

地下鉄構造物の模型振動実験の数値 シミュレーション

車 愛蘭¹ ・ 岩楯 徹広²

¹ 東京都立大学大学院 工学研究科 博士課程 1 年 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

² 正会員 工博 東京都立大学 工学研究科教授 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震(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。被害を受けた構造物の多くは、開削工法で施工された RC の箱型断面で、中柱を有する構造であった。被害形態としては、中柱の損壊(曲げ、せん断)が圧倒的に多い。本研究では、地下鉄構造物の地震時挙動を解明するため、せん断土槽を用いた振動台模型実験を行い、水平方向、上下方向及び水平・上下同時加振による応答特性について、実験と解析により検討を行った。解析結果は実験結果と良い対応を得ており、地下鉄構造物の応答特性に水平動が支配的で、上下動による動土圧や中柱に生じるひずみは、水平動によるものに比べてかなり小さい事が解析的にも明らかとなった。

Key Words: *Hanshin-Awaji Earthquake, Subway Structure, Scaled Model Shaking Table Tests, Seismic Response Analysis, Dynamic Earth Pressure*

1. はじめに

東京都立大学では、兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)後に典型的な被害を受けた地下鉄構造物として神戸高速鉄道・大開駅の 1/30 の模型を作成し、大型振動台とせん断土槽を用いた模型振動実験及び数値解析を実施してきた(図 1)。平成 8 年から平成 11 年にかけて、主として水平加振時の地下鉄構造物の動的応答特性について検討した。現行の耐震設計基準では、上下動による地盤-構造物系への影響は、水平加振時に比べてその影響が小さいと考えられ、設計に十分反映されていない。また、既往の研究では、上下動に関して検討を行ったものは少なく、上下動による地盤-構造物系の動的挙動や構造物に作用する動土圧を解明することは極めて重要であると考えられる。本研究は、正弦波およびランダム波入力による上下および水平・上下同時加振振動実験とその数値シミュレーションを実施し、地震時応答特性を検討したものである。

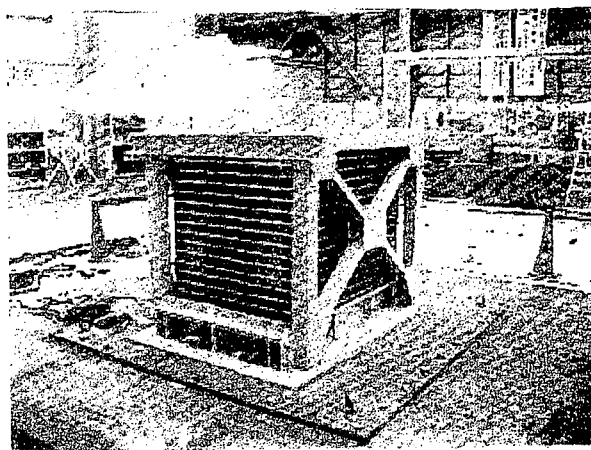


図 1 模型振動実験

2. 目的と方法

(1) 目的

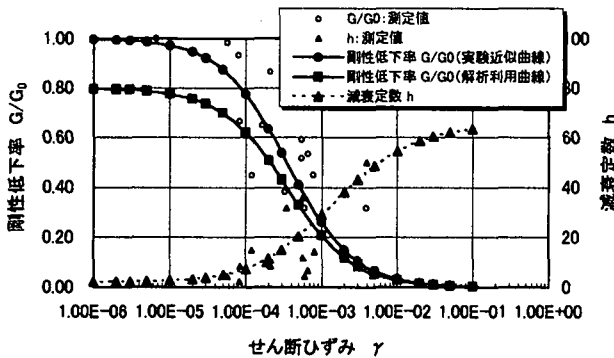
本研究は、せん断土槽を用いた模型振動実験と数値シミュレーションにより、地震時の地盤・構造物の最大応答加速度、構造物に作用する地震時荷重(頂版のせん断応力及び側壁の直応力)、さらに側壁・中柱に発生する地震時曲げひずみ分布を解明す

るとともに、水平、上下の加振方向の違いによって地盤・構造物の動的応答特性や動土圧がどのように変化するのかを解明し、実設計へ反映することを目的としている。

(2) 解析方法

以下に示すように、第1ステップとして地盤のみの解析、第2ステップとして地盤－構造物連成系解析を行った。

(2-1) CASE-A：地盤の地震応答解析：解析コードとして SHAKE を用いた。解析モデルは、水平成層の多層構造として、地盤の非線形特性を表す $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 曲線は実験結果を基にして作成した (図 2)。実験に用いた入力レベルの異なる 5 種の正弦波および神戸気象台観測波形の NS 成分 (818gal)、UD 成分 (334gal) を入力波形とした (図 3)。実験結果の数値シミュレーション解析を行い、地盤の非線形応答特性を評価した。解析結果は実験結果と良い一致を示した (文献 1)。



