

(85) 地盤剛性急変部におけるトンネルの模型振動実験

東京湾横断道路(株) 元山 宏
 “ 三木 克彦
 セントラルコンサルタント(株) 立石 俊一
 (株)奥村組 ○ 竹内 幹雄

1. はじめに

東京湾横断道路・シールドトンネルは、浮島取付斜路部末端で改良された比較的剛な地盤から軟弱な在来地盤へ移行する。

このようなトンネル軸方向に地盤の剛性が大きく変化する場所では、地震時にそれぞれの地盤の応答変位に違いが生じるためトンネルには大きなひずみが発生することが指摘されており、震害例の報告も多い。

本報告では、地盤剛性急変部における大断面トンネルの地震時挙動を把握する目的で行った3次元模型振動実験の結果について述べる。

2. 実験概要

実験は図-1に示す4ケース行った。東京湾横断道路・浮島取付斜路部末端の1/50の模型である。

- ① 予備実験 …… 洪積層と沖積層の2層地盤（実験手法の妥当性を確認）
- ② モデル1 …… 沖積層の一部が改良された地盤（剛性急変部の地盤の振動特性を確認）
- ③ モデル2 …… 地盤剛性急変部をトンネルが通過する場合（トンネルの挙動を確認）
- ④ モデル3 …… 地盤剛性急変部のトンネルの剛性を低下させた場合（トンネルの挙動を確認）

なお、工学上の基準面をTP-80mとし、地盤はトンネル下端より上を沖積粘土、下を洪積粘土とした。

相似則りは、現象を支配する方程式が実物と模型の2つの系において満足されるようにして決定した。その際に、実物と模型の間で重力場、加速度、単位体積重量は同一とし、地盤の応力～ひずみ関係は、双曲線モデルに従うものと仮定した。使用した相似比を表-1に示す。

模型地盤は、粉末粘土と水からなるスラリーにセメントを添加し、その配合および養生日数によってせん断剛性を調整した。模型地盤のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線を図-2に示す。

作製した地盤の特性を調べるために小型の土槽を用いてせん断波速度を測定し、地盤のせん断剛性を求めた。実験に用いた模型の特性を表-2に示す。

トンネル模型は、塩化ビニル管を用い、みかけの比重が1.0になるよう重量調整を行った。地盤とトンネルの付着を良くするためにトンネルの表面に砂を接着させた。

土槽の内側には、近似的に模型地盤が半無限地盤の挙動を表現できるようにウレタンフォームを設置した。ウレタンフォームの厚さと硬さは、事前にこれらをパラメータとする数値計算により決定した。

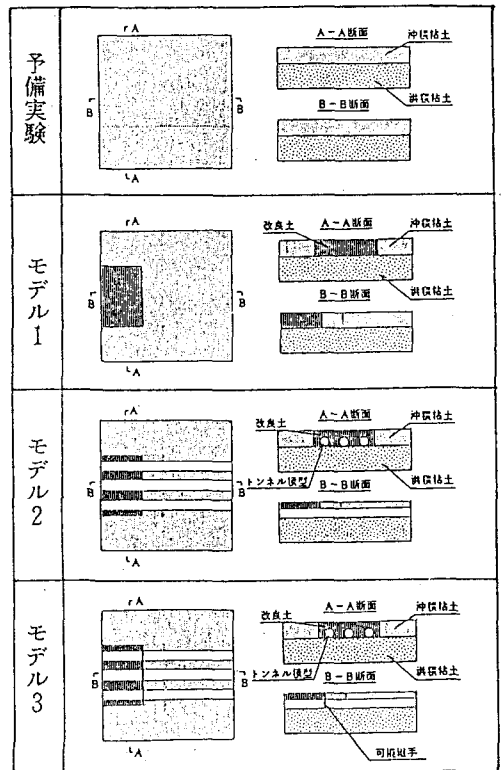


図-1 実験ケース

加振ケースは、基本的な振動特性を把握するため正弦波を 0.5Hzピッチで入力する共振実験、共振振動数における正弦波加振（30,100,200,300gal）および設計用地震波加振（L1波、L2波）である。

