

論文 面内荷重を負担する壁を有する地中 RC ボックス構造の振動台実験

末広 俊夫*¹・大友 敬三*²・金津 努*¹・金谷 賢生*³

要旨：せん断壁を有するRCボックス構造試験体を用いて地盤連成を考慮した振動台実験を行い、先に報告したせん断壁のない RC ボックス構造の挙動との違いについて検討した。その結果、1)試験体全体の挙動はせん断壁の挙動に支配されること、2)側壁に作用する土圧分布が左右で異なり、せん断壁のない構造の土圧分布と全く異なること、3)せん断壁の位置から離れるほど層間変位と鉄筋ひずみは増加傾向を示すが、せん断壁のない試験体より層間変位がかなり小さいこと 等が明らかとなった。

キーワード：地中 RC 構造物, 3次元, せん断壁, 振動台実験

1. はじめに

著者らは三次元的な広がりを持つ地中埋設 RC 構造物の合理的な照査法を確立することを目的として、地盤との連成を考慮した大型振動台実験および非線形数値解析によって、塑性変形域における挙動評価に関する研究を進めている。これまでに、ボックスカルバート構造のような二次元平面ひずみ状態を仮定することが妥当であると考えられる場合において、地盤-構造物連成非線形二次元解析により、RC構造物の地震時挙動を精度よく解析できることを示した。^{1), 2), 3)}

一方、実務設計においては、三次元構造物を二次元モデルに単純化して扱うことが多いが、これは、三次元RC構造物が塑性変形するような大変形領域の挙動について、実務に供することができる地盤-構造物の連成解析手法が確立されていないことによる。また、必ずしも二次元を仮定することが合理的と考えられない場合がある。

そこで、本研究では、埋設された三次元 RC 構造物の地震時における大変形挙動を把握し、二次元モデルで設計することの妥当性を検証することを目的として、せん断壁の有無以外は全く同じ断面構造を有する小型RCボックス構造試験体を用

いて振動台実験を実施し、せん断壁がボックス構造の大変形域における挙動に及ぼす影響を検討した。なお、せん断壁のない試験体(二次元モデルと呼ぶ)の振動台加振実験については、既報⁴⁾を参照されたい。

2. 実験の概要

実験は、図-1に示すせん断土槽を用いた地盤・構造物連成系の振動台加振実験である。試験体底部を振動台に固定した。地盤の深さは 2.72m であり、試験体の土被りは 1.0m である。地盤材料は栃木県産の 5 号珪砂であり、乾燥状態で用いた。相対密度が 87%となるように作成し、乾燥密度は 1.53ton/m³であった。

2.1 RC試験体

試験体は、図-1に示すように、二次元ボックス構造物の加振方向にせん断壁を設けた三次元RC構造物である。奥行き方向の両端は、開口状態とした。なお、開口部は砂が入らないように合板とウレタンマットで閉じてある。試験体の配筋図を図-2に示す。側壁、頂版および底版の引張鉄筋比はそれぞれ 0.51%, 0.60%, 0.67%であり、側壁、頂版は

*1 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 工修(正会員)

*2 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 工博

*3 関西電力(株) 土木建築室 工修

D6鉄筋、底版はD10鉄筋を用いている。せん断壁は厚さ4cmであり、縦方向鉄筋、横方向鉄筋ともにD4鉄筋を6.25cmピッチでシングル配筋とした。鉄筋比はそれぞれ0.50%である。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。

試験体に関する計測項目は、①側壁およびせん断壁の底版に対する相対変位、②側壁に作用する土圧およびせん断応力、③鉄筋ひずみ、④水平および鉛直加速度、である。さらに、地盤に関する計測項目である加速度、せん断土槽変位などを加え全229点である。以後、せん断土槽変位を地盤変位として取り扱うこととする。主な計測器の配置を図-2および図-3に示す。