剛性低下率

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_t}}$$

減衰定数

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

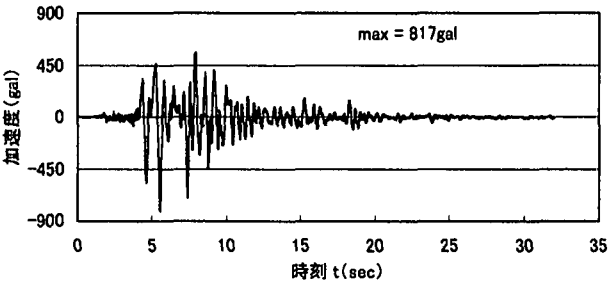
γ_t : 規準ひずみ ($=3.5 \times 10^{-4}$)

G_0 : 初期せん断剛性

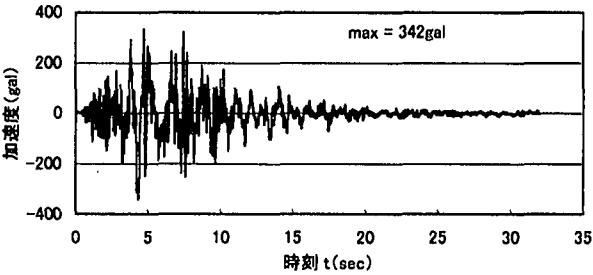
図 2 ひずみ依存曲線

(2-2) CASE-B: 地盤－構造物連成系の地震応答解析：解析コードとして、3次元 FEM 解析法 (TDAP III) を用いた。解析モデルは、地盤を平面歪み要素、

構造物を梁要素としている (図 4)。地盤の物性は Case-A 収束物性値 (せん断剛性や減衰定数) を用いている。また入力条件は Case-A と同じである。ここでは、地盤・構造物の連成挙動と構造物に作用する地震時土圧 (せん断応力、直応力)、側壁や中柱 (上下床版と中柱の結合条件剛結 or ヒンジ) に生じる曲げ歪みなどを算定し、実験結果と比較した。



NS 成分 (時間軸 1/1、振幅 100%)



UD 成分 (時間軸 1/1、振幅 100%)

図-3 神戸海洋気象台記録波形

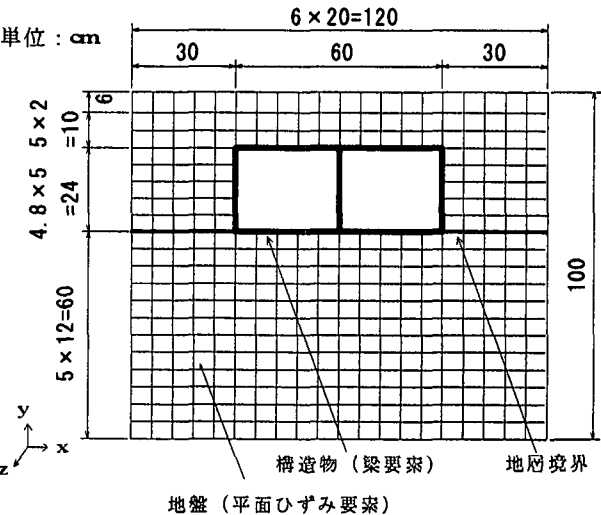


図 4 二次元解析モデル

3. 検討結果

(1) 上下加振時の地盤・構造物の応答特性

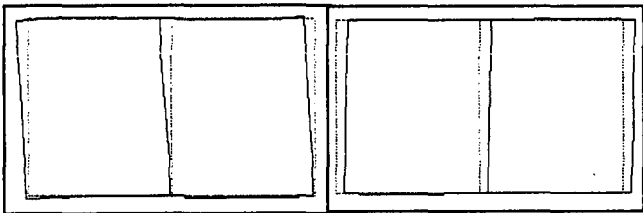
a) 上下動では、水平の場合（微小入力レベル 20Hz、大地震時 8Hz）に比べかなり高振動数（微小入力レベル 47Hz、大地震時 41Hz）で共振することが分かった（図 5）。入力レベル増加しても、共振点の減少はあまりなく、顕著な非線形性は生じていない。また、水平動ではロッキング振動が卓越するが、上下動では地盤と構造物はほぼ一体に上下方向に挙動している（図 6）。

b) 頂版のせん断力成分は、極めて小さくほとんど作用していないことが分かった。また、左右の側壁に作用する直土圧は、静的土圧と同じように左右で同位相分布（両押し）を示しており、水平加振時に比べて値は小さい。

