

地下鉄構造物の地震時挙動に関する 模型実験と数値シミュレーション

岩楯敏広¹・楠 博典²・林 家祥³・田中 努⁴

¹正会員 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0362八王子市南大沢1-1)

²東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0362八王子市南大沢1-1)

³正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部 (〒213-0011川崎市高津区久本3-5-7)

⁴フェロー 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ 品質管理室 (〒150-0002渋谷区渋谷1-16-14)

本研究は、阪神・淡路大震災で大きな被害を受けた大開駅部を対象に模型振動実験を行い、地盤・構造物の相互作用および構造物に作用する地震時土圧、中柱端部の結合条件（剛結orヒンジ）による中柱のひずみの違いについて調べたものである。本論文は、実験結果をもとに数値シミュレーションを行い、解析モデルの妥当性を確認した上で、地盤と構造物の間に生じる滑りや剥離と入力地震動の大きさとの関係を明らかにしている。その結果、滑りや剥離は入力のが100gal以上で生じることが分かった。また、中柱に生じるひずみは、ヒンジ結合の場合、剛結の場合に比べてかなり小さい（1/5以下）ことなどが得られ、中柱の破壊原因の1つが実験と解析により明らかとなった。

Key Words : *Subway Structure, Numerical Simulation, Shaking Table Test, Joint Element, Seismic Earth Pressure, Shear Deformationable Device*

1. はじめに

筆者らは、これまでに阪神・淡路大震災で大きな被害を受けた大開駅を対象に、せん断土槽による模型振動実験とその数値シミュレーションを行い、被害原因の究明を図ってきた。

今回は、地盤と構造物の相互作用、特に滑り・剥離現象に着目し、これらの現象を解析上でより正確に表現するため、ジョイント要素の物性値の検討を行った。これにより、解析モデルの妥当性や滑り・剥離現象と入力地震レベルの関係を明らかにした。

また、地盤と構造物の応答特性、構造物に作用する頂版のせん断土圧や側壁の直土圧および中柱と側壁に生じる曲げひずみに着目し、実験と解析結果を比較することで上下床版と中柱の結合条件（剛結あるいはヒンジ）の違いによる中柱の挙動や破壊に及ぼす影響などについても検討した。

2. 模型振動実験の概要

2.1 実験装置

振動台実験は、自由地盤および地盤中に構造物模型を埋設した場合の2ケースについて行った。本実験に用いた土槽、模型等の断面寸法を表-1に示す。

表-1 断面寸法

実験装置名	断面寸法
振動台	縦4m×横4m
せん断土槽	縦80cm×横120cm×高さ100cm
構造物模型	幅60cm×高さ24cm×奥行60cm

模型地盤は、岐阜砂（乾燥砂）を用いており、上下二層構造で全厚さ1mである。下層は振動締固めを行い、上層は散布装置から砂を自由落下させて作製している。乾燥単位体積重量は、下層が1.60tf/m³、上層が1.48tf/m³である。構造物模型は、大開駅部を想定した実物の1/30のスケールで、塩化ビニール製である。

表-2 実験項目と実験条件

実験項目	実験条件
(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	スイープ範囲 : 5Hz~30Hz 入力レベル : 20gal, 50gal, 100gal, 200gal, 400gal
(e) 地震波(神戸海洋気象台記録)試験	時間軸 : 1/1, 1/5, 1/10, 1/20, 1/30 入力レベル : NS成分最大加速度818galの50%, 100%

埋設深さは幾何相似則に基づき、実際の土被り4.8mに相当の16cmとした。

2.2 実験項目および条件

実験項目および条件を表-2に示す。実験は中柱と上下床版の結合条件が剛結とヒンジの各々について行った。

実験項目(a)~(d)は、モデル地盤の動的物性値を、(d)、(e)は構造物および地盤の応答特性を調べるための実験である。実験(a)より地盤のせん断波速度は、 $V_s=90\sim 100\text{m/s}$ で深さ方向に一定であることが分かった。図-1は、動的物性値実験より得られた地盤のひずみ依存特性である。これらの値は、砂のSeed-Idris sカーブに比べ、小さいひずみレベルから既に非線形性が表れている。これは、実地盤よりもモデル地盤の拘束圧が小さいためと考えられる。図-1の曲線は、Modified Hardin-Drnevichモデルによる理論曲線で実験値を近似したものである。実験結果と比較的良好な対応を示していることが分かる。

