

論文 地盤とボックスカルバート連成系の大型振動台実験

末広 俊夫*1・大友 敬三*1・金津 努*1・松本 恭明*2

要旨：強震時の RC 地中構造物の変形性能に関する実証データを得るために、鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物をせん断土槽内に埋設した大型振動台による加振実験を行った。地盤・構造物連成系における動的載荷の場合、構造物の変形は地盤のせん断変形に支配されており、側壁と頂版および底版との隅角部に損傷が集中することを示した。この結果は、地盤・構造物連成の動的載荷においても、従来の気中静的載荷実験や地盤・構造物連成系の静的載荷実験と同様な損傷パターンとなることを裏付けている。

キーワード：振動台実験, 地中 RC 構造物, 塑性変形

1. はじめに

強震時における RC 地中構造物の変形性能を精度よく評価し、解析技術を向上させるために鉄筋コンクリート構造の試験体を用いた気中静的載荷実験¹⁾や地盤・構造物連成系の静的載荷実験²⁾などの研究がなされてきたが、地盤・構造物連成系の動的載荷実験を行った研究はない。

本研究では、既往の研究で得られた知見に加えて、地盤・構造物連成系の動的載荷実験を行うことで、RC 地中構造物の塑性域での変形特性を解明することを目的とした。

2. 実験の概要

本実験は、**図-1**に示すせん断土槽を用いた地盤・構造物連成系の動的載荷実験である。上載土厚さの影響を比較するために、RC 試験体をせん断土槽底面に固定したケース（以後、岩着モデルと呼ぶ）と、上載土厚さを 1/2 にして地盤中に埋設したケース（以後、非岩着モデルと呼ぶ）の 2 種類の実験を行った。以下に RC 試験体と加振方法について述べる。

2. 1 RC 試験体

事前の検討³⁾から、RC 試験体は隅角部において鉄筋降伏を超える塑性変形が生ずる断面とした。RC 試験体の配筋図を**図-2**に示す。側壁、隔壁、頂版の引張鉄筋比は 0.51%、せん断補強鉄筋比は隅角部で 0.75%である。事前の解析では、せん断補強鉄筋は不要とされたが、曲げによる鉄筋降伏を確実に先行させるためにせん断補強鉄筋をコンクリート標準示方書耐震設計編の構造細目に準拠して配筋した。岩着モデル、非岩着モデル共に同じ配筋である。RC 試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を**表-1**および**表-2**に示す。

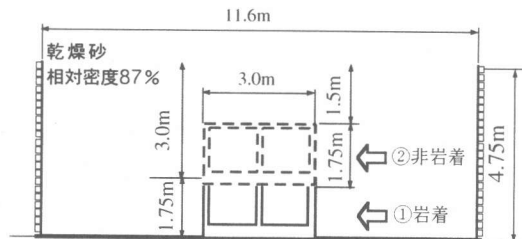


図-1 実験の概要

*1 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 工修 (正会員)

*2 関西電力(株) 土木建築室 工修

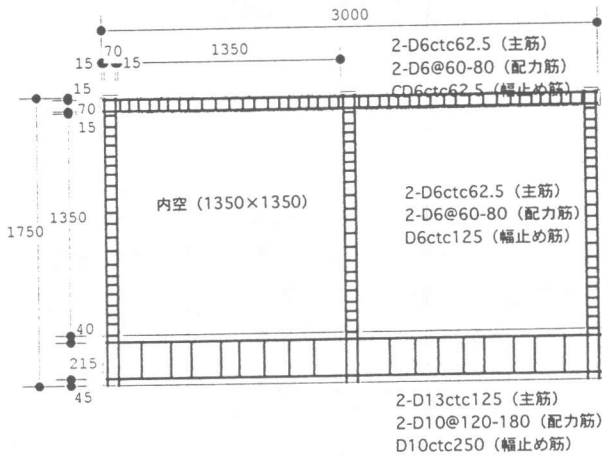


図-2 RC試験体の配筋

表-1 コンクリートの材料試験結果

	ヤング率 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
岩着モデル試験体	23.3	32.1	2.34	4.75
非岩着モデル試験体	26.2	32.6	2.65	5.13

表-2 鉄筋の材料試験結果

	ヤング率 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	降伏ひずみ (micro)
D 6 鉄筋	184	258	1450

