

(123) 沈埋トンネルの地震応答解析に用いる地盤バネに関する実験および解析

首都高速道路公団 正会員 高津 和 義
 同上 正会員 山田 淳
 大成建設株式会社 正会員 志波 由紀夫
 ○ 同上 正会員 伊藤 文雄

1. はじめに

沈埋トンネルの耐震設計では応答変位法及び動的応答解析が用いられるが、そのモデル化において沈埋函と周辺地盤の相互作用を表すバネ定数を設定する必要がある。このバネ定数が解析結果に及ぼす影響は大きく、重要なファクターであるが、その評価手法は各種規準間で統一されていないのが現状である。

本文は、この沈埋トンネル～地盤間バネ定数の評価手法を確立するための資料とすべく実施した屋外模型実験結果及び解析結果について報告するものである。ただし、ここでいうバネは、沈埋トンネルの耐震設計上支配要因となるトンネル軸方向のバネ（せん断バネ）を指す。

2. 実験の概要

実験の概要図を図-1に示す。本実験では、地中に埋設された試験体に直接水平荷重を加え、この時の荷力と試験体の変位を計測することにより、試験体～地盤間のバネ定数を求めた。図-1に示すように、沈埋函を模したRC製の試験体（タイプ1; 1.035×0.25×3.2m、タイプ2; タイプの1/2の長さ）を均質な盛土中に埋設し、試験体に剛結した加振ロッドにより水平荷重を加えた。試験体の長さを2種類としたのは、長さの影響を把握するためである。

加力装置は大型起振機と油圧ジャッキであり、前者で動的載荷、後者で静的載荷を行い、それぞれ動的バネ定数、静的バネ定数を求めた。周辺地盤との摩擦をなくし加力装置からの水平荷重を直接試験体に伝えるため、加振ロッドの盛土中に埋設される部分はシース内に配置し、起振機～ベース間はローラー支持とした。また、試験体～地盤間のバネが全てせん断バネとなるよう、鋼板製のプロテクターおよびスポンジを用い

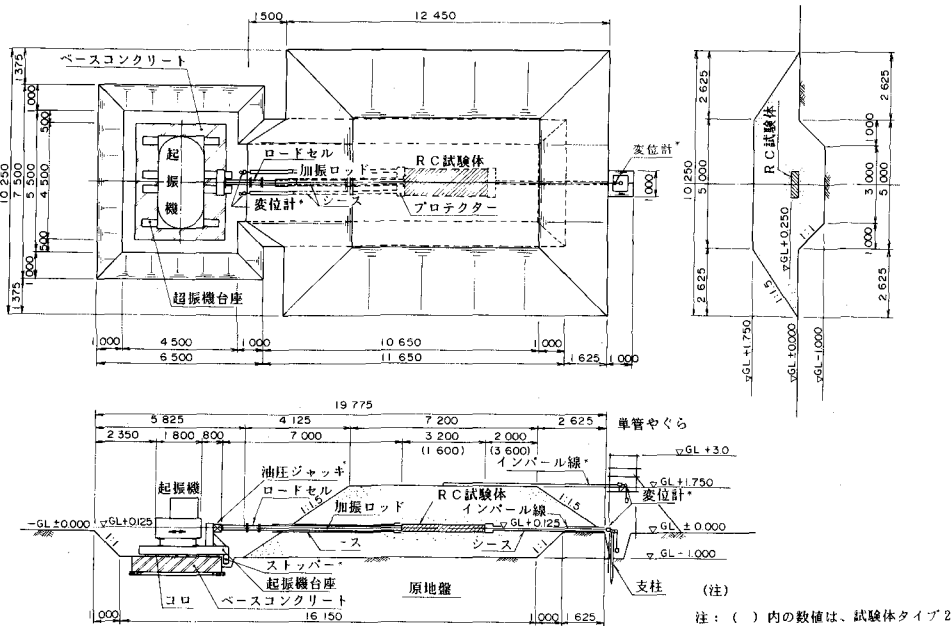


図-1 実験概要図

注：() 内の数値は、試験体タイプ2の場合を示す。

※印は、静的載荷実験時に使用。

試験体両端部では盛土とは接触しない構造とした。

試験体の動的変位は、試験体に埋込んだ小型加速度計による加速度記録をシグナルアナライザーを用いて2回積分して求め、静的変位は、試験体に取り付けたインバール線を盛土外へ引き出し、インバール線の移動量を高感度変位計により計測した。

