん断土槽振動実験を地盤-構造物連成動的非線形有限要素法によって解析し、地中RC構造物の変形挙動について評価した。これにより、以下

のことが明らかになった。

- (1) 鉄筋降伏域では、地盤は全応力履歴モデルにより適切に表現可能であり、構造物の隅角部における応答も鉄筋の抜け出しを考慮するならば、構造物の変形挙動を適切に計算可能である。
- (2) 底面支持条件が岩着のモデルについては、地盤と構造物の接触面における滑りや剥離を考慮しなくても、塑性変形域に関しても概ね良好にシミュレート可能である。
- (3) 非岩着のモデルに関しては、塑性変形域における挙動をモデル化するためには、地盤と構造物の相互作用の影響を適切にモデル化する必要があると考えられる。
- (4) 実験結果と解析結果との比較を行った結果、地盤加速度、および構造物に作用するせん断力などは良好に評価可能であり、詳細なRC構成則を用いることで、鉄筋降伏箇所やひびわれ状況などの構造物の損傷状態も概ね良好に評価可能であることが分かった。

謝 辞:本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施しました。本研究の関係各位に謝意を表す次第である。

研究の実施にあたり、東京大学前川宏一教授には解析プログラムを使用させて頂くと共に貴重なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方書・耐震設計編, 1996.7.
- 2) 末広俊夫, 大友敬三, 金津 努, 松本恭明:地盤とボックスカルバート連成系の大型振動台実験, コンクリート工学年次論文報告集(投稿中), vol.22, 2000.
- 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.
- 4) 松井 淳, 大友敬三, 河井 正, 松本恭明:地盤-構造物連成系の大型振動実験の動的非線形有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集(投稿中), vol.22, 2000.