

模型振動実験による地下鉄構造物の 地震時挙動の検討

岩楯 徹広¹ 飯野 貴嗣² 木村 良章³ 佐藤 泰⁴ 三浦 篤⁴

¹ 正会員 工博 東京都立大学教授 工学研究科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

² 学生員 東京都立大学大学院 工学研究科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

³ 五洋建設(株) 釜石工事事務所 (〒026 岩手県釜石市港町 2-1-1)

⁴ 正会員 日本国土開発(株) 技術開発研究所 (〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

阪神・淡路大震災では、従来地震に強いと考えられていた地下鉄構造物が大きな被害を受けた。筆者らは、被害調査を実施するとともに、被害原因の検討を行ってきた。本報告は、典型的な被害を受けた神戸高速鉄道大開駅舎を対象として、1/30 スケールの模型振動実験を行い、地盤・構造物の応答特性、構造物に作用する動土圧、側壁や中柱に生ずる曲げひずみ等について調べ、破壊原因の検討を行ったものである。構造物に作用する動土圧、せん断土圧や中柱に極端に大きな曲げひずみが生じることなどを確認した。

*Key Words : Scaled Model Vibration Test, Subway Structure, Shear Crack
Great Hanshin-Awaji Earthquake, Seismic Response, Center Column*

1. はじめに

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、従来、地震に強いと考えられていた地下鉄構造物が大きな被害を受けた。筆者らは、被害調査を実施し、被害の原因と検討を行ってきた。被害を受けた地下鉄構造物の多くは、開削工法で施工されたRCの函型断面で中柱を有する構造である。被害形態としては、中柱の損壊(曲げ・せん断)が圧倒的に目立った。地震によって地下鉄構造物がこれほど大きな被害を受けたことは過去に例がなく、被害原因の究明を図ることは、今後の耐震設計上重要と考える。

このため本研究では、その典型的な被害を被った、神戸高速鉄道大開駅舎の模型を対象にして、せん断土槽による模型振動実験を実施し、地盤・地中構造物の加速度応答、また構造物に作用する地震荷重(動土圧・せん断土圧)と、中柱に生じる曲げひずみを計測し、破壊原因について検討した。

2. 実験準備

(1)モデル地盤・駅舎模型・測点配置

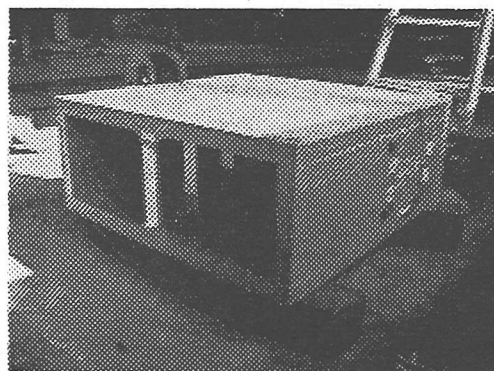


写真-1 大開駅舎の模型

本実験では、自由地盤のみの場合と、地盤中に構造物模型を埋設した場合の、2つのケースに分けて実施している。

4m×4mの振動台上に設置した、せん断土槽(縦80cm×横120cm×高さ100cm)中に岐阜砂(乾燥砂)を用いて、表層と支持層の二層構造で、厚さ1mのモデル地盤を作製した。下層は振動締固めを行ない、上層は散布装置から砂を空中落下させた。乾燥単位体積重量は下層が1.60 tf/m³、上層が1.48 tf/m³である。

構造物模型(写真-1)は、大開駅を想定し

表-1 各試験項目

試験項目	試験条件
(a)弾性波速度試験	地盤の鉛直方向のSH波速度分布を調べる
(b)自由振動試験	振動台を1回加振
(c)ホワイトノイズ試験	入力レベル：10gal, 20gal, 50gal, 100gal, 200gal, 400gal, 800gal
(d)正弦波スイープ試験	スイープ間隔：5Hz～30Hz
(e)地震波（神戸海洋気象台）試験	入力レベル：20gal, 50gal, 100gal, 200gal, 400gal 時間軸：1/1, 1/5, 1/10, 1/20, 1/30 入力レベル：NS成分最大818galの50%, 100%

