

(86) トンネルを有する水中盛土の動的挙動

模型振動実験と数値解

〓 奥村組 竹内幹雄
 〓 奥村組 〇坂上 明
 東京湾横断道路〓 水谷善行
 埼玉大学 渡辺啓行

1. はじめに

近年、埋立地盤・人工島等のアクセスとして大口径シールド工法によるトンネルの建設が計画されることが多く、その先駆けとして、東京湾横断道路などでは人工島斜路部・一般部ともにシールド工法を採用し、より合理的・経済的に建設事業を進めようとしている。

本文は、このような水中盛土内にトンネル空間が設置された場合の地震時挙動に関する模型振動実験とその数値解析結果について報告するものである。

2. 実験方法

実験模型を図-1に示す。東京湾横断道路浮島取付部ジャケット式護岸に倣った1/50の模型である。

実験に使用した振動台は平面寸法4.0m×4.0m、最大積載重量60tである。水槽は接水構造物の地震時挙動を表現することが可能な図-2に示す3連水槽を使用した。ゴムジョイントで連結された3連水槽は中央部のみが加振される構造になっている。模型地盤は図-1で示したように6種の土質区分から構成されている。各々の使用材料を表-1に示す。

トンネル模型には硬質塩化ビニル管(厚さ16mm、外径317mm)を用い重量調整を行った。ジャケット模型はアルミ製の角パイプをボルト結合したものを用いた。

表-2に模型地盤の特性値を示す。

3. 実験結果の概要

実験は入力条件を変えて表-3に示すように実施した。ここでは、模型の基本的な振動特性を把握するために行った共振実験結果について概説する。

実験模型の共振振動数を含む1.0～50Hzの範囲の正弦波を入力することによって模型各部位の加速度共振曲線を求めた。入力加速度は30galに固定し、振動数は0.5Hzずつ増させた。

本実験模型はいくつかの構造区分から成

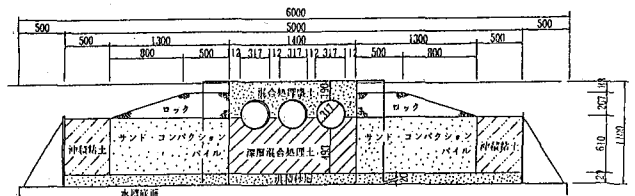


図-1 実験模型

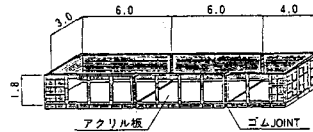


図-2 3連水槽

表-1 使用材料

土質区分	使用材料
沖積砂	山砂
サンド・コンパクション・パイル	
沖積粘土	粘土
混合処理土	山砂を用いた低強度セメント盛土
深層混合処理土	粘土を用いた低強度セメント盛土
ロック材	砕石

表-2 模型地盤の特性値

	実物	縮尺	原型値	実験値
小規模積重量 (tf/m ³)	沖積粘土	1.4	1.4	1.70
	深層混合処理土	2.0	2.0	1.47
	混合処理土	2.0	2.0	2.10
	サンド・コンパクション・パイル	1.8	1.8	1.93
	ロック材	2.0	2.0	1.95
せん断弾性係数 (tf/m ²)	沖積粘土	1000.	140.	8.5
	深層混合処理土	10000.	1400.	2000.
	混合処理土	10000.	1400.	3000.
	サンド・コンパクション・パイル	5000.	700.	709.
	ロック材	5000.～6000.	700.～800.	1200.

表-3 加振ケース

加振種類	加振周波数	目標最大加速度	備考
①正弦波加振	1.0～50.0Hz 0.5Hzビツ	30gal	最大値・位相収録
②正弦波加振 低レベル 破壊レベル	5.0～40.0Hz 5.0Hzビツ 20.0Hz	30gal 200, 400, 600, 800gal	時刻歴収録 30波入力 約30秒間入力
③不規則波加振 L1 L2	時間縮尺 1/18 時間縮尺 1/18	50, 273gal 50, 126gal	時刻歴収録

立している複合構成体であるため、振動特性は部位の違いによってかなり異なることを確認した。例えば、共振曲線と位相曲線を考慮することによりジャケットを含む盛土部地表面の共振振動数および加速度応答倍率はそれぞれ20Hz, 2.5倍であり(図-3(2)(3))、サンド・コンパクション・パイル層と沖積粘土層境界部上端の共振振動数と加速度応答倍率はそれぞれ10~11.5Hz, 4.5倍であることが読み取れる(図-3(4))。このように、模型実験によって複合構成体の振動特性が部位の違いによって異なるということが確認できた。