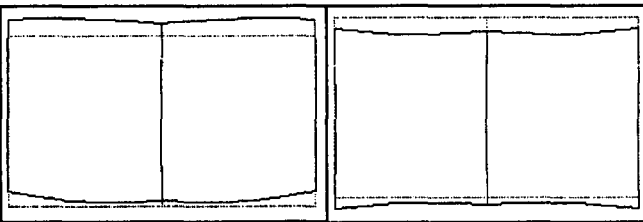
c) 上下動に対して、中柱には軸ひずみが生じているが、曲げ歪みはほとんど生じていない。これは曲げ変形が生じていないためと考える。これは曲げ変形が生じていないためと考える。また、この値は水平動に対する曲げひずみよりかなり小さい。

(2) 水平・上下同時加振時の地盤・構造物の応答特性

a) 同時加振では、水平と上下の入力方向の位相差 0° と位相差 90° の 2 ケースを行った。両ケースとも 2 つの共振点 が得られた。低い共振点は水平動の卓越振動数、高い共振点は上下動の卓越振動数に対応するものである。共振点の値はそれぞれ水平、上下単独入力の場合と比較して大きな差はなく、特に水平・上下の連成による特有の応答特性は生じてない。地盤と構造物の応答は、水平成分の共振点で最も大きく、ロッキング振動が卓越する特性を示す。



水平動（正弦波 400gal 入力）



上下動（正弦波 200gal 入力）

図 6 共振点における構造物の変位モード

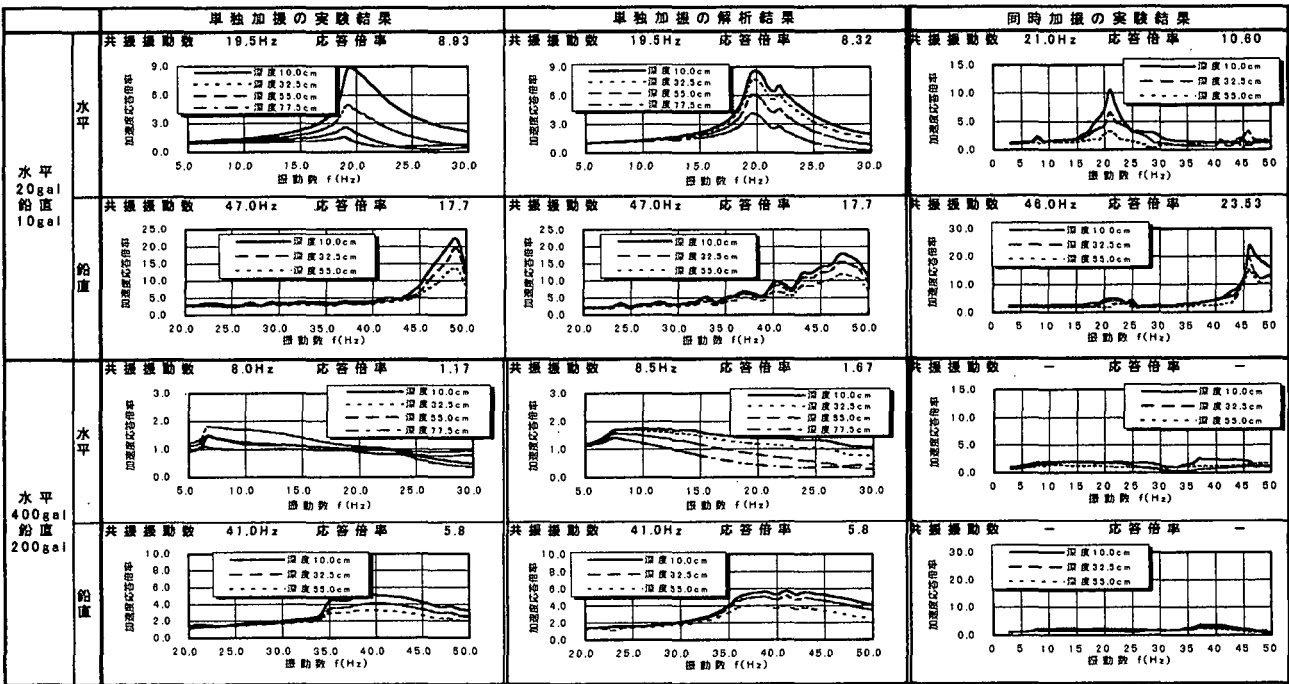


図 5 地盤・構造物の共振曲線

b) 水平の共振点において、構造物頂版に作用するせん断土圧は、位相差 0° と 90° の2ケースとも、入力レベルの増加に伴い増加する傾向があり、いずれも頂版端部付近で大きくなっている。

c) 中柱に生じる歪みは、水平単独の場合に比べてむしろ若干小さくなる傾向となった。また、曲げひずみはヒンジ結合により剛結の $1/6 \sim 1/10$ に減少することが分かった (図7、図8)。