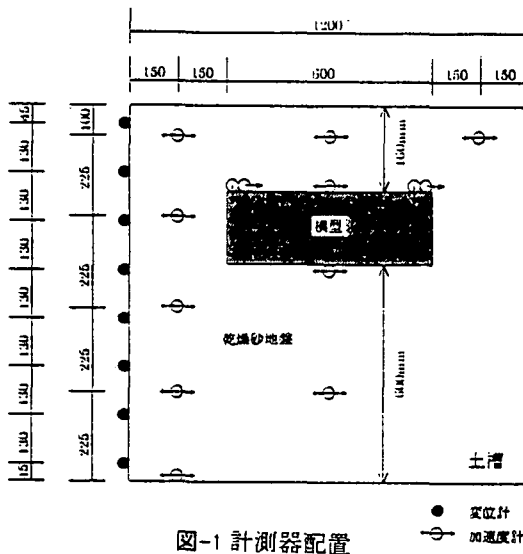


図-1 計測器配置

た、実物大とのスケール比が30分の1(幅60cm×高さ24cm×奥行60cm)の、塩化ビニール製の模型である。駅舎模型は下層上に設置し、埋設深さを相似則に基づき、実際の土被り4.8mの30分の1の16cmとした。

図-1 にモデル地盤—駅舎模型の測点配置を示す。地盤中に、加速度計とせん断ひずみ計、土槽側壁に変位計を設置し、地盤の加速度応答とせん断ひずみを計測した。また、駅舎模型には加速度計・せん断応力計・土圧計・ひずみゲージを設置し、模型の加速度応答、側壁に作用する動土圧、上載土のせん断力、側壁・中柱の曲げひずみを計測した。

(2) 試験項目

各種試験については表-1に示す通りである。(b)～(d)では地盤材料の動的物性を調べた。(d)～(e)ではモデル地盤の動的応答特性、模型に作用する地震時荷重(動土圧・せん断土圧)、模型中に生じる曲げひずみについて測定した。

基準ひずみ $\gamma_r = 3.5 \times 10^{-4}$

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}$$

$$h = \frac{4}{\pi} \left[\frac{G_0}{G} \left\{ \frac{\gamma_r}{\gamma} - \left(\frac{\gamma_r}{\gamma} \right)^2 \ln \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \right\} - 0.5 \right] + 0.02$$

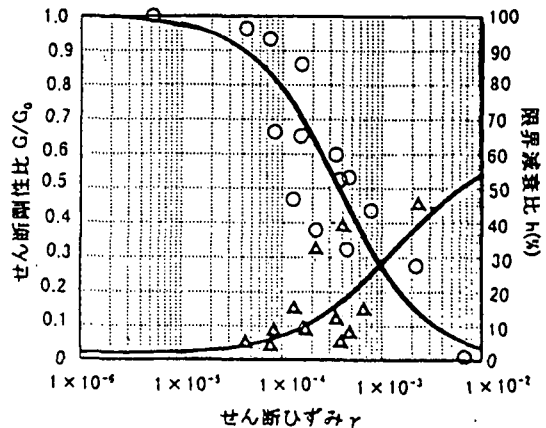


図-2 モデル地盤の動的物性

3. 実験結果

(1) モデル地盤の基本的特性

(a)の弾性波速度試験より得られたせん断波速度は、 $V_s=90\sim100\text{m/sec}$ で深さ方向にほぼ一定である。また、(b)～(d)の試験から求めた地盤中のせん断ひずみ γ と平均的なせん断剛性比 G/G_0 、限界減衰比 h の関係を図-2に示す。これらの値は、砂に関するSeed-Drissカーブに比べて、小さなひずみレベルから既に非線形性が表れている。それは、モデル地盤が低拘束圧下にあるためと考える。図中の曲線は以前の研究で得られた、Modified Hardin-Drnevich モデルにより与えられる理論曲線で実験値を近似したものであるが、実験結果と比較的良好な対応を示した。

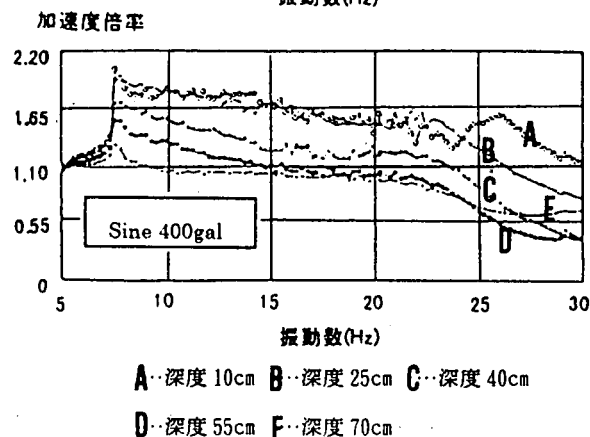
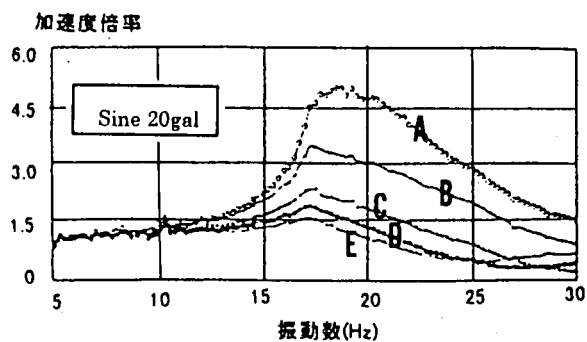