RC試験体に関する計測項目は、
 ①側壁および隔壁の底版に対する
 相対変位、②水平および鉛直加速
 度、③地盤との接触面において作
 用する直土圧およびせん断応力、
 ④鉄筋およびコンクリート表面の
 ひずみ、⑤頂版表面と地盤の接触
 面において生ずる可能性のある不
 連続な相対変位、である。さらに、
 地盤に関する計測項目である加速
 度、せん断土槽枠変位などを加え
 ると、岩着モデルで全 238 点、非
 岩着モデルで全 249 点である。本
 論文では、RC 試験体に関する項
 目のうち、特に前述の①底版に対
 する側壁および隔壁の相対変位に
 考察を加えた。主な計測器の配置
 を図-3 に示す。

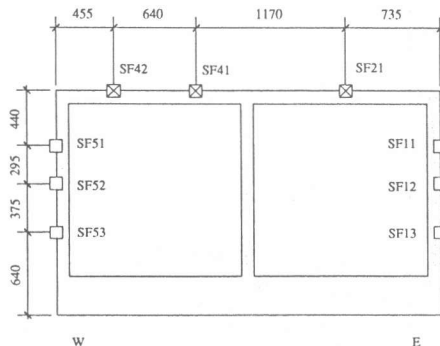


図-3 RC試験体に関する主な計測器配置
 (b) 地盤との接触面に作用するせん断応力

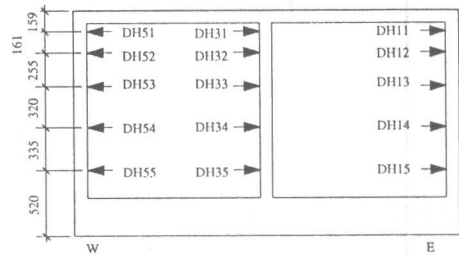


図-3 RC試験体に関する主な計測器配置
 (a) 側壁・隔壁の相対変位

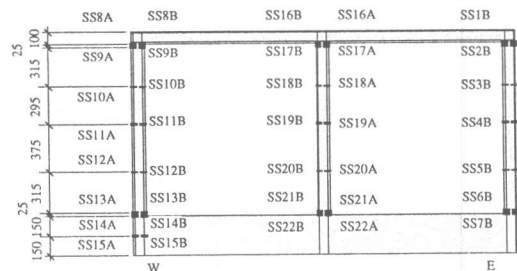


図-3 RC試験体に関する主な計測器配置
 (c) 鉄筋のひずみ

2. 2 加振方法

入力波形は、1995年兵庫県南部地震における神戸大学観測波 NS 成分の時間軸を 1/2 にし、加速度振幅を調整して用いた。埋設する RC 試験体の塑性変形のしやすさに着目し、振動台の加振能力と地盤振動特性を勘案して設定した。図-4 に、最大加速度振幅 1127Gal の例を示す。

加振ケースを表-3 に示す。弾性挙動を把握するために約 100Gal の加振を行い、約 1000Gal の加振により塑性変形させるように計画した。本論文では、岩着モデルは 1127Gal、非岩着モデルは 1041Gal の加振ケースの結果を中心として考察した。

3. 実験結果および考察

3. 1 地盤と RC 試験体の最大変位

地盤の最大変位と RC 試験体側壁および隔壁の最大変位の高さ方向の分布を図-5 および図-6 に示す。地盤変位はせん断土槽枠の鋼材に設置した変位計による。ただし、図-6 の非岩着モデルでは、RC 試験体の変位は底版に対する

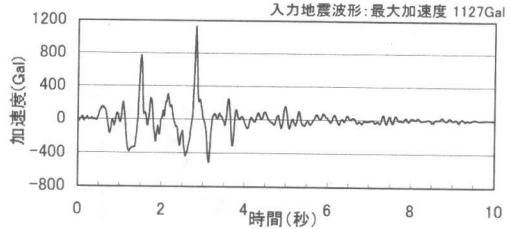


図-4 入力地震波形

表-3 加振ケース

加振順序	岩着モデル	非岩着モデル
1	60 Gal	105 Gal
2	109 Gal	223 Gal
3	225 Gal	1041 Gal
4	1127 Gal	1044 Gal
5	477 Gal	596 Gal
6	531 Gal	1033 Gal
7	1126 Gal	-

