

話題その1

「トンネルの地震応答解析に用いる地盤ばね」について — 過去の研究事例を掘り起こす —

文献講読

高津和義, 山田淳, 志波由紀夫, 伊藤文雄 著

「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」

土木学会 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.489~492 (1987年7月)

土木学会 第19回地震工学研究発表会 講演概要, pp. 489 - 492, 1987年7月

(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
岡上 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

はじめに

沈埋トンネルの耐震設計では地盤応答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と周辺地盤の相互作用を表すパネ定数を設定する必要がある。このパ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、その評価手法は標準準則で統一されないので現状である。

本文では、この沈埋トンネルへ地盤間パ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、ここでいうパネは、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、この時の載荷力と試験体の変位を測ることにより、試験体～地盤間のパネ定数を求めた。図-1に示すように、沈埋法を模したRC製の試験体（タイプ1: 1.033 × 0.25 × 3.2m、タイプ2: タイプ1の1/2の長さ）を均質な土盤中に埋設し、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器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、それぞれ動的パネ定数、静的パネ定数を求めた。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、加振ロッドの土盤中に埋設される部分はシート内に配置し、起振機～ベース間はローラー支持とした。また、試験体～地盤間のバネがせん断バネとなるよう、鋼板製のプロテクターおよびスプリングを用いて

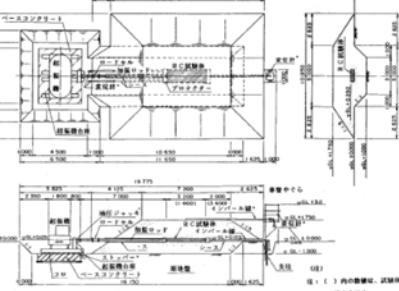


図-1 実験装置図

試験体両端部では土盤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パルス録を土盤外へ引き出し、インパルス録の移動量を高精度度計により計測した。

土盤材料には山砂を用い、自然含水率のまま整立てた。砂の粒度、粒径および整立ては7層に分けてを行い、各層の粒径には30粒の動振コンパクトを用いた。荷重実施後は、含水率の大きな変化を防ぐために、常にビニル袋で覆った。土盤材料および在来地盤の特にについては、各種土盤試験により把握した。表-1に土盤の土質定数を示す。ここで土盤のせん断弹性係数は、S波速度より算出したものである。在来地盤については、弱材と支持層の交わる位置GL-35mまでをボーリング調査し、P-S換算を実施した。その結果を図-2に示す。

動的実験は、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、静的載荷結果は両試験体とともに、最大荷重21t、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

動的実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。加振力の変幅と試験体変位の振幅との関係より、試験体～地盤間の動的パネ定数が算出される。図-4に、試験体変位とパネ定数の関係を、後述する解析結果と共に示す。ここでパネ定数としては、

$$K = (加振力) / (試験体変位)$$

$$K = K / (地盤の接触面積)$$

としている。本実験より得られた動的パネ定数は、概ね $1 \sim 5 \text{ kN/cm}$ である。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パネ定数が大きい。試験体の変位を一定とした場合には、この傾向が見られる。これは、試験体～地盤の接觸面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、動的パ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では、加振力が小さく、かつ加振周波数が低い場合を除いて、地盤との接觸面積が小さいタイプ2の方が動的パネ定数がやや大きい結果となった。

図-2 在来地盤のP-S換算結果

表-1 土盤の土質定数

土質定数	タイプ1土盤	タイプ2土盤
日本統一土質分類	S-3M(シルト混じ土砂)	
土粒子の充填率 Gs	2.7±0.1	
均一性指数 Uc	3.1±0.4	
粘着力 C1(kN/m)	0.0	
内摩擦角 φ (°)	3.4±0.5	
せん断弹性係数 G1(kN/m²)	1.6±0.5	1.6±0.6
せん断弹性係数 G2(kN/m²)	1.4±0.5	1.5±1.0
せん断応力 σ1 (kN/m²)	1.4±2	1.2±3
せん断応力 σ2 (kN/m²)	1.9±0.0	2.2±0.0
せん断応力 σ3 (kN/m²)	2.7±0.0	2.9±0.0
せん断応力 σ4 (kN/m²)	4.8±0.0	4.8±0.0

*P-S換算結果による値

図-3 試験体の加速度波形および積分結果

次に、静的載荷試験結果を示す。静的の載荷パターンは、各載荷段階での荷重保持時間を、地盤載荷5分間、荷重持続2分間、荷重降下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実験の載荷履歴を描くと、図-5のようになる。試験体～地盤間の動的パネの試験体実験は、タイプ1、タイプ2とも約1#*であり、滑動時の載荷力は、タイプ1では $1.4t$ ($\tau = 0.98 \text{ t/m}^2$)、タイプ2では $0.5t$ ($\tau = 1.09 \sim 1.22 \text{ t/m}^2$) であった。ただし、これは滑動時の載荷力を接觸面積で除した平均せん断抵抗力である。これにより試験体～地盤間の静的パネ定数を求める試験を、図-4に示す。パネ定数としては、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、動的パネ定数は静的パネ定数よりも小さく、加振周波数が低いほど静的パネ定数に近づく傾向を示している。

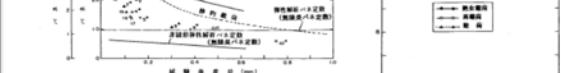
4. 実験の数値シミュレーション

一般に、沈埋トンネルの耐震設計時には、トンネル軸方向のパネ定数を算定する手法として、三元素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P-S換算結果より GL-29.7m で基盤とし、節点示位の自由度を基盤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に解析モデルの一観を示す。

ここで、実験は実行可能な複数種地盤の状態であるに對し、



(a) 試験体タイプ1 (実験と解析との比較)



(b) 試験体タイプ2 (実験と解析との比較)

図-4 動的パネ定数 (プロット) 及び静的パネ定数 (載荷)

解析は実行が無理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、の二つの検討を行った結果、無限長載荷のパネ定数は、有限長載荷のパネ定数 (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と評価された。また、静的載荷のパネ定数 (解説) に対し、静的載荷のパネ定数 (解析) は、有限長載荷のパネ定数 (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と評価された。

次に、実験条件と同一の形状、寸法及び地盤物性を用いた解析モデルを作製し、弾性解析及び非弾性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。ここで非弾性弾性解析は、土盤材の動的三輪試験より得られた静的～弾性～せん断弹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実験結果より得られた静的～弾性～せん断弹性係数の関係を示している。

得られた試験体変位と平均せん断抵抗力の関係を静的載荷試験の結果と比較して、図-7、8に示す。前述の載荷条件を考慮する限り、弾性解析結果においては、地盤の小さい弹性範囲内ではほぼ一致する傾向を示す。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P-S換算結果より GL-29.7m を基盤とし、節点示位の自由度を基盤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に解析モデルの一観を示す。