盛土材料には山砂を用い、自然含水量のまま盛立てた。砂の敷均し、転圧および整形は7層に分けて行い、各層の転圧には50kg級の振動コンパクトを用いた。盛土完成後は、含水量の大きな変化を防ぐために、全面をビニルシートで覆った。盛土材料および在来地盤の特性については、各種土質試験により把握した。表-1に盛土の土質定数を示す。ここで盛土のせん断弾性係数は、S波検層より決定したものである。在来地盤については、明確な支持層の現われるGL-35mまでをボーリング調査し、PS検層を実施した。その結果を図-2に示す。

動的載荷試験は、試験体、加振力、加振周波数を変化させ、合計27ケースを行った。また、静的載荷試験は両試験体ともに、最大荷重2t、4t、滑動までの3サイクル載荷とした。実験手順としては、動的載荷試験を実施した後、静的載荷試験を実施した。

3. 実験結果

動的載荷試験で得られた代表的な試験体加速度波形と変位波形(積分結果)を図-3に示す。加振力の振幅と試験体変位の振幅との関係より、試験体~地盤間の動的バネ定数が算出される。図-4に、試験体変位とバネ定数との関係を、後述する解析値と共に示す。ここでバネ定数としては、

$$K = (\text{加振力}) / (\text{試験体変位})$$

$$k = K / (\text{地盤との接触面積})$$

としている。本実験より得られた動的バネ定数は、概ね1~5 kgf/cm²であり、試験体の変位、加振力、および加振周波数によって異なる。加振力を一定とした場合には、加振周波数が低いほど動的バネ定数が大きい。試験体の変位を一定とした場合にもこの傾向が見られる。これは、試験体~地盤の振動系の動的応答特性が影響したものと考えられる。加振周波数を一定とした場合には、試験体変位が大きくなるほど、また加振力が大きくなるほど、動的バネ定数は小さくなる。これは、試験体周囲の土のひずみが増加するに伴い、土の剛性が低下するためであると考えられる。試験体タイプ1とタイプ2とは、加振力が小さく、かつ加振周波数が低い場合を除いて、地盤との接触面積が小さいタイプ2の方が動的バネ定数がやや大きい結果となった。

表-1 盛土の土質定数

土質定数		タイプ1盛土	タイプ2盛土
日本統一土質分類		S-M(シルト混じり砂)	
土粒子の比重 G _s		2.701	
均等係数 U _c		3.14	
粘着力 C(t _f /m ²)		0.0	
内部摩擦角 φ(度)		34.6	
平均湿潤密度 ρ _t (t/m ³)		1.695	1.698
平均乾燥密度 ρ _d (t/m ³)		1.485	1.510
平均含水比 ω(%)		14.2	12.5
*せん断	GL+1.75m	1940	2210
弾性係数	GL+1.00m ~GL+0.00m	2700	2970
	G(t _f /m ²)	4880	4160
	GL+0.00m ~GL-1.00m		

* S波検層による値

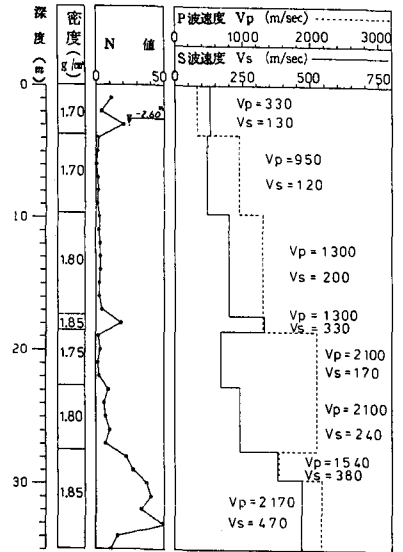


図-2 在来地盤のPS検層結果

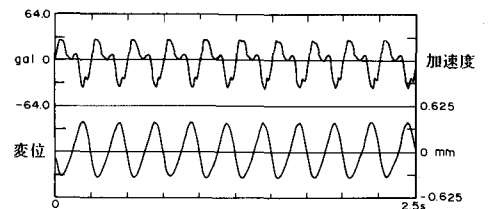


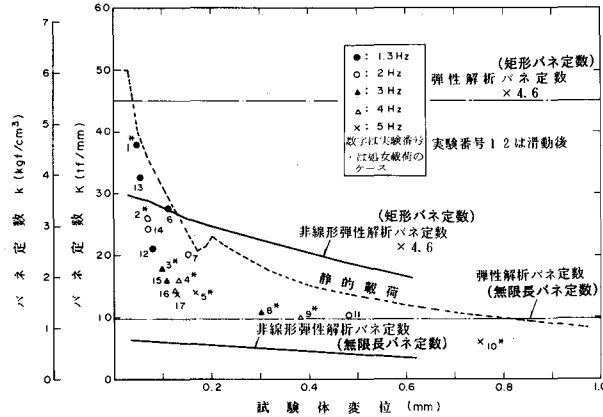
図-3 試験体の加速度波形および積分結果
(タイプ1 : 3.8tf、4Hz加振)