盛土中央部とジャケット部の振動特性はほぼ一致する。すなわち、両位置の加速度応答倍率と位相角は35Hzまでの振動数領域ではほぼ一致する(図-3(2)(3))。このことからジャケットと盛土部は一体として挙動しジャケット独自の振動は現れにくいと考えられた。

盛土部の共振時(入力振動数20Hz)に、トンネル模型に発生した曲げ歪分布を図-4に示す。これは、地盤の加速度が最大となる時刻におけるトンネル周方向の歪データに基づいて求めたものである。

中央トンネルでは水平から約45°傾いた軸を対称として変形しているのに対し、外側トンネルでは水平及び鉛直を対称軸とする変形を示した。このようにトンネルの変形形状はトンネルの設置位置によって異なっており、剛性の大きなジャケットの影響が現れているものと推測された。

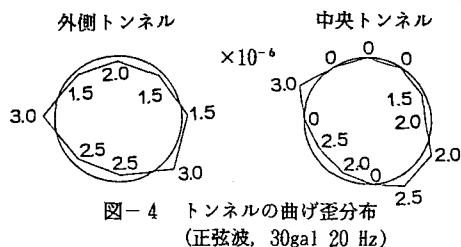


図-4 トンネルの曲げ歪分布
(正弦波, 30gal 20 Hz)

4. 解析条件

ここでは、以下に示す手順によって本供試体のような複合構成体の地震時挙動を数値解析で検証し、若干の考察を述べる。

- (i) 物性値の決定
 - (ii) 静的解析による初期応力の評価
 - (iii) 30gal 正弦波入力時の数値解析
 - (iv) 400gal 正弦波入力時の数値解析 (等価線形解析)
- (解析モデルに使用した物性値の検証)

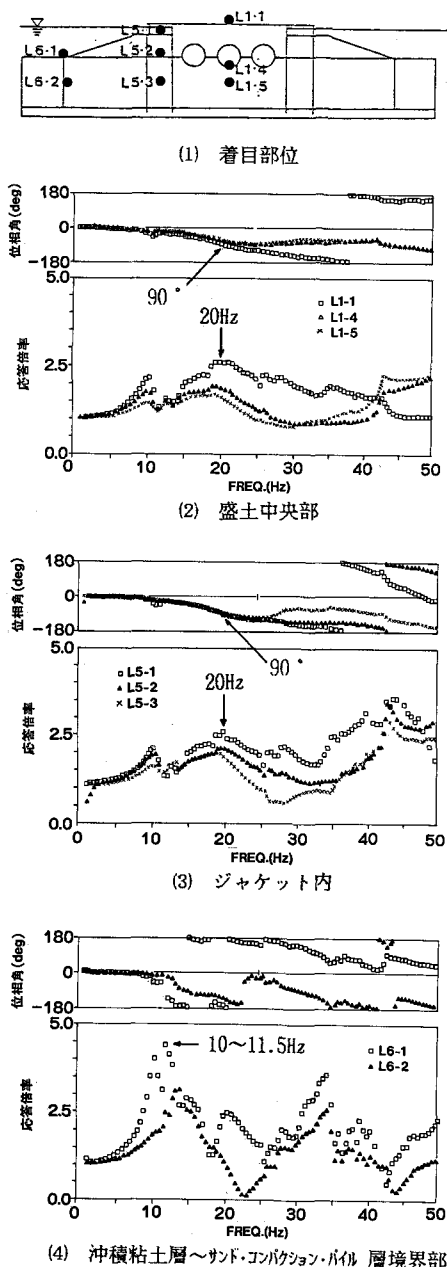


図-3 各部の加速度共振曲線
(正弦波, 30gal 入力時)

解析モデルは図-5に示すように2次元有限要素で離散化した。すなわち、ジャケット及びトンネルは梁要素で、6種から成る地盤部は全て平面ひずみ要素で離散化した。解析に用いる物性値は表-4のように決定した。すなわち、改良土（混合処理盛土、深層混合処理土）の動的物性値は動的変形試験結果に基づいて双曲線モデルで内挿した。ただし、初期せん断弾性係数の拘束圧依存性はないと仮定した。沖積粘土、洪積砂、ロック材の動的物性値は既往の研究成果を参考に決定した¹⁾²⁾。これらのうち沖積粘土、洪積砂は原位でのせん断波速度試験結果によって初期せん断弾性係数を検証した。洪積砂、沖積粘土およびロック材の初期せん断弾性係数は拘束圧依存性を考慮し、初期応力解析から求めた平均有効応力に基づいて要素毎に定義した。水が存在することによる影響は、浮力による模型材料の拘束圧の低下、つまり模型材料の初期せん断弾性係数の低下というかたちで間接的に評価した。