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

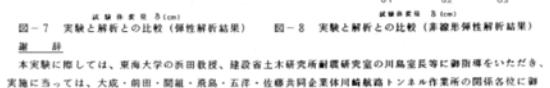


(a) 試験体タイプ1 (静的載荷)



(b) 試験体タイプ2 (静的載荷)

図-6 実験コンタクト図 (地盤部)



(a) 実験と解析との比較 (弾性解析結果)



(b) 実験と解析との比較 (非弾性弾性解析結果)

(123) 沈埋トンネルの地震応答解析に用いる地盤ばね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

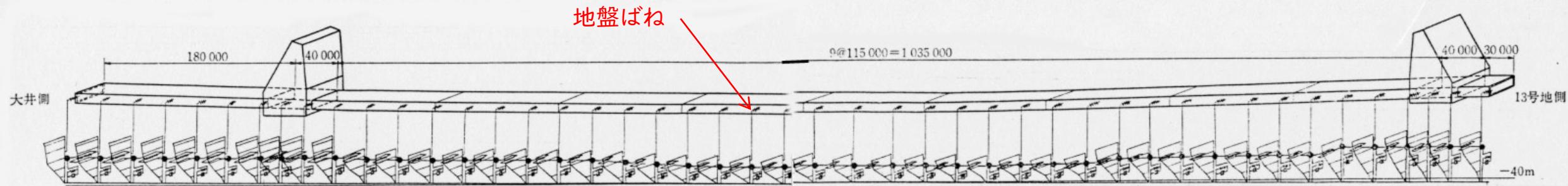
1. はじめに

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ばね定数を設定する必要がある。このばね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。

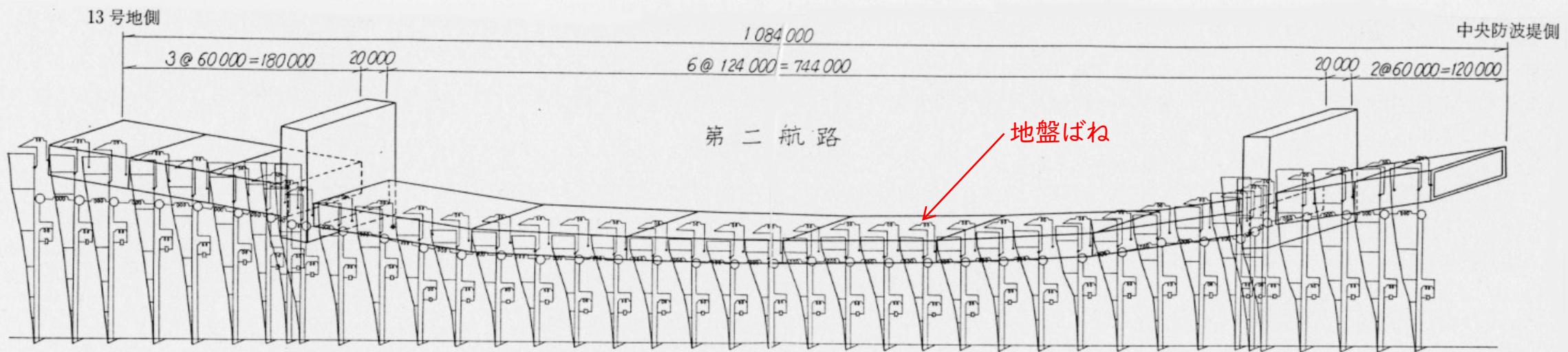
本文は、この沈埋トンネル～地盤間ばね定数の評価手法を確立するための資料とすべく実施した屋外模型実験結果及び解析結果について報告するものである。ただし、ここでいうばねは、沈埋トンネルの耐震設計上支配要因となるトンネル軸方向のばね（せん断ばね）を指す。

対象：沈埋トンネルの耐震解析モデルの1要素である地盤ばね
軸方向と軸直角方向とがあるが、耐震設計上支配要因となる軸方向ばね（せん断ばね）

沈埋トンネルの耐震設計で用いられた動的解析モデルの例



首都高速道路・東京港トンネル（1976年完成）



東京港第二航路海底トンネル（1980年完成）

(123) 沈埋トンネルの地震応答解析に用いる地盤ばね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ばね定数を設定する必要がある。このばね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～地盤間ばね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、ここでいうばねは、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ばね（せん断ばね）を指す。

対象：沈埋トンネルの耐震解析モデルの1要素である地盤ばね
軸方向と軸直角方向とがあるが、耐震設計上支配要因となる軸方向ばね（せん断ばね）

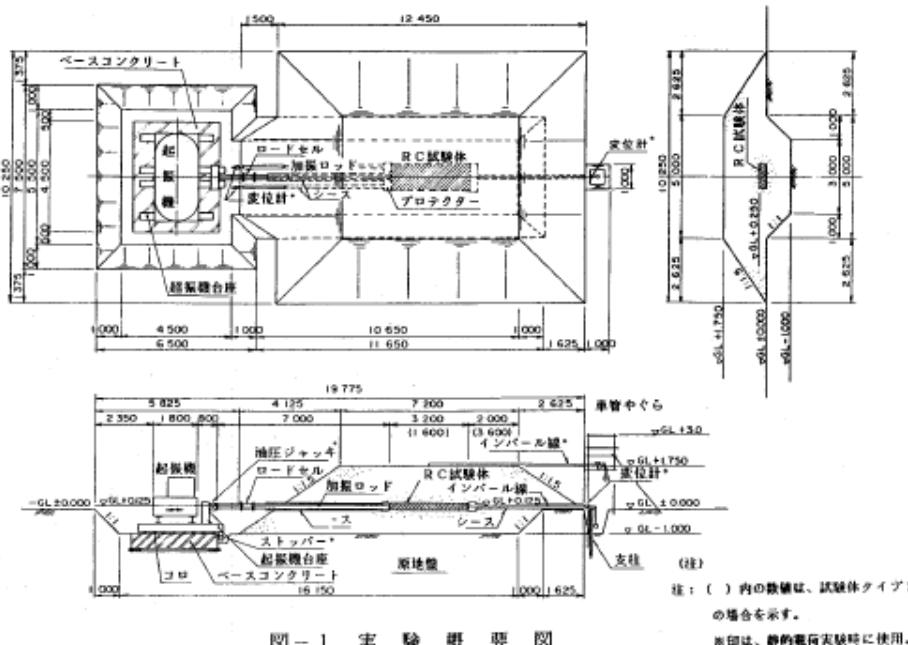
本研究の特徴：

- 屋外模型実験とその数値シミュレーションを行い、
設計実務で行われている「地盤ばねの設定法」の妥当性を検証する
- 屋外模型実験 …… 大規模試験体、静的載荷と動的載荷
- 数値シミュレーション …… 3D-FEM、弾性解析と非線形弾性解析