る相対変位であるから、振動台に対する相対変位として表記するために底版上面の変位が同じ高さの地盤変位と同一と仮定して図示している。

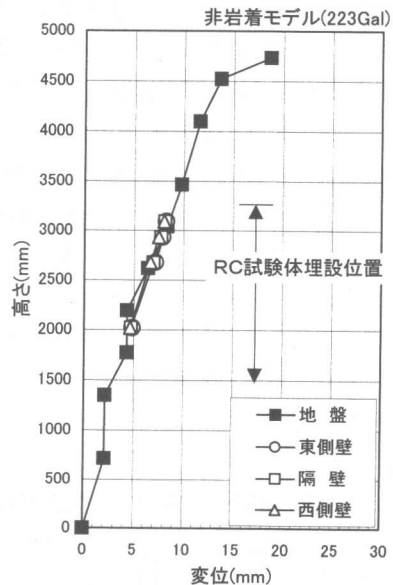
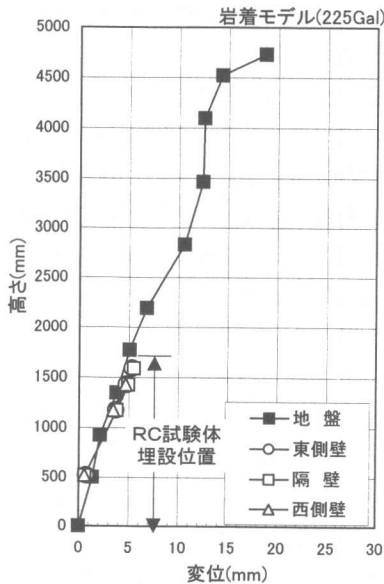


図-5 (a) 最大変位分布(岩着モデル: 225Gal)

図-5 (b) 最大変位分布(非岩着モデル: 223Gal)

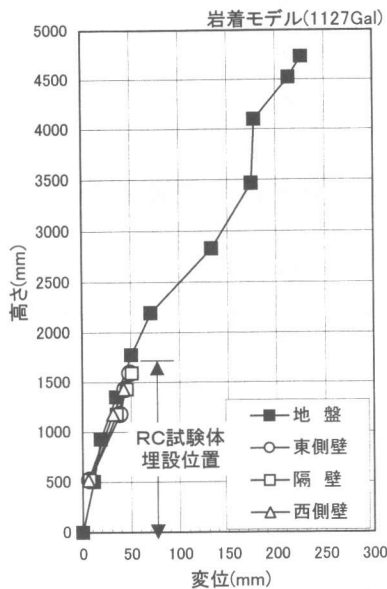


図-6 (a) 最大変位分布(岩着モデル：1127Gal)

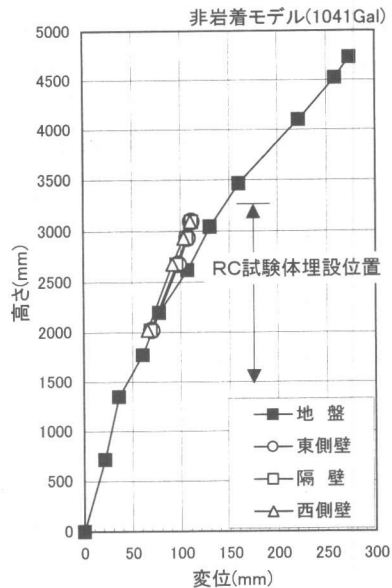


図-6 (b) 最大変位分布(非岩着モデル：1041Gal)

岩着モデルでは、RC 試験体と地盤の変位が非常によく一致しており、動的载荷の条件でも地中埋設構造物は地盤のせん断変形に支配的に影響されることが確認できた。一方、非岩着モデルでは、加振レベルの低い 223Gal のケースにおいては岩着モデルと同様に RC 試験体と地盤の変位がよく一致しているものの、降伏レベルを大きく超える 1041Gal のケースにおいては RC 試験体の方が変位は小さい。非岩着モデルでは上載土厚さが薄く、頂版と地盤のせん断抵抗が小さいことによる不連続な相対変位が計測されており、地盤の変形に追従できなかったものと考えられる。