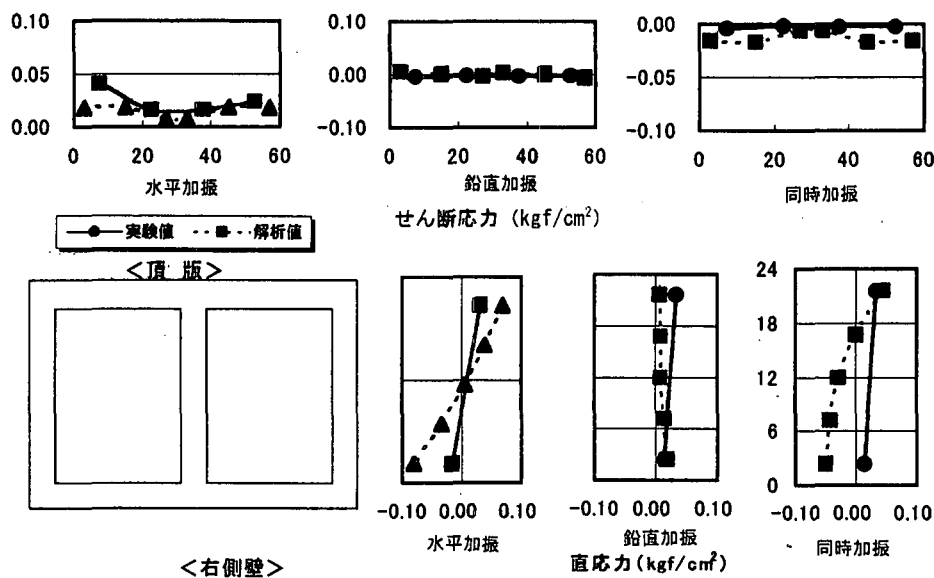


図7 地震時構造物に作用する土圧分布

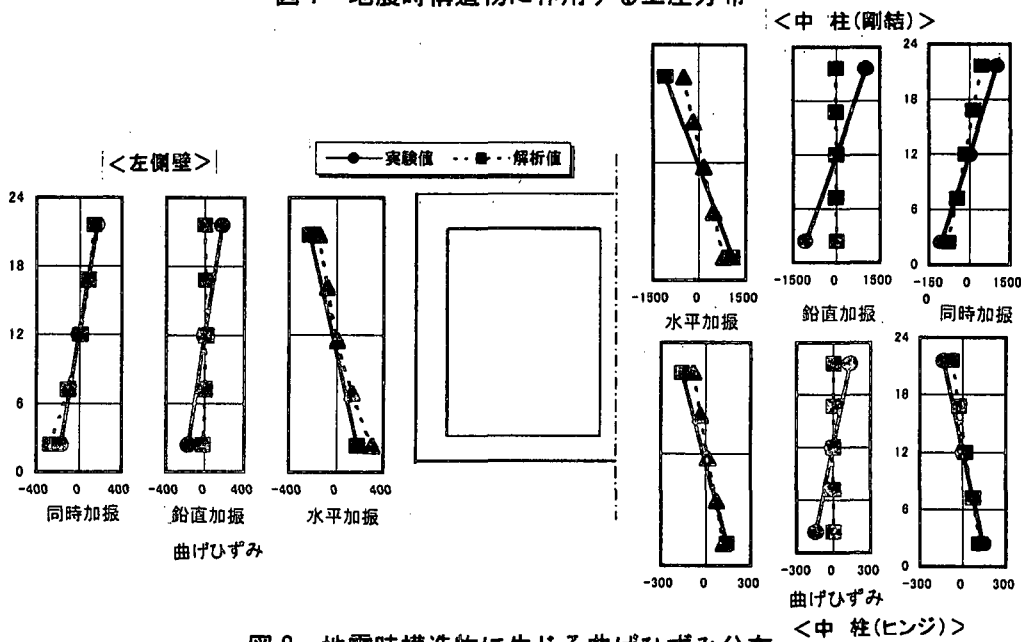


図8 地震時構造物に生じる曲げひずみ分布

4. まとめ

解析結果は実験結果と良い対応を得ており、解析手法の妥当性が検討された。地下鉄構造物の応答特性は、水平動が支配的で、上下動による動土圧や中柱に生じるひずみは水平動によるものに比べてかなり小さい事などが明らかとなった。今後破壊過程

の応答特性について検討を進めたい。

参考文献

1) 岩楯 徹広・楠 博典・林 家祥・田中 努：地下鉄構造物の地震時挙動に関する解析的検討 第25回土木学会 地震工学会研究発表会 講演論文集 第2分冊、p481-484、平成11年7月