2. 実験の概要

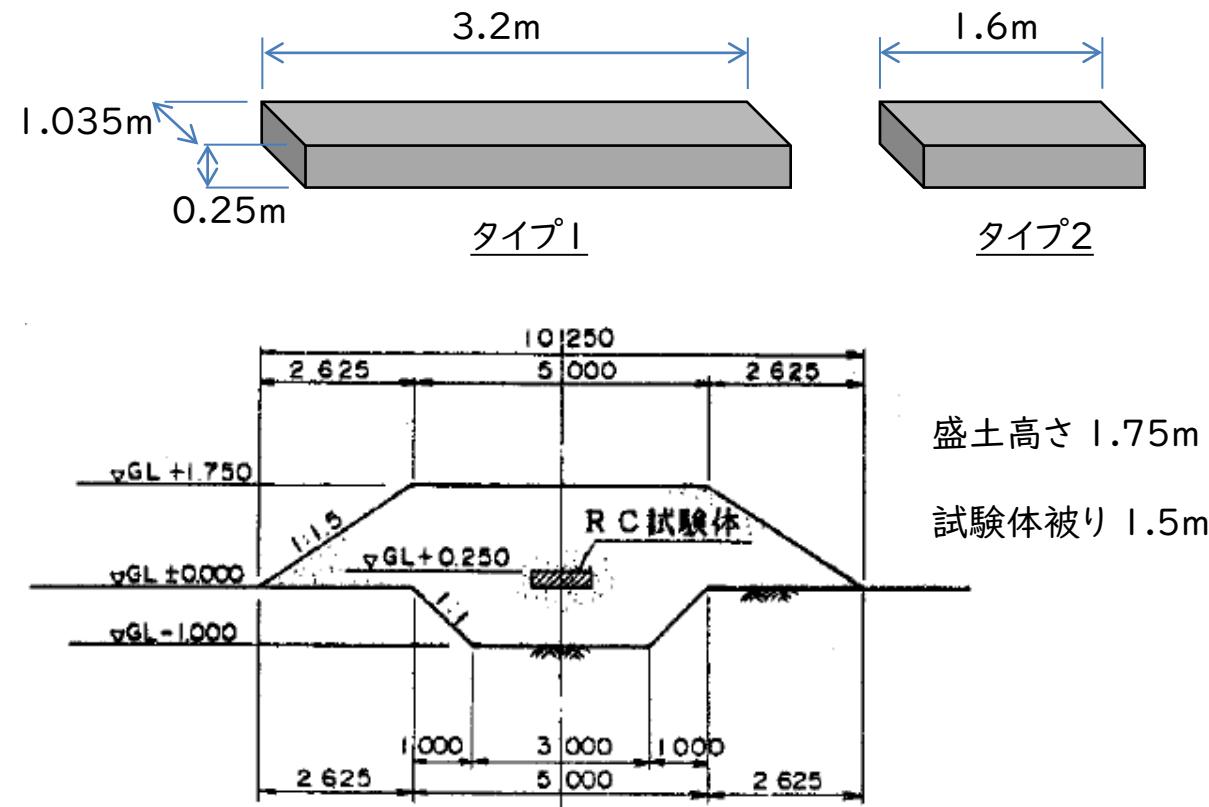
実験の概要図を図-1に示す。本実験では、地中に埋設された試験体に直接水平荷重を加え、この時の載荷力と試験体の変位を計測することにより、試験体～地盤間のパネ定数を求めた。図-1に示すように、沈埋函を模したRC製の試験体（タイプ1; $1.035 \times 0.25 \times 3.2\text{m}$ 、タイプ2; タイプの1/2の長さ）を均質な盛土中に埋設し、試験体に剛結した加振ロッドにより水平荷重を加えた。試験体の長さを2種類としたのは、長さの影響を把握するためである。

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ボンジを用い



実験の概要

- 地中に埋設した試験体に水平力を加え, 試験体の変位を計測する
 - 試験体
沈埋トンネルのエレメント(函体)を模した, RC製の厚板
 - ・タイプ1: 幅1.035m × 高さ0.25m × 長さ3.2m
 - ・タイプ2: 長さを1/2としたもの
(理想的な2次元条件にはできないので, 長さの影響をみるため)