計測は地盤については加速度、トンネルはひずみを主として行った。

表-2 模型地盤の特性

		理想模型	実験模型				
			予備	モデル1	モデル2	モデル3	
地盤	沖積粘土	$r, gf/cm$	1.45	1.41	1.40	1.41	1.42
		$G, kgf/cm$	29	32	20	36	44
	洪積粘土	$r, gf/cm$	1.76	1.44	1.43	1.42	1.42
		$G, kgf/cm$	108	162	224	123	107
DMM	$r, gf/cm$	1.45	—	1.47	1.48	1.48	
	$G, kgf/cm$	520	—	290	1,060	1,005	
トンネル	$r, gf/cm$	1.0	—	—	—	1.00	
	E1 $kgf-m^2$	$4.0 \times 10^*$	—	—	—	$3.4 (1.4) \times 10^*$	
	E A kgf	$4.2 \times 10^*$	—	—	—	$4.9 (2.8) \times 10^*$	

() はモデル3の地盤剛性総変位のトンネルの剛性

3. 実験結果

① 予備実験（洪積層と沖積層の2層地盤）

地表面の共振曲線を図-3に示す。地盤は18Hzで共振点をもつ。地表面各測点の加速度は、地盤の固有1次振動数である18Hz含む24Hz程度までは側壁からの距離にかかわらずほぼ一致している。

共振点・正弦波加振時（18Hz, 30gal）の地盤の変位分布を図-4に示す。地盤の深さ方向の応答変位はどの断面においてもほぼ等しく、側壁にウレタンフォームを設置した土槽内の模型地盤は、半無限地盤の挙動を近似的に表現していると考えられた。

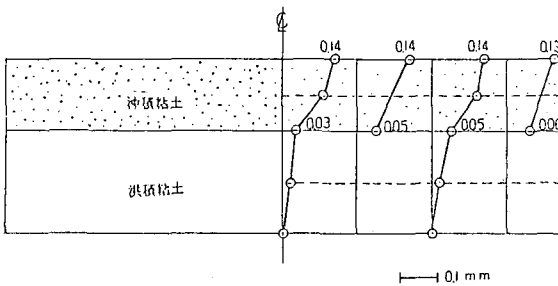


図-4 地盤変位分布

表-1 相似比

量	記号	相似比
長さ	L	$1/\lambda$
比重	ρ	1
剛性	G	$1/\lambda^{1/2}$
周波数	f	$\lambda^{3/4}$
加速度	α	1
変位	δ	$1/\lambda^{3/2}$
ひずみ	ϵ	$1/\lambda^{1/2}$
応力	σ	$1/\lambda$

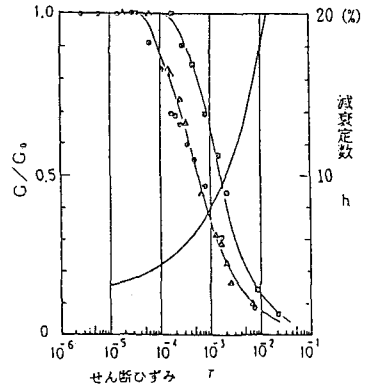


図-2 模型地盤のひずみ依存曲線

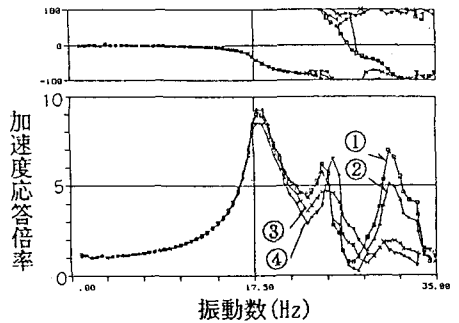
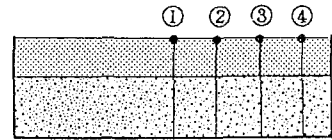


図-3 地表面の共振曲線

② 本実験

a) 地盤の挙動

モデル1～3の軸方向加振時の地表面各測点の共振曲線を図-5～7に示す。卓越1次振動数は18Hzで、予備実験およびモデル1～3を通じてほぼ同じである。剛性の大きな改良土や近接する3本の大断面トンネルが存在しても卓越1次振動数は大きく変化しない。このことから、地盤剛性急変部の地盤の振動特性は、大部分を占める未改良部の振動特性が卓越すると考えられる。