図-3 モデル地盤の共振曲線

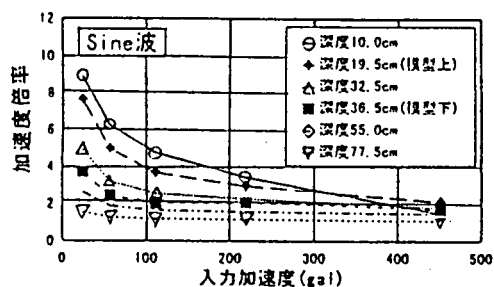


図-4 入力加速度-応答倍率

(2) モデル地盤の非線形応答特性

正弦波スイープ試験 (20gal、400gal) による地盤の共振曲線を図-3 に対比して示す。また図-4 に入力加速度と加速度倍率との関係、図-5 に入力加速度と共振振動数との関係を示す。これらから、地盤は入力レベルの小さい範囲では、非線形的な応答を示していないが、入力レベルの増加に伴って、応答倍率の減少と共振点の低振動数への移行が認められ、強い非線形性が示された。一方、この現象は、地震波入力の場合でもほぼ同様の傾向が示されている (図-6)。

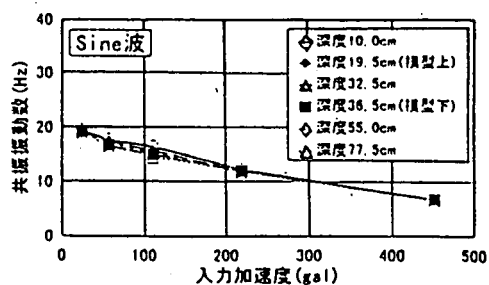


図-5 入力加速度-共振振動数

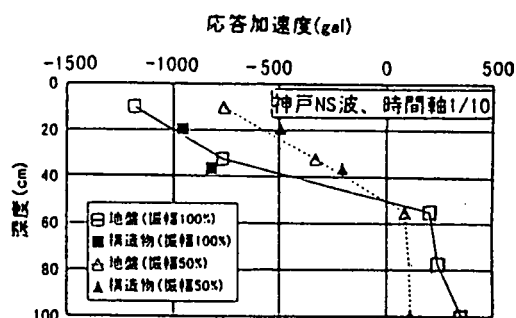


図-6 応答加速度の深度分布

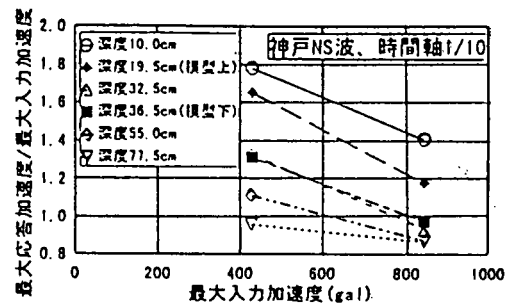


図-7 入力加速度-応答倍率

(3) 駅舎模型の応答特性

図-7 に地震波入力時 (JMA 観測波 NS、時間軸 1/10) による模型、地盤の加速度応答を示す。表層地盤では極端な増幅と強い非線形性が示され、また模型がその影響を強く受けていることが明らかとなった。模型の応答と地盤の応答は、入力レベル 50% では振幅・位相ともほぼ同じで、また水平に一体となって振動しているが、入力レベルが 100% になると、その差が顕著となり、模型応答には水平だけでなく、上下のロッキング振動が生じていることが認められた。