□ 加力方法

動的載荷：大型起振機を使う
静的載荷：油圧ジャッキによる

シースの中に加振ロッドを通し、盛土との接触をなくす

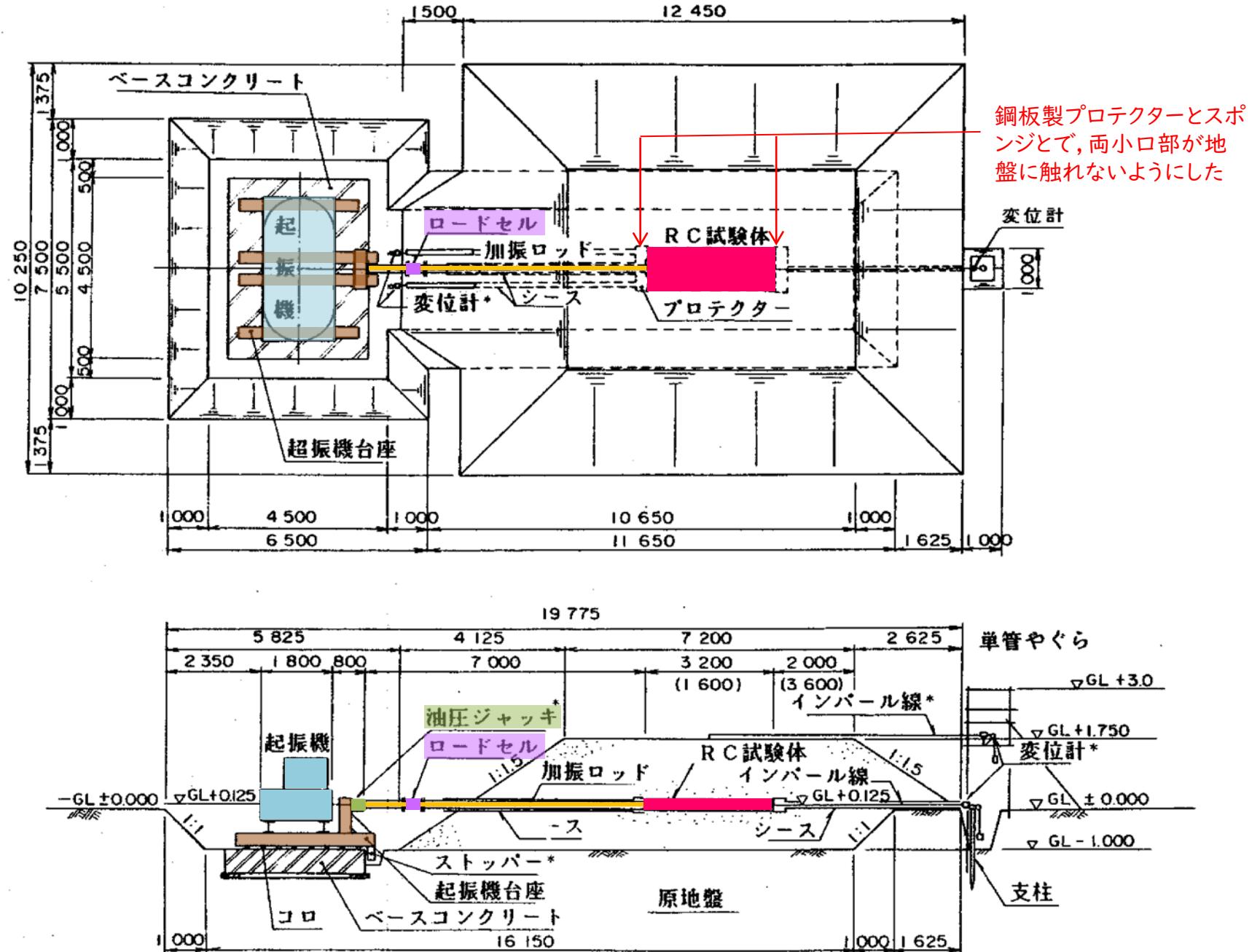
加振ロッドの一部を較正してロードセル化し、載荷力を計測

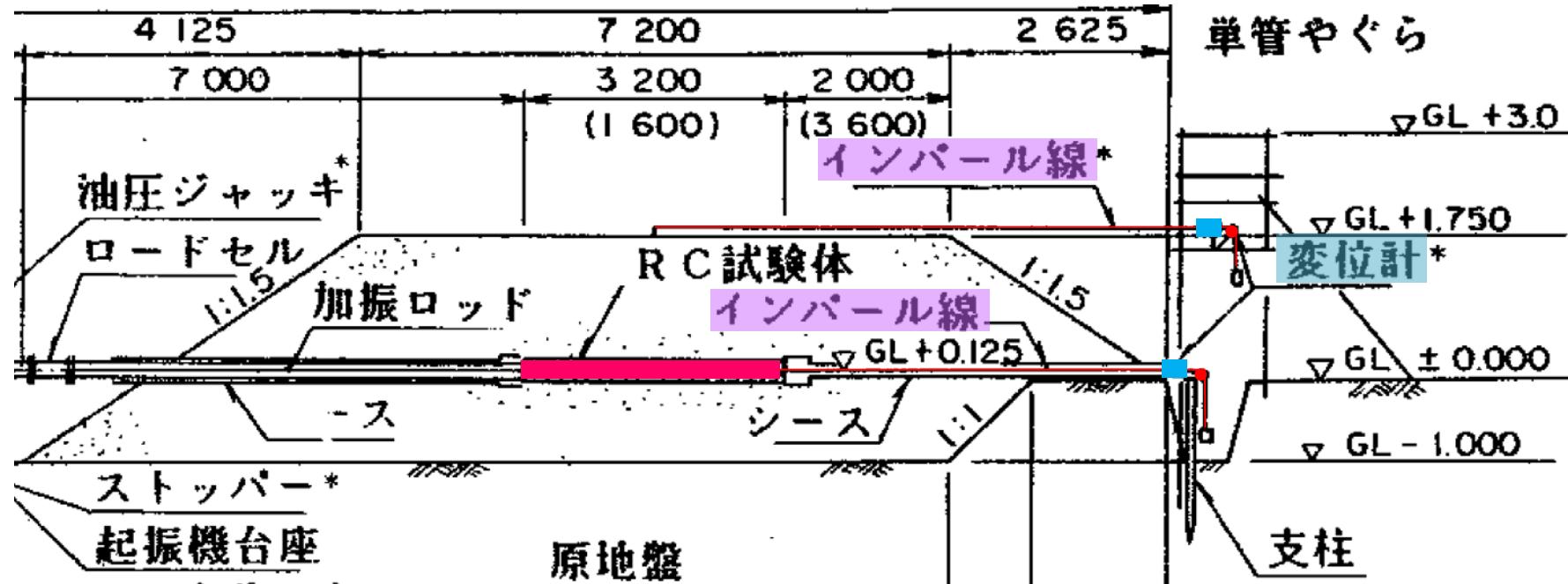
➤ 動的載荷時

起振機台座をベースコンクリートに固定せず、下に丸鋼を並べて水平方向ローラーの条件にした
(この時、油圧ジャッキはない)

➤ 静的載荷時

起振機台座に油圧ジャッキとストッパーを取り付け、ベースコンクリートで反力をとった





□ 試験体の変位計測

➢ 動的変位

試験体の中に小型加速度計を埋め込み, 加速度記録をシグナルアナライザーで2回積分する

➢ 静的変位

試験体の端部からインパール線を盛土外に引き出し, 高感度変位計で計測

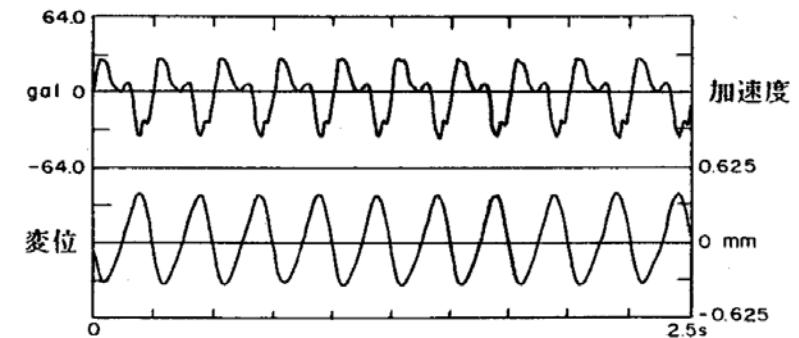


図-3 試験体の加速度波形および積分結果
(タイプ1: 3.8tf、4Hz加振)