はり要素が介在するような数値モデルに対して自重解析を行う場合、はり要素周辺の応力状態は剛性の不均一性等の理由でみだれる。ここではGoodmanによるジョイント要素を梁要素と平面ひずみ要素の境界に導入し、初期応力を求めた。

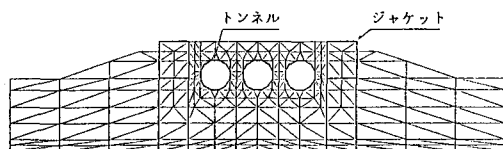


図-5 解析モデル

表-4 動的物性値

	$G \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	h	$W \text{ (g/cm}^3\text{)}$	ν
沖積粘土	$5.3(\sigma'_{vm})^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{1+r/3.0 \times 10^{-3}}$	$0.23 \times \frac{r}{3.0 \times 10^{-3} + r}$	1.70	0.49
深層混合処理土	$200 \times \frac{1}{1+r/1.2 \times 10^{-3}}$	$0.22 \times \frac{r}{1.2 \times 10^{-3} + r} + 0.03$	1.47	0.49
混合処理盛土	$300 \times \frac{1}{1+r/4.5 \times 10^{-4}}$	$0.14 \times \frac{r}{4.5 \times 10^{-4} + r} + 0.05$	2.10	0.49
サンド・コンパクション・パイル 洪積砂	$700 \frac{(2.17-\sigma)^{\frac{1}{2}}}{1+e} (\sigma m) \cdot \frac{1}{1+r/2.5 \times 10^{-6}}$	$0.39 \times \frac{r}{2.5 \times 10^{-6} + r}$	1.93	0.49
ロック材	$564 \frac{(2.17-\sigma)^{\frac{1}{2}}}{1+e} (\sigma m) \cdot \frac{1}{1+r/5.0 \times 10^{-4}}$	$0.23 \times \frac{r}{5.0 \times 10^{-4} + r}$	1.95	0.49

5. 解析結果と考察

i) 30gal 正弦波入力時の数値解析

地盤材料の非線形性を考慮しない場合、解析モデルの固有振動数は約22Hz、加速度応答倍率は約24倍であった（図-6参照）。模型地盤の拘束圧は0.05~0.1kgf/cm²と極めて小さいため発生ひずみが小さい段階から非線形性が表れることが推測された。そこで、地盤材料の非線形性を等価線形化法で評価した解析を行った結果、固有振動数は約19Hz、加速度応答倍率は約5倍という結果を得た。この時の盛土中央における加速度応答倍率の深度分布は実験結果と同様に1次モードを呈し（図-7参照）、解析値は実験値に近づく傾向にあることを確認した。このように、模型振動実験のような低拘束圧下の砂地盤の挙動は、入力加速度レベルが小さくても、材料の非線形性が無視できない場合があることがわかった。なお、模型地盤は水の介在により振動エネルギーが消費されやすい状態にあると推測され、このため実験値は解析値の半分程度の応答値を

固有振動数（1次） 22.3 [Hz]