共振点における加速度応答倍率は、モデル1では改良部ではほぼ等しく、未改良部では改良部から離れるにつれて大きくなっている。これより未改良部では、地盤剛性急変部に近いほど改良地盤の影響を受けて、応答がおさえられていることがわかる。

モデル2の加速度応答倍率は、改良部と未改良部で差がなくなっている。これは比較的剛性の大きなトンネルが改良部と未改良部の両地盤を拘束したため応答が均一化されたと考えられる。

モデル3の加速度応答倍率は未改良部では改良部から離れるにつれて大きくなっている。この傾向はモデル1ほど顕著ではない。これは剛性急変部のトンネルの剛性を小さくしたため未改良部と改良部の両地盤の拘束力が弱まりそれぞれの地盤の振動特性が発揮されやすくなった結果と考えられる。

モデル1における共振点、正弦波加振時(18Hz, 30gal)の地表面の変位分布を図-8に示す。地盤のひずみは、剛性急変部に軟弱な未改良部側で大きくなっている。

また、改良部と未改良部の地盤の相対変位は、トンネル軸直角方向加振時の方が隣接する地盤の影響が少なく、それぞれの振動特性が発揮されやすいと考えられる。

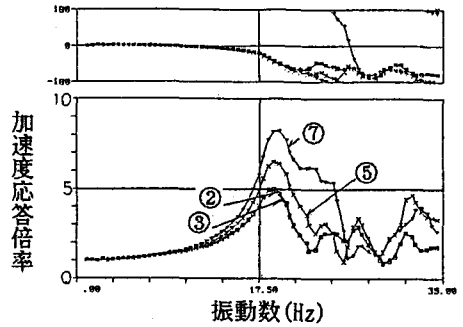
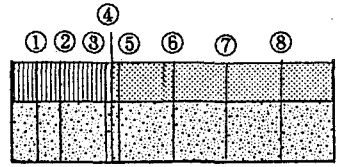


図-5 地表面の共振曲線(軸方向、モデル1)

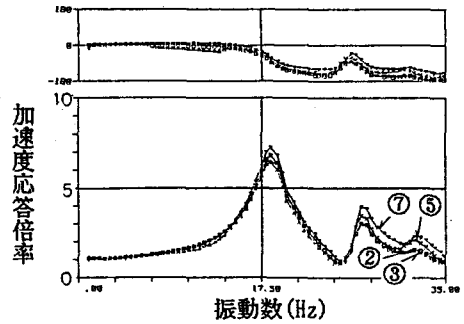
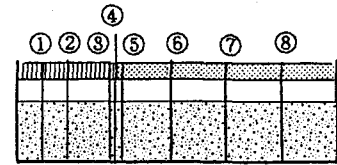


図-6 地表面の共振曲線(軸方向、モデル2)

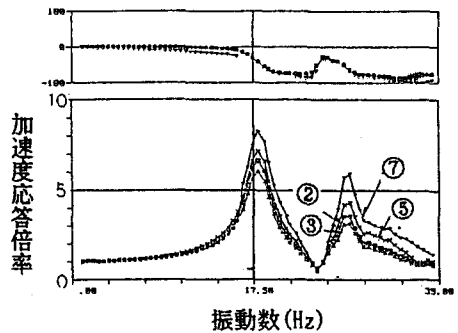


図-7 地表面の共振曲線(軸方向、モデル3)

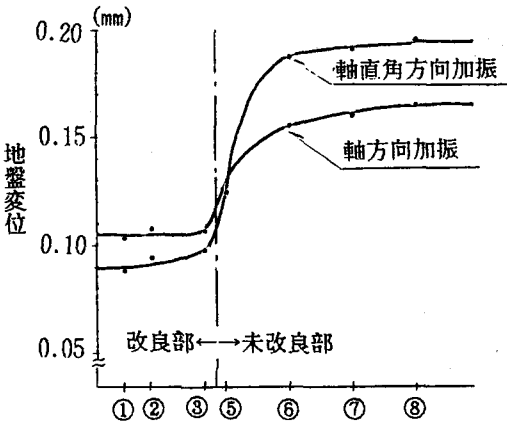


図-8 地表面の変位分布(モデル1)

b) トンネルの挙動

トンネル軸方向加振時での中央トンネル上端、各計測点における軸方向のひずみの周波数応答を図-9に示す。トンネルに発生するひずみは、地盤の卓越1次振動数である18Hzでピークを持ち、剛性変化点(図中④)では大きな値を示している。