□ 盛土の土質力学的状態

- ▶ 材料
山砂

▶ 締固め方法

自然含水量のまま使用

7層に分け、50kg級振動コンパクタで転圧
造成後はビニルシートで全面を被覆

▶ 土質試験

- ・現場密度試験、含水比計測
- ・S波速度測定
- ・動的3軸試験

□ 在来地盤(湾岸埋立地)の試験

- ・ボーリング調査(GL-35mまで)
- ・PS検層

Gの単位:tf/m²

1tf/m² = 9.8kPa

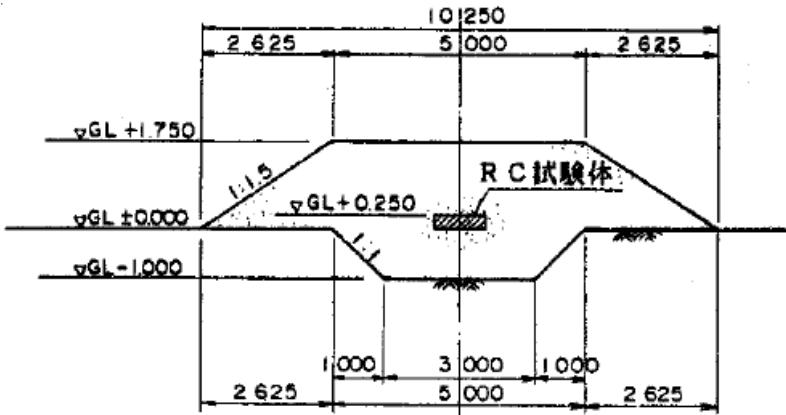


表-1 盛土の土質定数

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(tf/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 w(%)	14.2	12.5
*せん断	GL+1.75m	1940
弹性係数	GL+1.00m ~GL±0.00m	2700
G(tf/m ²)	GL±0.00m ~GL-1.00m	4880

* S波検層による値

G = 48MPa
V_S = 168m/s

G = 19MPa
V_S = 106m/s

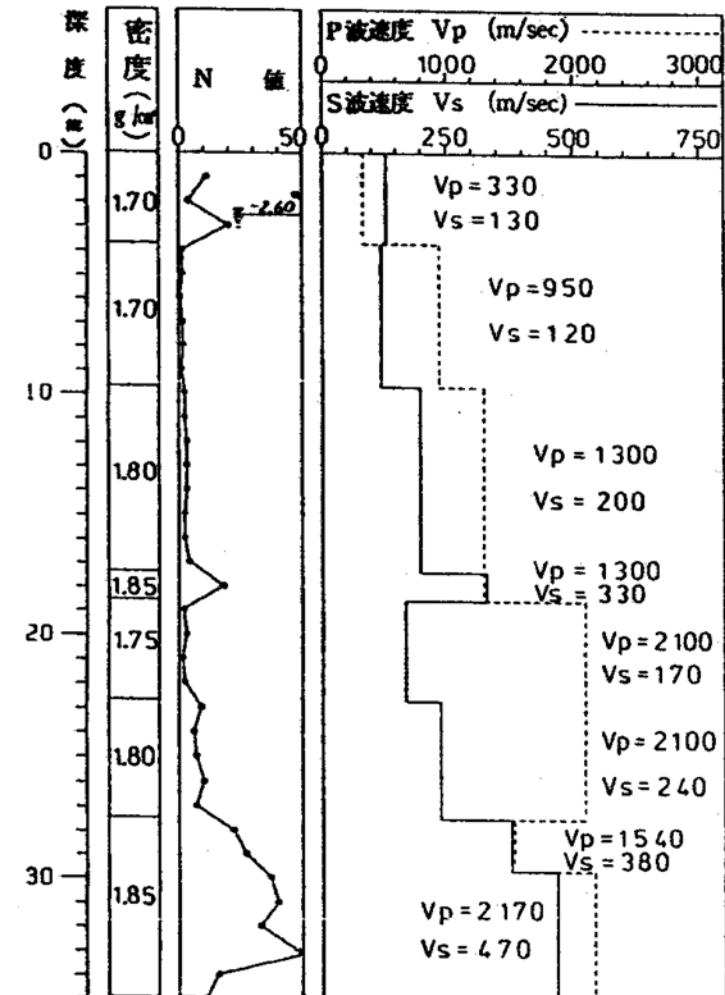


図-2 在来地盤のP-S検層結果

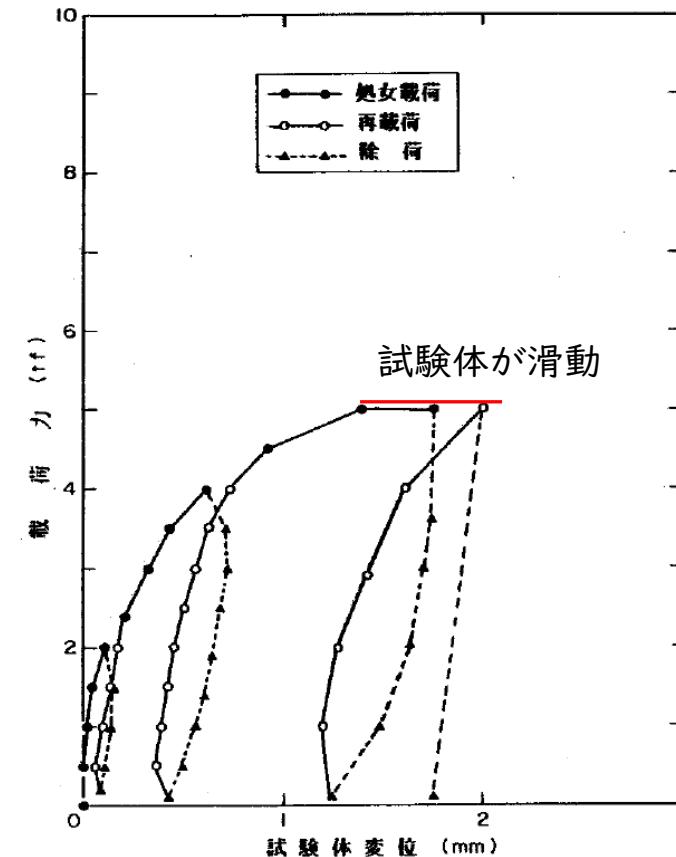
実験手順

◆ 動的載荷実験

加振力, 周波数(1.3Hz~5Hz)を変化させ,
合計27ケースを実施

◆ 静的載荷実験(動的載荷実験の終了後)