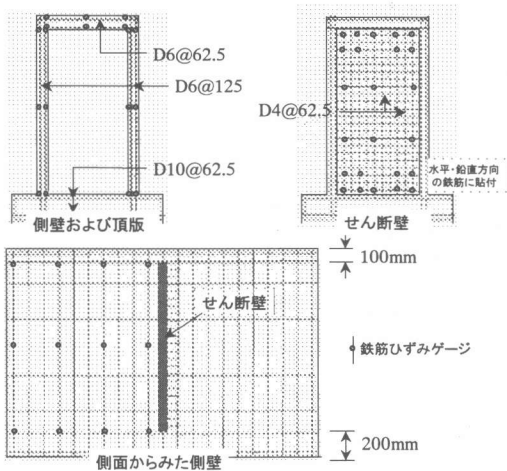


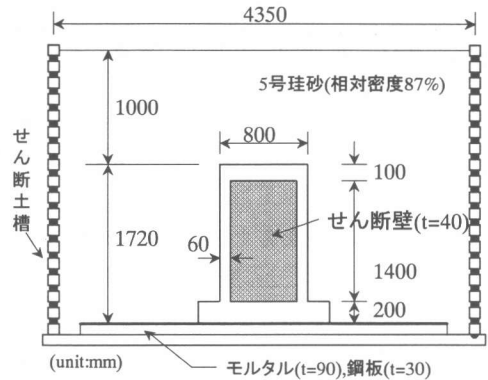
図-2 RC試験体の配筋およびひずみゲージの位置図

表-1 コンクリートの材料試験結果

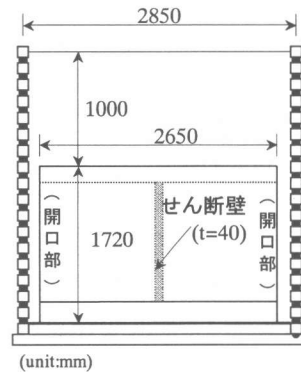
ヤング率 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
29.1	32.7	3.07

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 ($\times 10^{-6}$)
D6 鉄筋	217	401	1846
D4 鉄筋	198	414	2100



(a) 正面図



(b) 側面図

図-1 実験概要およびRC試験体構造図

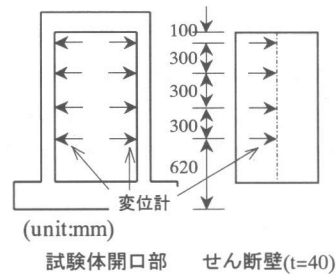


図-3 (a) 主な計測器の配置図 (変位)

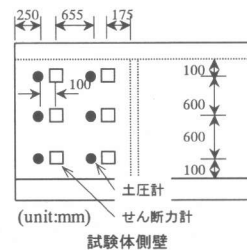


図-3 (b) 主な計測器の配置図 (側壁の土圧・せん断力)

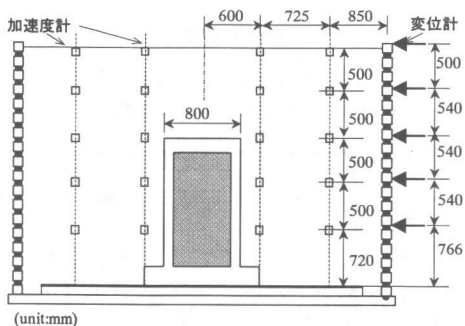


図-3(c) 主な計測器の配置図
(地盤加速度・せん断土槽変位)

2. 2 加振方法

振動台への入力波は、振動数 3Hz の正弦波である。これは、試験体埋設深さにおいて地盤変位が最も大きくなるように、事前に実施した数値解析および試験体を埋設しない地盤のみの振動台加振の結果に基づいて決定したものである。図-4に、最大加速度振幅 402Gal の例を示す。加振ケースを表-3に示す。試験体の弾性挙動を把握するための小規模の加振から、十分に塑性変形させることができる大規模の加振まで 8 ケースを実施した。本論文では、二次元モデルの実験において側壁の鉄筋が降伏した最大加速度振幅 366Gal (3Hz) のケースの結果と比較するために、これと同程度の加振ケース No.4 の 402Gal の結果と、本実験において鉄筋が降伏した加振ケース No.5 の 854Gal 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 RC試験体および地盤の応答

地盤と試験体の最大加速度および最大変位の高さ方向の分布を図-5および図-6に示し、せん断壁の有無の影響を検討比較した。二次元モデルでは側壁の鉄筋が降伏した加振ケース(366Gal)の結果を、本試験体では加振ケース No.4(402Gal)の結果を示す。本実験と二次元モデルを比較すると、加速度、変位ともに地盤の分布形状は異なるが、地表面ではほぼ一致している。本実験では加速度はほぼ一致しているが、変位は試験体が地盤よりかなり小さい。二次元モデルでは加速度、変位とも