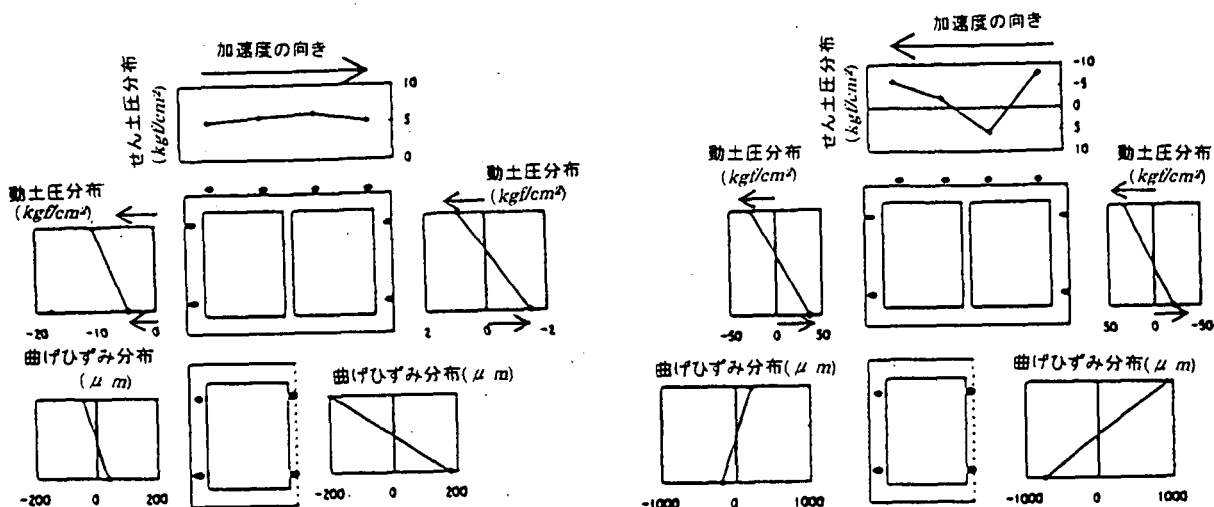


図-8 模型に作用する土圧・曲げひずみ (左 Sine 20gal 右 Sine 400gal)

図-8 は正弦波入力時 (20gal, 400gal) の共振点における模型の側壁に作用する動土圧と上床版に作用するせん断土圧、および側壁・中柱に生じた曲げひずみを比較したものである。入力レベルの小さい範囲では、せん断土圧は上載土の加速度方向 (慣性力) と同位相で模型のせん断変形を助長する方向に、また側壁に作用する動土圧はこれに抵抗する方向に作用している。これに対して入力レベルが増加すると、側壁の動土圧もせん断変形を助長する方向へ作用するように変化した。これは周辺地盤の剛性が減少し、地盤と構造物の剛性比が、入力レベルの小さい時と逆転したためと考える。さらに模型のロッキング振動が増大するため、側壁の動土圧分布は上部と下部で符号が逆転することなども認められた。模型の曲げひずみについては、中柱には側壁の約 3~5 倍のひずみが生じているという結果を得た。また地震波入力時も、ほぼ同様の傾向が示される結果を得た (図-9)。

4. 実験の数値シミュレーション

現在、模型振動実験の数値シミュレーションを実施し、地盤—地下鉄構造物の連成振動、構造物に作用する動土圧・せん断土圧について検討中である。解析結果については、今後報告する予定である。

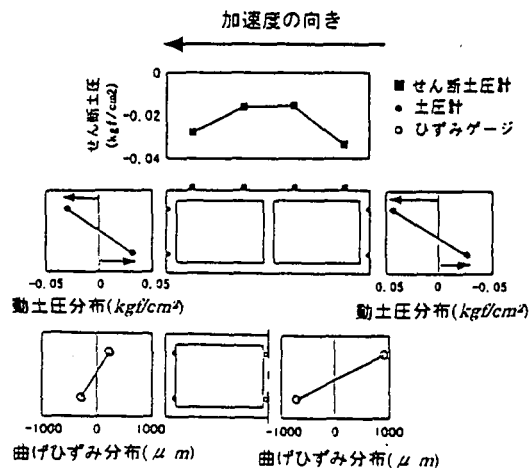


図-9 模型に作用する土圧・曲げひずみ (地震波入力時)

5. まとめ

今回実施した模型振動実験により、地下鉄構造物が被害を受けた原因として、以下のことが推定できる。

- ① 構造物模型の挙動は、周辺地盤のせん断変形および上載土の慣性力に伴うせん断土圧の影響を強く受けていること。
- ② 中柱には側壁よりかなり大きな曲げひずみが生じ、破壊に至った可能性がある。

参考文献

- 1) 国生、岩橋：軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析 土木学会論文報告集 No. 285 1979年5月