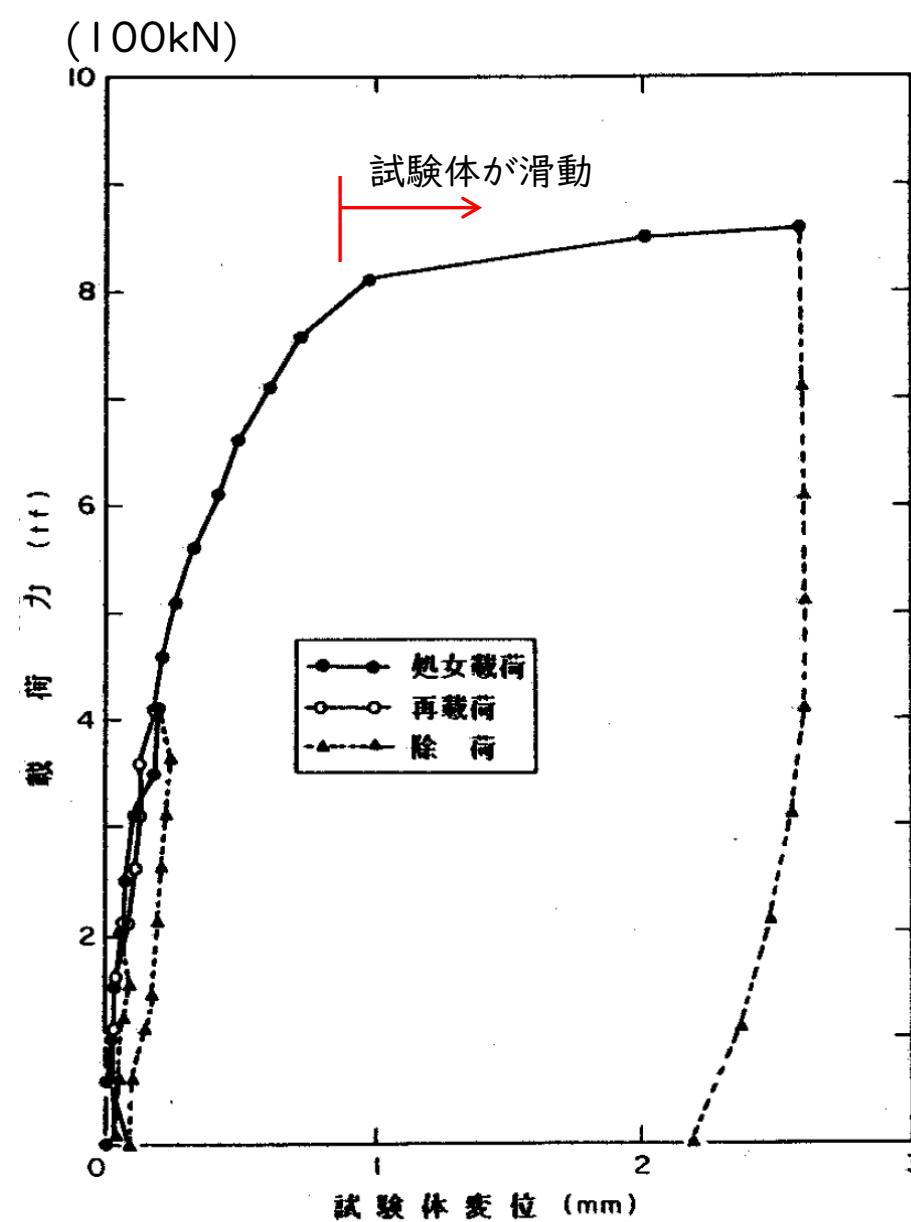
タイプ1試験体, タイプ2試験体とも
最大荷重2ton(20kN), 4ton(40kN), 滑動まで
の3サイクル載荷
各サイクルで, 荷重保持時間は,
処女載荷過程では5分間
除荷および再載荷過程では2分間



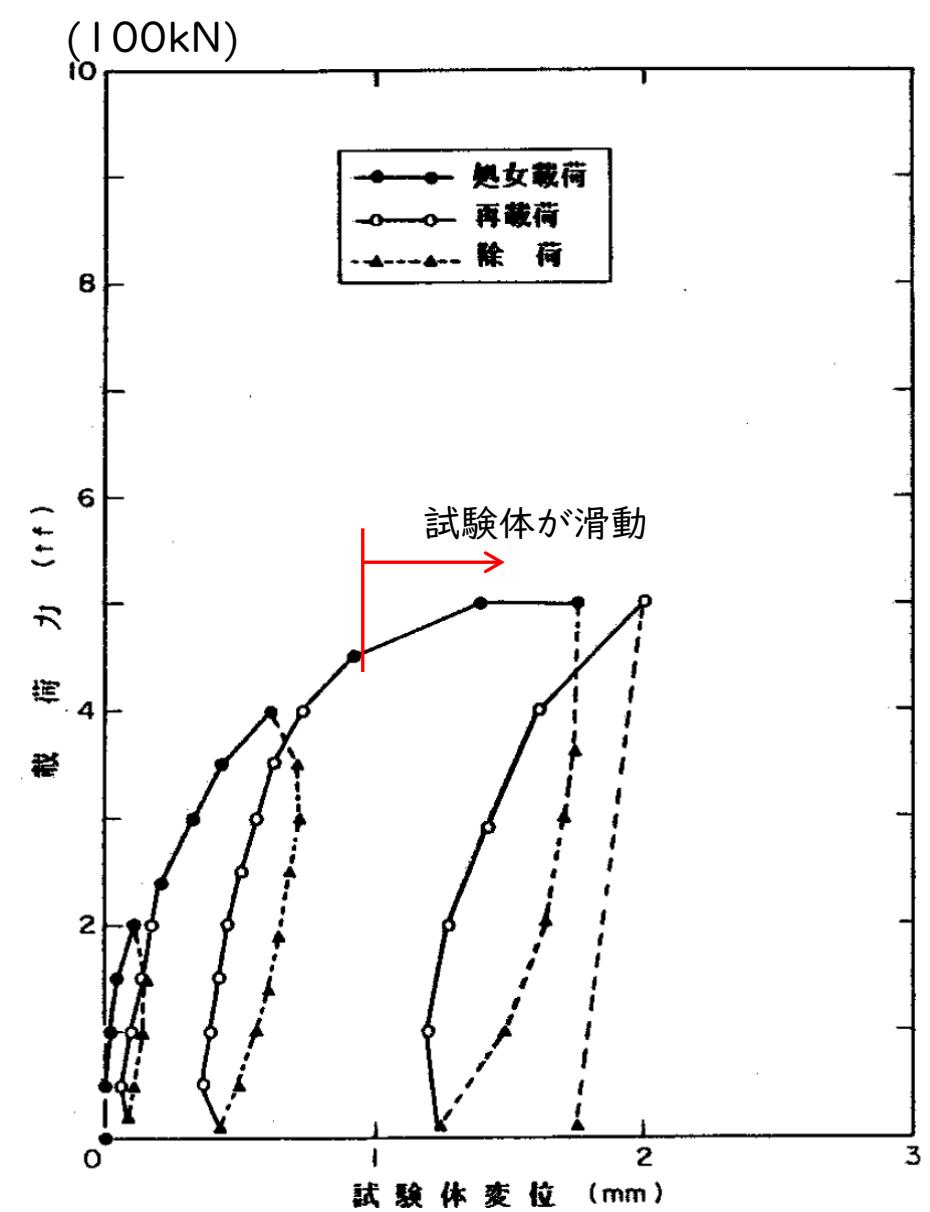
静的載荷実験の結果

- 両試験体とも1mm程度で滑動
- 滑動荷重は、
タイプ1試験体:8.1tf
(79kN)
タイプ2試験体:4.5~5.0tf
(44~49kN)