に試験体は地盤の応答によく追従している。

本実験の場合、試験体側壁に作用する土圧が大きく、試験体を変形する方向に作用する主要な荷重であると考え(図-8(a)参照)、作用面積を乗じた力を荷重として縦軸にとり、せん断壁の水平変位を横軸にとったものが図-7である。全ての加振ケースについて重ねて示した。また、側壁およびせん断壁の鉄筋が最初に降伏した点を示した。逆S字型の履歴を示しており、面内荷重を受ける耐震壁等の典型的な非線形挙動を示している。

以上のことから、本実験の試験体は面内剛性が大きいせん断壁の挙動に支配されている。このため、地盤変位や二次元モデルと比較して変位が小さくなるものと考えられる。

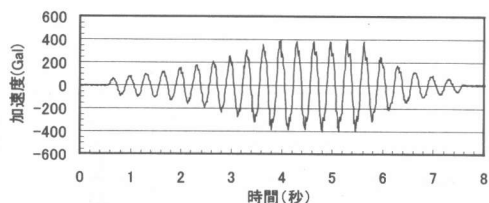


図-4 入力波形(振動数 3Hz 正弦波、最大加速度 402Gal の一例)

表-3 加振ケース

加振ケースNo.	振動台最大加速度	備考
1	53 Gal	
2	126 Gal	
3	245 Gal	
4	402 Gal	2次元モデルとの比較
5	854 Gal	鉄筋降伏
6	837 Gal	
7	1301 Gal	最大加振
8	885 Gal	

3. 2 RC試験体に作用する土圧と変位

本実験において鉄筋が降伏した加振ケース No.5(854Gal)の結果から、試験体側壁に作用する土圧と、せん断壁および側壁開口部の水平変位の高さ方向の分布を図-8(a)に示す。試験体が右方向に最大変位している状態の分布を示している。比較のために、二次元モデルの場合を図-8(b)に示す。図-8(a)では、左の側壁開口部の変位

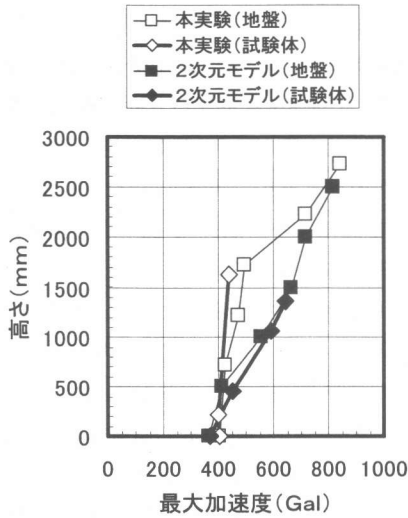


図-5 最大加速度分布

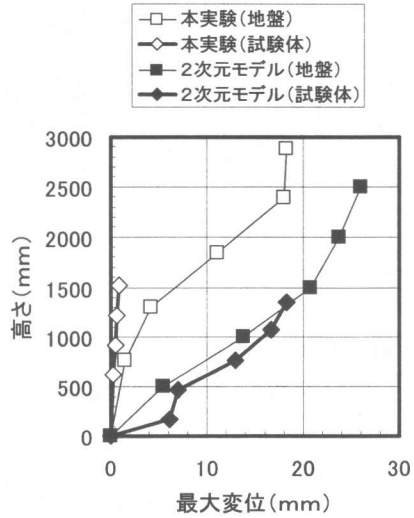


図-6 最大変位分布

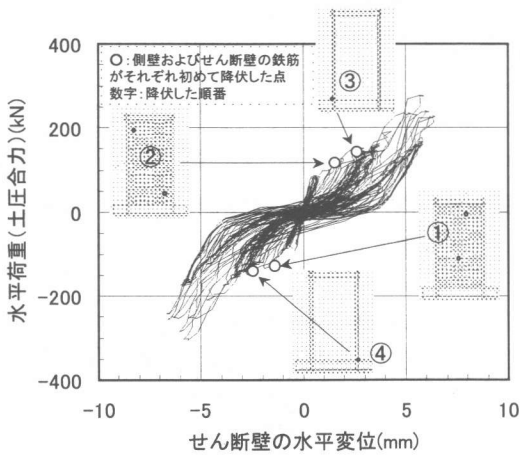


図-7 水平荷重とせん断壁の水平変位の関係

が内側にたわむ形状が特徴的である。左の側壁に作用する土圧が大きく、特に開口部では側壁上部に偏っている。一方、右の側壁開口部の変位は内側にたわむ形状ではなく、せん断壁の変位よりやや大きいとその差は小さい。また、右の側壁に作用する土圧はほぼゼロである。これは、試験体のみかけのせん断剛性がせん断壁の影響により地盤と比較して非常に大きいため、せん断剛性