なお、構造物や地盤の応答特性の詳細については後述3章において解析結果と比較しながら示すことにする。

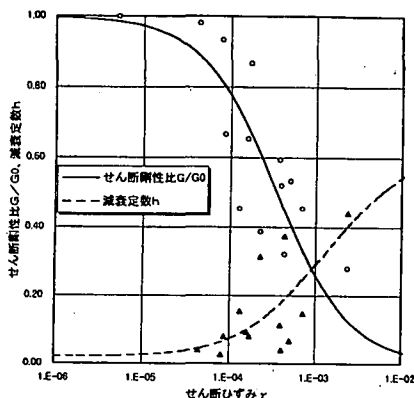


図-1 モデル地盤の動的物性

3. 数値シミュレーション

3.1 解析の内容

(1) 解析モデル

地盤応答解析の解析コードは、SHAKEを用いた。地盤を二層構造モデルとし、実験で求めた地盤の歪依存特性(図-1)を用いた。なお、実験ではせん断土槽の型枠が地盤と一体となって挙動することから、地盤モデルは土槽の型枠による重量増(約1割)や模型構造物による地盤の見かけの剛性低下(約2割)の影響を考慮し、地盤の初期物性値を重量密度は1.1倍、せん断剛性は0.8倍にした。

2次元FEM解析コードはTDAPを用いた。地盤は平面ひずみ要素とし、SHAKEの収束剛性と減衰を与えている。構造物は梁要素とし、中柱と上下床版の間は剛結とヒンジの各々についてモデル化した。さらに、構造物と地盤の間の滑りや剥離を表現できるジョイント要素を設けた。

(2) 解析ケース

解析ケースは、地盤のみの応答解析では振幅20gal, 400galの正弦波を用いた2ケースとする。2次元FEM解析では、構造物の中柱と上下床版の結合条件を剛結とヒンジにした場合に、入力波形が振幅20gal, 400galの正弦波および実地震波の6ケースとする。

(3) 入力波形

共振曲線を求める入力波形は、振動台上で記録した正弦波4秒間を用いた。振動数範囲を5~30Hz、刻みを0.5Hzとした。積分間隔は1/128Hzである。

FEM解析は、正弦波入力の場合は共振振動数の波形、実地震波入力の場合は神戸海洋気象台記録波形のNS成分(時間軸1/10、振幅100%)を用いた。地震波入力の積分間隔は実験と合わせて1/512Hzとした。

3.2 解析結果と考察

(1) 共振曲線のシミュレーション

図-2に、解析と実験で求めた共振曲線を比較して示す。解析と実験とも、共振曲線の分布形状は似通っており、共振振動数は20galで19.5Hz、400galで8.0Hz付近にある。応答倍率は、地表付近で20galでは約1.8

倍、400galでは約9倍と同程度となっているが、地盤内各深度の位置では、解析よりも実験の方が応答倍率は小さい。

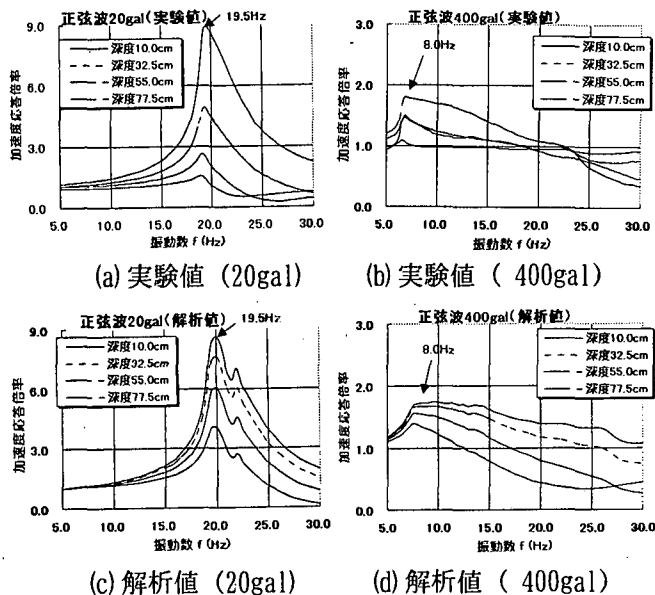


図-2 解析と実験の地盤共振曲線の比較

(2) 解析モデルの妥当性の検討

地盤と構造物の境界では、滑りや剥離が予想されるため、これを考慮できるジョイント要素を設けた。ジョイント要素は、剥離を表現する垂直方向モデルと滑りを表現するせん断方向モデルによって構成されており、それぞれのモデルは非線形特性を考慮したバネ要素で表現されている。滑りや剥離を支配するのはジョイント要素の剛性および摩擦係数となっているため、ここでは、この2つの物性値の変化が応答に及ぼす影響に着目してモデルの妥当性を検証している。