地盤との接触面積で除したせん断応力値 τ_f としては、
タイプ1試験体:0.98tf/m²
(9.6kPa)
タイプ2試験体:
1.09~1.22tf/m²
(10.7~12.0kPa)



(a) 試験体タイプ1
(長さ3.2m)



(b) 試験体タイプ2 (長さ1.6m)
図-5 静的載荷試験結果 (載荷履歴)

動的載荷実験の結果

$$K = \frac{\text{加振力}}{\text{試験体変位}}$$

単位: tf/mm

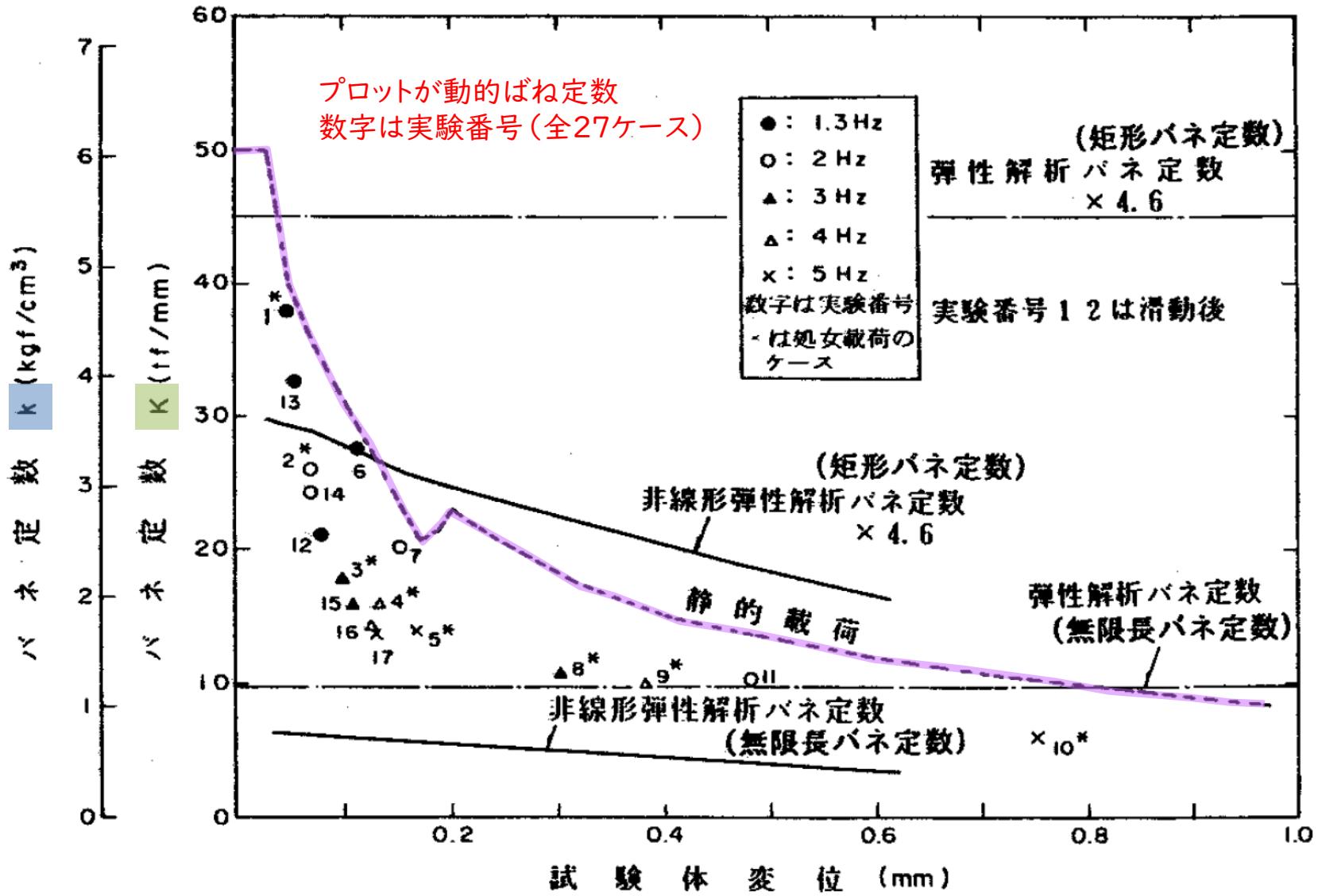
$$1 \text{ tf/mm} = 9.8 \text{ kN/mm}$$

$$k = \frac{K}{\text{地盤との接触面積}}$$

単位: kgf/cm^3

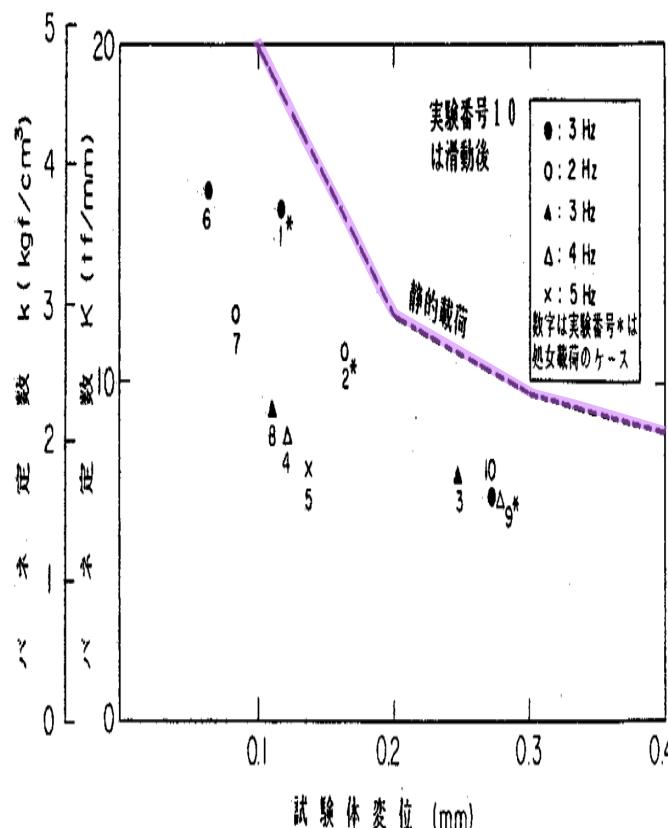
$$1 \text{ kgf/cm}^3 = 9.8 \text{ MN/m}^3$$