次に、静的載荷試験結果を示す。静的な載荷パターンは、各載荷段階での荷重保持時間を、処女載荷時5分間、除荷時2分間、再載荷時2分間とした。載荷力が目標値に達した直後の計測値のみを用いて試験体変位の載荷履歴を描くと、図-5のようになる。試験体～地盤間の滑動時の試験体変位は、タイプ1、タイプ2とも約1mmであり、滑動時の載荷力は、タイプ1で8.1tf ($\tau=0.98\text{tf/m}^2$)、タイプ2では4.5tf \sim 5.0tf ($\tau=1.09\sim 1.22\text{tf/m}^2$)であった。ただし、 τ は滑動時の載荷力を接触面積で除した平均せん断応力である。これらの図より試験体～地盤間の静的バネ定数を求めた結果を、図-4に示す。バネ定数kとしては、タイプ1よりもタイプ2の方がやや大きい。また、本実験で対象とした地盤条件および加振周波数の範囲内では、動的バネ定数は静的バネ定数よりも小さく、加振周波数が低いほど静的バネ定数に近づく傾向を示している。

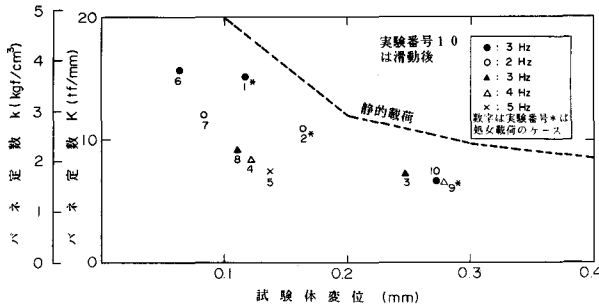
4. 実験の数値シミュレーション

一般に、沈埋トンネルの耐震設計時には、トンネル軸方向のバネ定数を算定する手法として、三次元有限要素解析が用いられている。そこで、現行設計手法で用いられる解析手法の妥当性を検討するため、本実験の数値シミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行った。本解析で用いた解析モデルは、図-2に示した在来地盤のPS検層結果よりGL-29.7mを基盤とし、節点変位の自由度を単荷重載荷方向のみとした、奥行き単位幅の三次元有限要素モデルである。図-6に解析モデルの一部を示す。

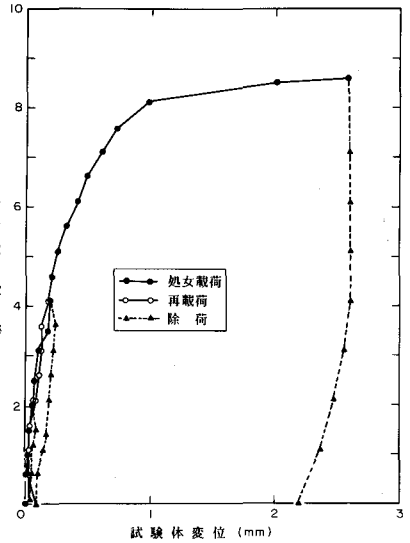
ここで、実験は奥行きが有限な矩形板載荷の状態であるのに対し、



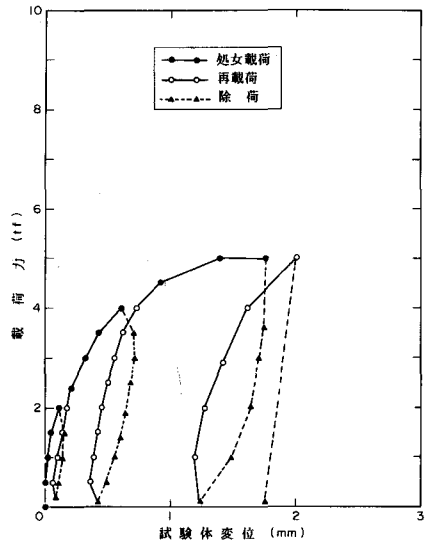
(a) 試験体タイプ1 (実験値と解析値との比較)