3. 2 RC 試験体に作用する荷重と変位

RC 試験体頂版上面に作用する水平荷重と RC 試験体頂版間相対変位の関係と、時刻歴波形を図-7 に示す。水平荷重は、図-3 (b) に示す

せん断応力計の計測値に頂版の面積を乗じて計算した。地盤に埋設された構造物に作用する荷重として、上載土の慣性力に起因した頂版上面に作用する水平力、構造物の慣性力、側壁に作用する動土圧合力、底版下面の反力、などが考えられ、これらの作用の結果、RC 試験体の頂版間に相対変位が生じる。これらの荷重のうち、頂版間相対変位に対して最も寄与度が高いと見なせる、頂版上面に作用する水平力（岩着モデルの場合、全水平荷重の 45%、非岩着モデルの場合、全水平荷重の 53%；ただし、降伏時の比率）を作用荷重として扱う⁴⁾。

岩着モデル、非岩着モデルともに、低い荷重レベルでは剛性が大きく、荷重と変位の位相のずれがないが、変位が大きくなると非線形性が強く現れてくる。また、上載土厚さのちがいに頂版と地盤のせん断抵抗が異なるので、荷重の上限値が異なると考えられる。

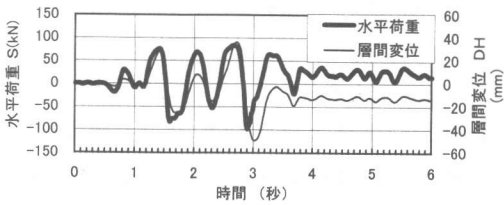
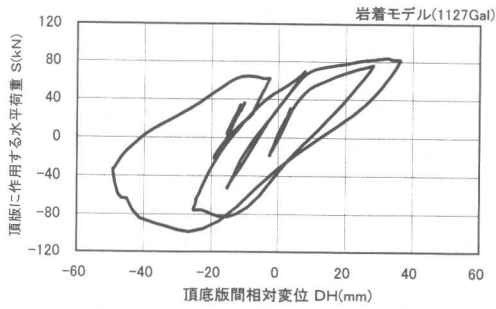


図-7(a) 水平荷重と相対変位の関係およびその時刻歴波形 (岩着モデル)

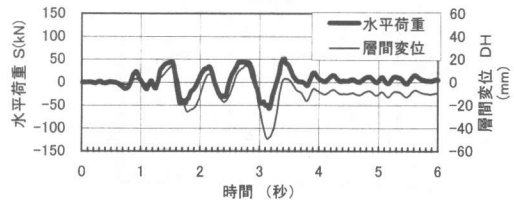
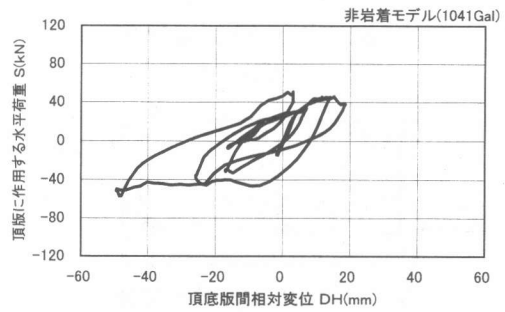


図-7(b) 水平荷重と相対変位の関係およびその時刻歴波形 (非岩着モデル)

3. 3 鉄筋降伏の進展状況

岩着モデル, 非岩着モデルともに, 加振開始後約2秒間にほとんどの隅角部の鉄筋が降伏した。鉄筋が降伏した時刻に着目し, 図-7の荷重と変位の関係図の最初の約2秒間を拡大して, 鉄筋が降伏する時刻を黒塗りで表示したものが図-8である。図-8の数字は鉄筋が降伏する順番を示しており, 図-9にその場所を示した。初めて鉄筋が降伏する変位は, 正符号で示した東(右)方向に変形した場合であり, 岩着モデルでは4.0mm, 非岩着モデルでは3.6mmである。どちらも西(左)側壁の下部隅角部であり, その後次々にその他の隅角部の鉄筋が降伏し, 西(左)側壁の上部隅角部が最も遅く降伏する。また, 負符号で示した西(左)方向に変形した場合は, 岩着モデル, 非岩着モデルどちらも東(右)側壁下部隅角部が最初に降伏し, 東(右)側壁上部隅角部が最も遅く降伏する。