まず、正弦波400galのケースで摩擦係数を0.6に固定して、せん断剛性 G を $1,000\text{tf/m}^2 \sim 10,000\text{tf/m}^2$ に変化させ、頂版に作用するせん断土圧の分布を調べた。図-3 (a)のように、剛性が小さいレベルでは凹状分布、大きいレベルでは凸状分布となっており、頂版のせん断土圧はせん断剛性に強く依存することが明らかとなった。次に、せん断剛性 G を $1,000\text{tf/m}^2$ で固定し、摩擦係数を0.1~0.6に変化させて頂版に働くせん断土圧分布を調べた。図-3 (b)のように、せん断土圧分布は摩擦係数を変化させてもほとんど変化しないことが分かった。

以上の検討の結果を踏まえて、実験で得られたせん断土圧の大小および分布形状にほぼあうように、加速度振幅20~400galの正弦波に対し、摩擦係数を0.6としてジョイント要素の最適せん断剛性の検討を行った。図-4にその結果を示す。これによると、ジョイント要素に用いるせん断剛性は、400galでは、周辺地盤剛

性（SHAKEの収束値）と同程度で、加速度が小さいほどせん断剛性を周辺地盤剛性よりも大きく設定する必要があることが分かった。

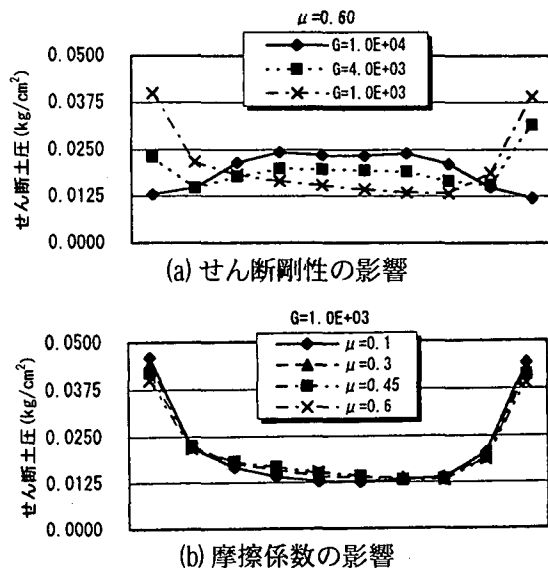


図-3 ジョイント要素への影響要因

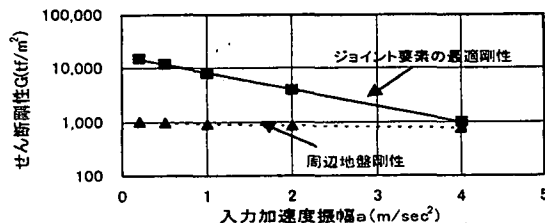


図-4 最適せん断剛性

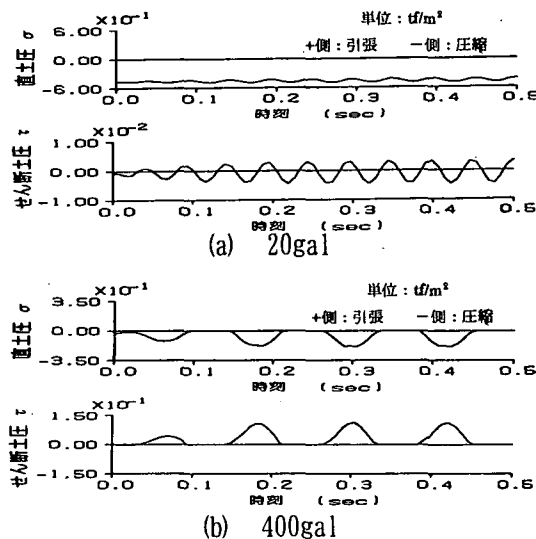


図-5 頂版端部の地震時土圧の応答時刻歴

(3) 滑り・剥離と入力レベルの関係

正弦波を入力した場合、加速度を変化させてどのレベルで滑りや剥離が生じ始めるかを調べた。なお、ジョイント要素の物性値は、せん断剛性は(2)で求めた最適値、摩擦係数は0.6を用いている。

図-5は、構造物頂版の端部に作用している直土圧およびせん断土圧の時刻歴である。これによると、20

galで滑りや剥離は起こらず、400galでは滑り、剥離が生じることが分かった。

また、図-6は、同一時刻における頂版のせん断土圧分布を実験値と比較したものである。せん断土圧分布は、20galでは凸状、400galでは凹状、100galではほぼ直線状になっているため、正弦波入力では100galですでに滑り現象が生じていることが明らかとなった。