差により地盤は右の側壁から離れていく挙動をし、左の側壁は地盤を拘束するような挙動をするために現れる地盤との相互作用の結果と考えられる。

図-8 (a)に示した試験体変位分布と地盤変位分布を一緒にプロットしたものが図-9である。左の側壁開口部の変位はせん断壁の変位と異なっているが、側壁中段より深い部分では地盤変位に漸近している。一方、右の側壁では地盤変位を拘束しないため、地盤は試験体から離れる。このことは、図-8 (a)で右の側壁に作用する土圧がほぼゼロであることが境界面において剥離が起きたことの傍証と言える。図-8 (b)に示したように、二次元モデルでは側壁の変位は地盤に追従し、剥離は起きにくいいため、土圧分布が全く異なっている。

3.3 奥行き方向の変位と鉄筋ひずみ

せん断壁付近と側壁開口部の間における、試験体頂版と底版間の最大水平相対変位(以後、層間変位と呼ぶ)の奥行き方向の変化を図-10に示す。両側壁ともに、せん断壁位置から開口部にかけて層間変位は大きくなるが、側壁が地盤側に変

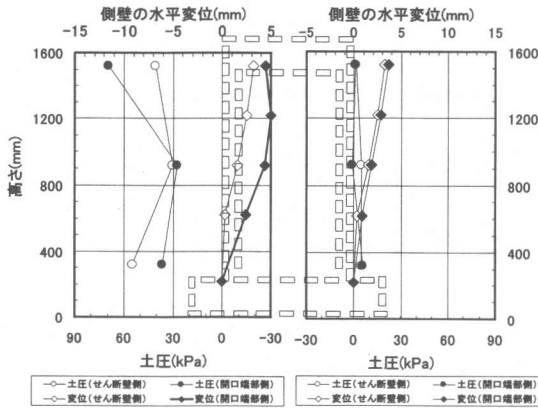


図-8(a) 側壁に作用する土圧と側壁の水平変位の分布図 (本実験)

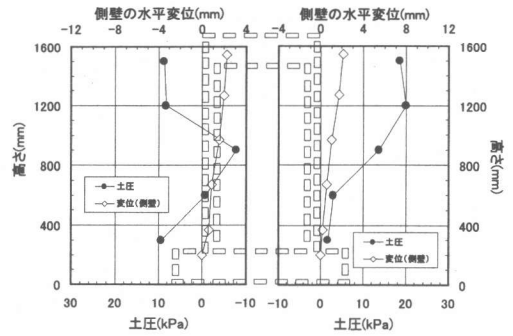


図-8(b) 側壁に作用する土圧と側壁の水平変位の分布図 (二次元モデルの実験)

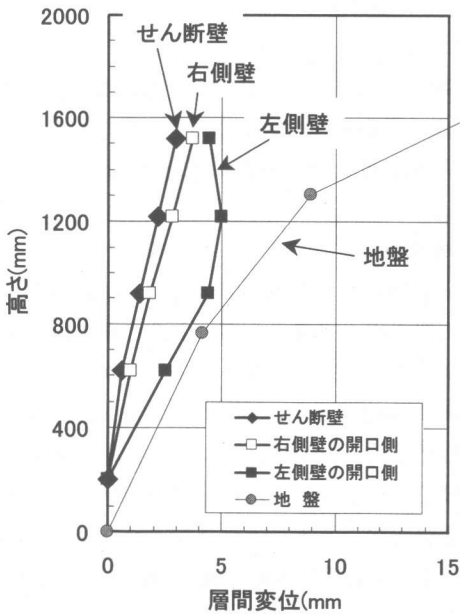


図-9 試験体と地盤の水平変位の分布図

位する場合(図中右側)の方が、側壁が試験体内空間側に変位する場合(図中左側)より層間変位の変化量が小さい。図-8および図-9で考察したように試験体と地盤の相互作用により、図中左側の側壁は土圧が作用するが、図中右側の側壁は作用しない。このことから、開口部の変位の変化量