以上の結果より, 地盤連成の動的載荷であっても構造物が周辺地盤の変形に支配されるため, 隅角部に損傷が集中することがわかった。この

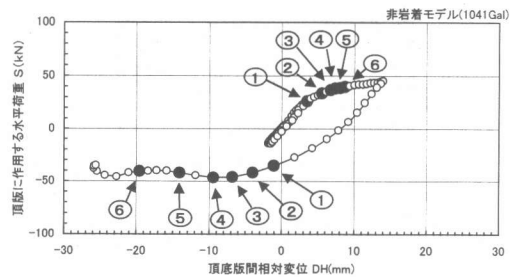
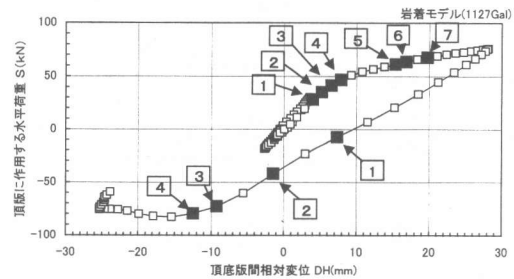


図-8 水平荷重と相対変位の関係 (最初の約2秒間を拡大)

損傷パターンは, 従来行われているラーメン構造に水平荷重を作用させた場合のそれと対応している。

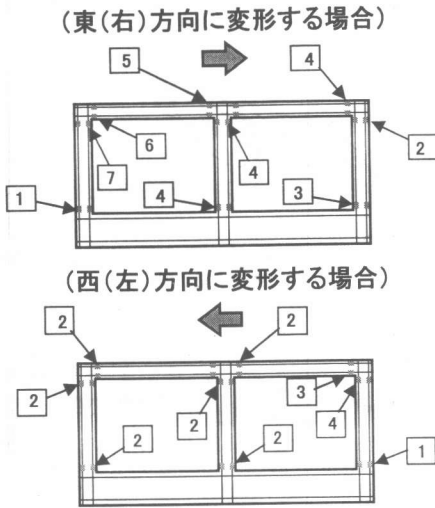


図-9(a) 鉄筋降伏の進展状況(岩着モデル)

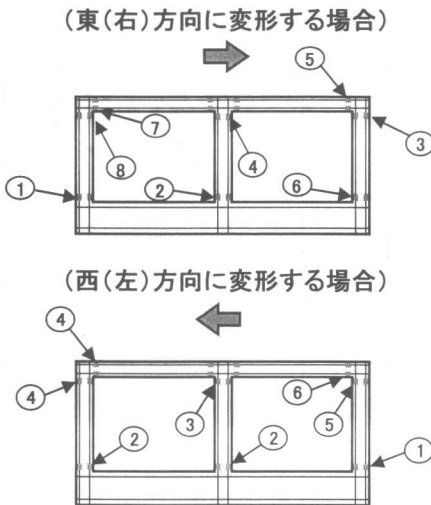


図-9(b) 鉄筋降伏の進展状況(非岩着モデル)

4. まとめ

地盤・RC 構造物連成系の動的載荷実験により、RC 試験体の水平荷重に対する変形に関する実証データを取得して、以下のような知見を得た。

- ① RC 試験体の変形は、弾性範囲から塑性領

域に至るまで、基本的に、周辺地盤のせん断変形に支配される。

- ② 作用荷重と変位の関係において、鉄筋降伏した後の挙動は強い非線形性が現れる。
- ③ 鉄筋降伏する箇所は、側壁および隔壁と頂版あるいは底版との隅角部であり、その進展状況は岩着モデル、非岩着モデルではほぼ同じ傾向を示す。
- ④ 地盤連成の動的載荷であっても RC 試験体の隅角部に損傷が集中し、この損傷パターンは、従来行われているラーメン構造に対する気中水平載荷結果と対応している。

このような知見を踏まえて、今後は実験データを解析手法の検証のために活用する予定である。

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た。本研究の関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 本田国保, 足立正信, 石川博之, 長谷川俊昭: 水平載荷によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1261-1266, 1999.7
- 2) 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設計に関する安全性照査マニュアル, 第2編 pp.182-244, 1992.9
- 3) 大友敬三, 松井淳, 松本恭明, 岡市明大: RC 地中構造物の損傷過程に関する実験的研究(その4) 大型振動台実験における RC 試験体の挙動予測, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.633-636, 1999.7
- 4) 渡辺啓行: 地中ダクトの地震時動土圧の理論, 土木学会論文集, No.432, I-16, pp.185-194, 1991.7