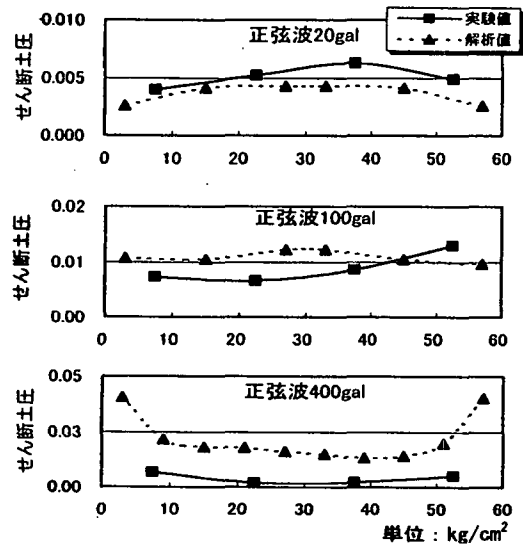


図-6 頂版のせん断土圧分布

(4) 実験結果との比較

図-7は、中柱と上下床版との結合条件を剛結とした場合のせん断土圧、直土圧分布について実験値と解析値を比較したものである。分布形状の傾向は似通っていると思われる。

せん断土圧に関しては、解析と実験ともに正弦波20galの場合は頂版中央付近が大きく、端部が小さくなる傾向を示す。これに対して加速度レベルが大きくなると逆に中央付近が小さく端部が大きい傾向を示す。このようなせん断土圧の逆転の最も大きな要因は地盤と構造物の間で滑りが生じたためと考えられる。この数値解析により、加速度レベルの小さい範囲では滑りが生じなかったこと、大きい場合は滑りが生じたことが分かった。また、解析モデルの検討で設定したジョイント要素の物性値は概ね妥当であると考えられる。

直土圧に関しては、大きい加速度レベルでは実験、解析とも上下の符号が異なり、ロッキングが現れていることを示し、小さい加速度レベルでは実験はほぼ同位相であり並進が現れていることを示している。しかし、解析では並進は認められなかった。

表-3に、中柱と上下床版との結合条件を剛結とヒンジとした場合の最大曲げひずみを実験値と解析値を比較して示す。加速度レベルの大きさによらず、解析、実験とも、中柱を剛結とした場合、柱に生じるひずみ

はヒンジの場合の5～7倍となり、結合条件によって大きく変化することが明らかとなった。

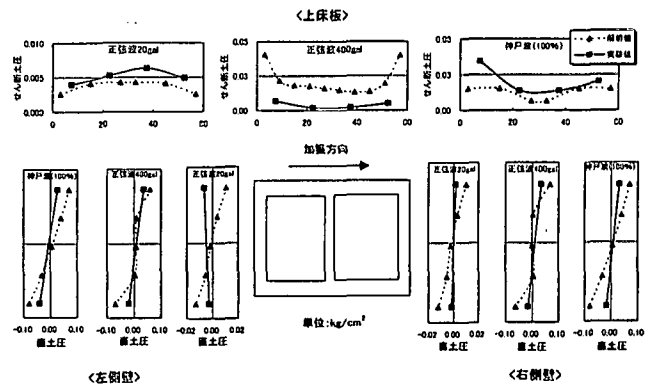


図-7 構造物に作用する地震時土圧分布

表-3 最大曲げひずみの比較

入力 波形	結合 条件	中柱 (μ)		側壁 (μ)	
		解析値	実験値	解析値	実験値
正弦波 20gal	剛結	52	204	16	39
	ヒンジ	9	39	16	36
正弦波 400gal	剛結	452	952	137	177
	ヒンジ	76	122	141	168
地震波 100%	剛結	606	963	179	194
	ヒンジ	103	141	189	179

4. まとめ

構造物の挙動に関して、

- (1) 構造物の挙動は、周辺地盤せん断ひずみ、特に、上載土のせん断土圧の影響を強く受ける
 - (2) 中柱に生じるひずみは、ヒンジの場合、剛結合の場合に比べてかなり小さい (1/5以下)
- 等、中柱の破壊原因が明らかとなった。

また、滑り・剥離現象と入力レベルの関係について、

- (1) 滑り・剥離現象にはジョイント要素のせん断剛性が大きく影響し、摩擦係数はほとんど影響しない
- (2) 入力加速度が100galを越えると滑り・剥離現象が生じる

等、被害原因の解明に有益な結果が得られた。

謝辞：最後に、本実験において振動台等の実験設備を提供して下さった日本国土開発(株)にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩楯・飯野・楠・佐藤・林・田中：地下鉄構造物の地震時挙動に関する模型実験と解析、第10回日本地震工学シンポジウム 1998, 11