トンネル軸方向、共振点、正弦波加振時(モデル3、18Hz, 100gal)の同一時刻におけるトンネルの軸ひずみを図-10に示す。トンネルに発生する軸ひずみは、剛性変化点で最大値を示し、未改良部で広範囲にひずみが分布している。

トンネル軸直角方向、共振点、正弦波加振時(モデル2、18Hz, 30gal)の同一時刻におけるトンネルの曲げひずみを図-11に、設計用地震波(L1波、モデル2)加振時におけるトンネルの曲げひずみを図-12に示す。トンネルに発生する曲げひずみは、剛性変化点で最大値を示している。正弦波加振時と地震波加振時のトンネルに発生した曲げひずみは同様な分布を示している。

モデル2およびモデル3のトンネル軸直角方向、設計用地震波(L2波)加振時における曲げモーメントの分布を図-13に示す。これは、剛性変化点の断面力が最大となる時刻での分布である。地盤剛性急変部のトンネルの剛性を低下させることにより、曲げモーメントは低減されることがわかる。

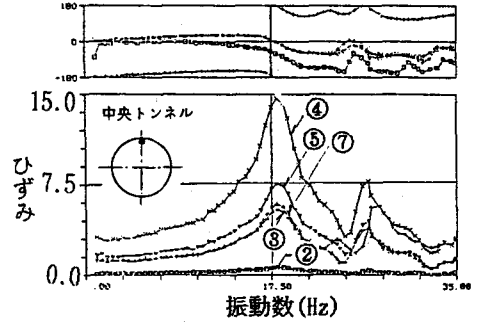


図-9 トンネルのひずみ応答(軸方向、モデル2)

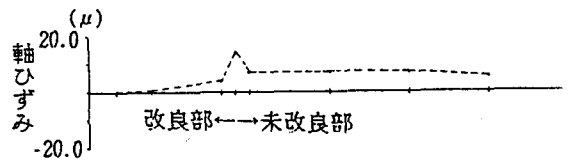


図-10 トンネルの軸ひずみ分布(モデル3、正弦波)

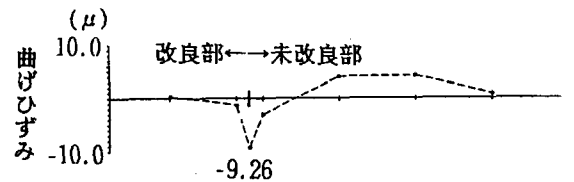


図-11 トンネルの曲げひずみ分布(モデル2、正弦波)

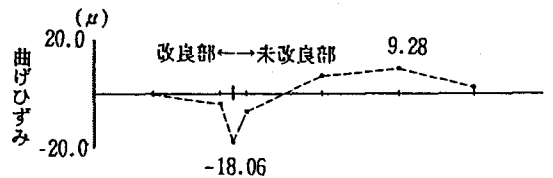


図-12 トンネルの曲げひずみ分布(モデル2、L1波)

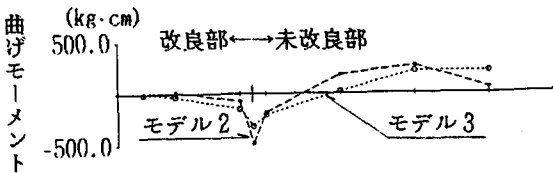


図-13 トンネルの曲げモーメント分布(L2波)

4. あとがき

本実験を通じて、地盤剛性急変部における地盤の挙動は、未改良部の地盤の振動特性が卓越することが明らかになった。また、地盤剛性急変部を通過するシールドトンネルは、地盤のひずみが集中する剛性変化点で最大ひずみが発生し、剛性変化点の発生断面力は、この部分のトンネルの剛性を小さくすることによって低減できることが確認された。

なお、本実験にあたり、種々御指導を頂いた東海大学久保慶三郎教授に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井合「1G場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について」 第19回 地震工学研究発表会 国生「土の動的変形特性と地盤の非線形振動応答」 電中研総合報告No.301(1982)
- 香川「土構造物の模型振動実験における相似則」 土木学会論文報告集第275号