(b) 試験体タイプ2



(a) 試験体タイプ1



(b) 試験体タイプ2

図-4 動的バネ定数 (プロット) 及び静的バネ定数 (破線)

図-5 静的載荷試験結果 (載荷履歴)

解析は奥行きが無限の載荷状態をモデル化したものである。また解析モデルの精度は、解析領域のとり方、要素分割数にも影響される。従って、①有限長載荷と無限長載荷の差異、②解析領域の差異、の二つの換算値を考慮することにより、解析バネ定数と実験バネ定数との比較が可能となる。①及び②について定量的評価を行った結果、無限長載荷状態のバネ定数（解析値）は、有限長載荷状態のバネ定数（実験値）に対し、タイプ1では約1/4.6、タイプ2では約1/6.2に評価されることがわかった。

次に、実験条件と同一の形状・寸法及び表-1の盛土物性を用いた解析モデルを作製し、弾性解析及び非線形弾性解析によって実験の数値シミュレーションを行った。ここで非線形弾性解析は、盛土材の動的三軸試験より得られたせん断歪～せん断弾性係数の関係を考慮したものである。弾性解析によって得られた変位分布のコンターの一部を図-6に示す。

得られた試験体変位と平均せん断応力との関係を静的載荷試験の結果と比較して、図-7, 8に示す。前述の換算値を考慮すると、弾性解析結果においては変位の小さい弾性範囲内ではほぼ一致する傾向を示し、非線形弾性解析結果においては、弾性解析結果に比べてやや広い範囲ではほぼ一致する傾向を示している。また、解析バネ定数と実験バネ定数をタイプ1について比較したのが図-4である。弾性解析結果、非線形弾性解析結果ともに、実験結果（静的バネ定数）と概ね対応した傾向を示している。

以上から、三次元有限要素モデルを用いたバネ定数の算定手法は、妥当な手法であると言える。

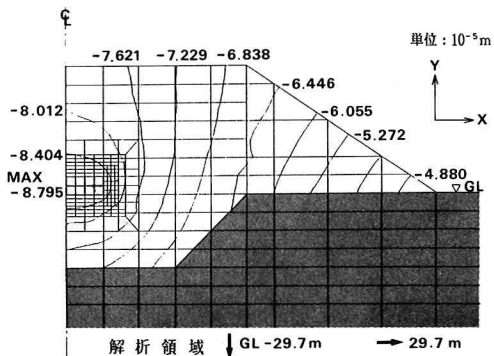


図-6 変位コンター図（盛土部）
（載荷荷重 $\tau = 0.10 \text{tf/m}^2$ 時）

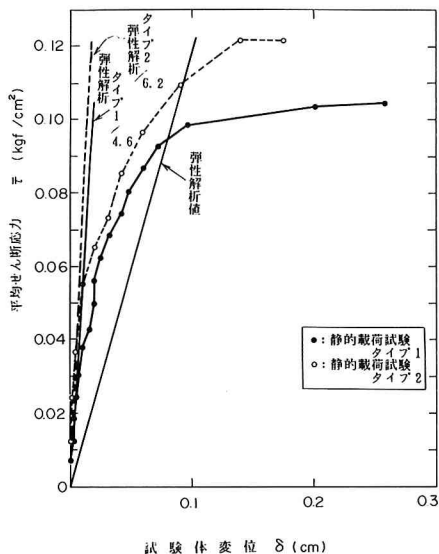


図-7 実験と解析との比較（弾性解析結果）

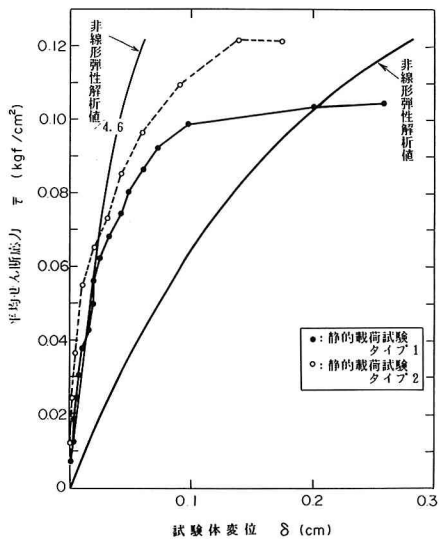


図-8 実験と解析との比較（非線形弾性解析結果）

謝 辞

本実験に際しては、東海大学の浜田教授、建設省土木研究所耐震研究室の川島室長等に御指導をいただき、実施に当っては、大成・前田・間組・飛島・五洋・佐藤共同企業体川崎航路トンネル作業所の関係各位に御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。