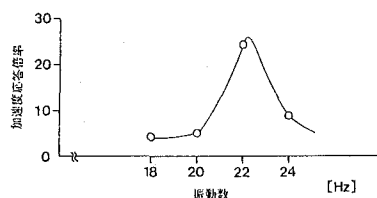


図-6 共振曲線（加速度）

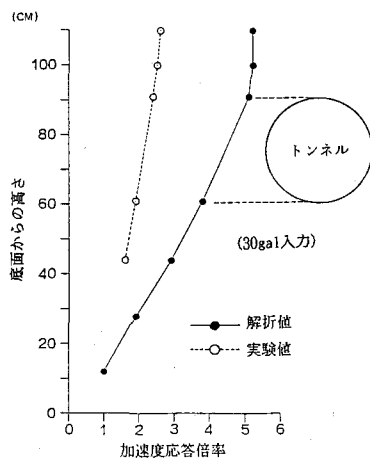


図-7 加速度応答倍率の深度分布

示している。粒状体から構成される地盤に水が介在した場合のエネルギー吸収機構とその程度を把握することは重要であり、今後の課題である。

ii) 400gal正弦波入力時の数値解析

破壊実験時、サンド・コンパクション・パイル層に過剰間隙水圧が発生した。ここでは、過剰間隙水圧の上昇による材料の劣化現象を初期せん断弾性係数の有効拘束圧依存性で表現した。すなわち、実験結果に基づいて間隙水圧比を全要素一様に0.9とみなし初期平均有効応力の10%に対応する初期せん断弾性係数を用いた。地盤材料の非線形性は等価線形化法によって評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

①図-8に示す加速度応答倍率の深度分布より、400gal入力時においても実験値の加速度応答をおおむねシミュレートすることが出来る。②入力加速度がゼロクロスする時刻から次に最大値をとる時刻までの4断面(時間断面①~④)の加速度応答分布の経時変化(図-9参照)より、盛土部の挙動とサンド・コンパクション・パイル層の挙動が異なること、ジャケットは周辺の地盤の挙動に追従すること等、実験結果の定性的な傾向に一致することが読み取れる。③トンネルに発生するモーメント分布(図-10参照)より、トンネルの設置位置の違いによって分布形状が異なることがわかる。すなわち、中央トンネルでは鉛直軸より約45度傾斜した軸を長軸とした楕円形の分布であり、外側トンネルでは水平軸を長軸とした楕円形の分布であることがわかる。この特性は実験結果に一致する。

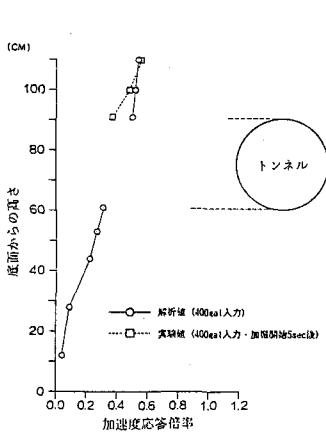


図-8 加速度応答倍率の深度分布

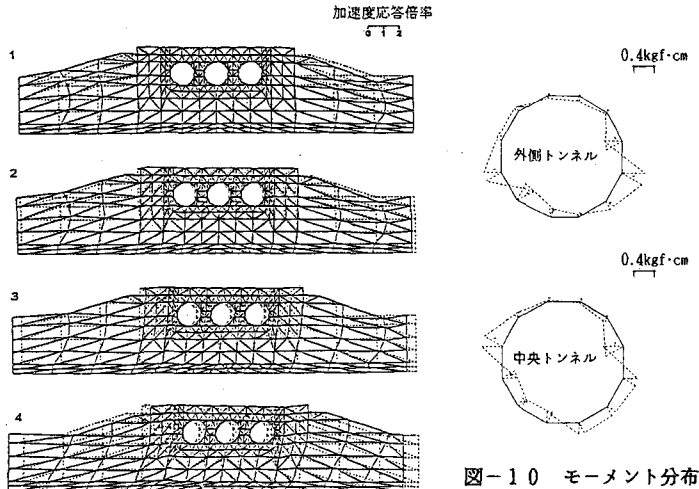


図-10 モーメント分布

6. おわりに

ジャケット式護岸を有する水中盛土内にトンネル空間が設置された場合の地震時挙動を把握する目的で大型振動実験とその数値解析を行った。

実験より、人工島の盛土とジャケットはほぼ同位相で振動しジャケットは周辺地盤の挙動に追従し独自の振動をしにくいこと、中央トンネルと外側トンネルでは地震時挙動が異なること等がわかった。一方、本供試体のような複合構造物に於いても地盤の低圧下の材料の非線形性を等価線形化法で評価した数値解析によって実験結果の加速度応答をおおむねシミュレートすることができた。今後この種の模型振動実験の研究に際して一資料になれば幸いである。

実験に際しては、プロジェクトに参加して頂いた奥村組筑波研究所の方々をはじめ関係各位に多大な御協力を頂いた。厚く謝意を表したい。なお、実験、解析にあたり種々の御指導を頂いた東海大学久保慶三郎教授に深甚な謝意を表します。

参考文献 1) 田中・西 他：護岸基礎捨石マウンドの沈下予測(その2) 電中研研究報告

2) 石田・渡辺 他：低拘束圧下の静的・動的特性 電力中央研究所総合報告(380045)