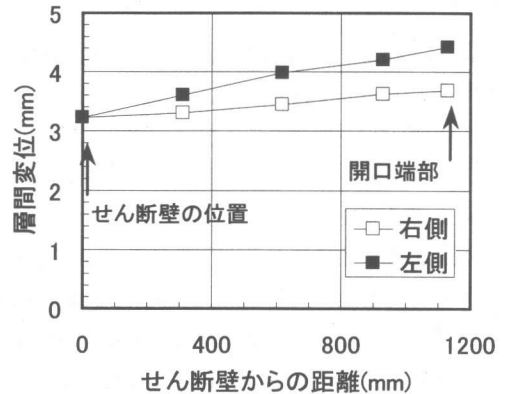


図-10 層間変位の奥行き方向分布図

に違いが生じたものと考えられる。このように、奥行き方向の変位の変化が認められるものの、図-6に示したように、せん断壁のない二次元モデルの層間変位と比較すると十分に小さい。また、本実験における同じ高さの地盤変位と比較しても小さい。

同様に、試験体側壁の上下隅角部の鉄筋ひずみ最大値の奥行き方向分布を図-11に示す。層間変位と同様に開口部の方がひずみは大きくなるが、その変化は小さい。試験体のせん断変形による曲げと、側壁が試験体内空間側に変位する場合に作用する土圧による曲げは、上部隅角部において符号が逆になるため互いに打ち消し合い、下

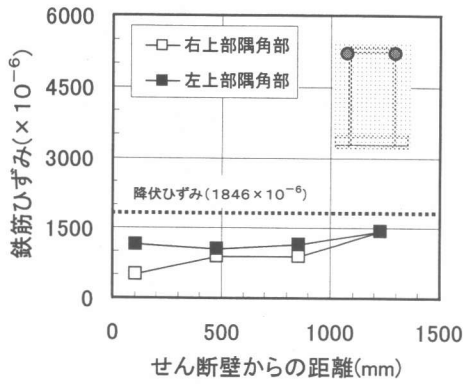


図-11(a) 側壁隅角部の鉄筋ひずみの奥行き方向分布図 (上部隅角部)

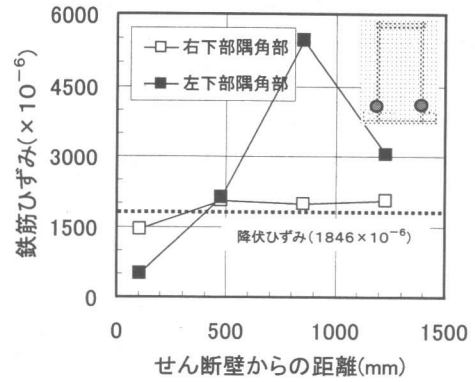


図-11(b) 側壁隅角部の鉄筋ひずみの奥行き方向分布図 (下部隅角部)

部隅角部において同符号になるため、下部隅角部の鉄筋引張りひずみが大きく、上部隅角部に先行して降伏したものと考えられる。

4. まとめ

せん断壁を有する三次元RCボックス構造試験体を用いて地盤連成を考慮した振動台実験を行い、せん断壁のないRCボックス構造の挙動との違いについて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 試験体全体の挙動はせん断壁の挙動に支配される。
- ② 側壁に作用する土圧分布が左右で異なり、全く異なる土圧分布となる。
- ③ せん断壁の位置から離れるほど層間変位と鉄筋ひずみは増加傾向を示すが、層間変位は小さい。

また、本実験の試験体の場合、同一の入力波形による層間変位の違いが際立っていることも明らかになった。したがって、せん断壁を考慮することにより合理的な照査・設計の可能性があるとと言える。

一方、せん断壁を無視して側壁等のボックス構造物を設計する従来の二次元モデルの仮定は十分に安全側であると言える。

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) 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, Vol.22, No.3, pp.1483-1488, 2000.6
- 2) 松尾豊史, 金津努, 大友敬三, 松本恭明: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.55-60, 2000.6
- 3) 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, Vol.22, No.3, pp.1339-1344, 2000.6
- 4) 末広俊夫, 大友敬三, 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2) 小型振動台実験で得られたRC試験体挙動について, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.625-628, 1999.7