- ◆ k は概ね $1 \sim 5 \text{ kgf/cm}^3$
($10 \sim 50 \text{ MN/m}^3$)
- ◆ 加振力を一定にしたとき、周波数が低いほど、大きい試験体変位が一定のときも同じ傾向(試験体～地盤の振動系の動的応答特性が影響したものか)
- ◆ 加振周波数一定のときは、試験体変位が大きくなるほど加振力が大きくなるほどばね定数が小さくなる(地盤剛性の低下のため)



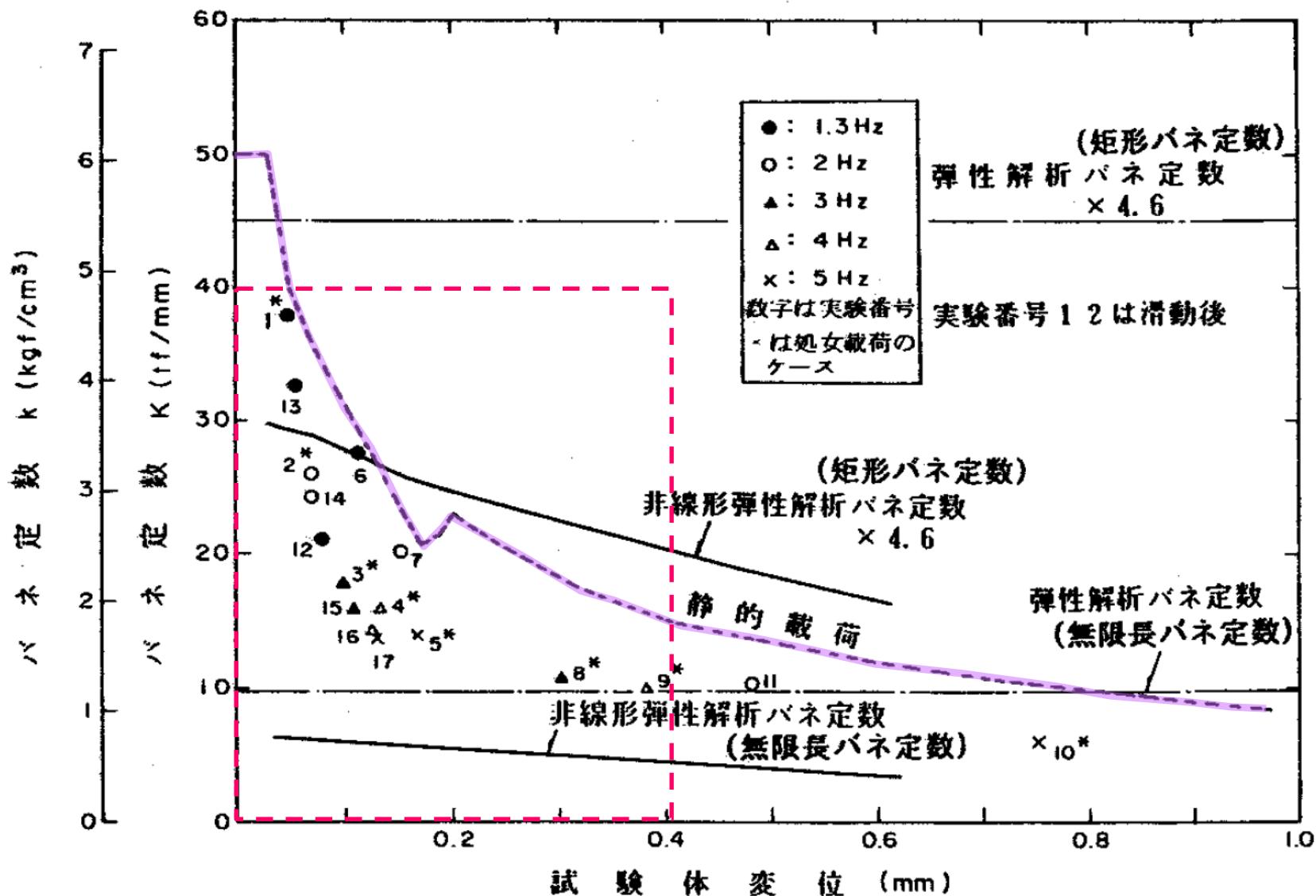
(a) 試験体タイプ1 (実験値と解析値との比較)

- ◆ 静的載荷のばね定数は、タイプ2試験体の方がやや大きい
- ◆ 動的ばね定数は静的ばね定数よりも小さく、加振周波数が低いほど、静的ばね定数に近づく傾向



(b) 試験体タイプ2

図-4 動的ばね定数(プロット)及び静的ばね定数(破線)



(a) 試験体タイプ1(実験値と解析値との比較)

実験の数値シミュレーション

一般に耐震設計の実務では、トンネル軸方向の地盤ばね定数は、三次元有限要素法解析で算定する。

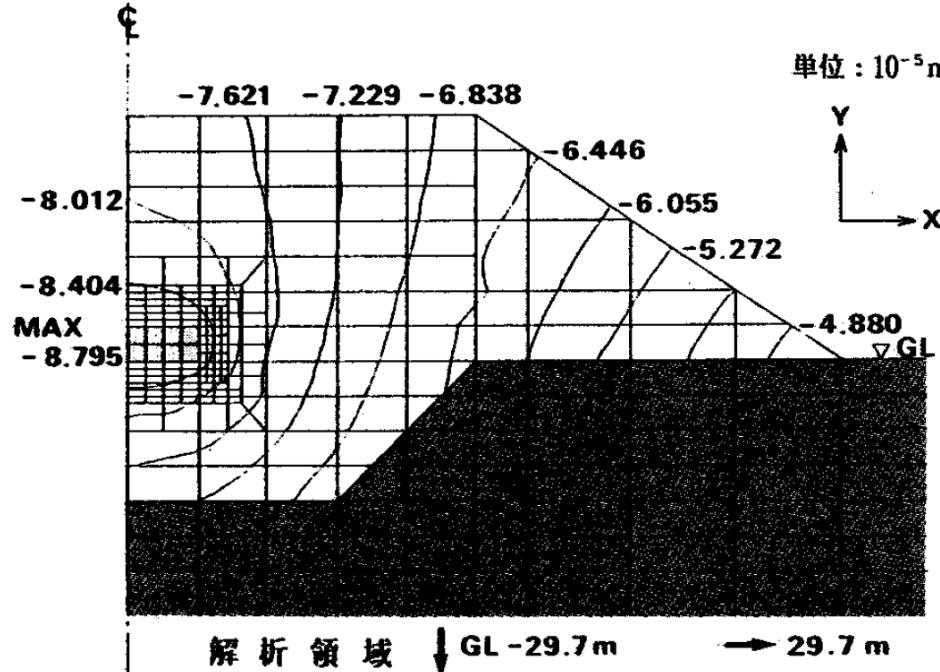
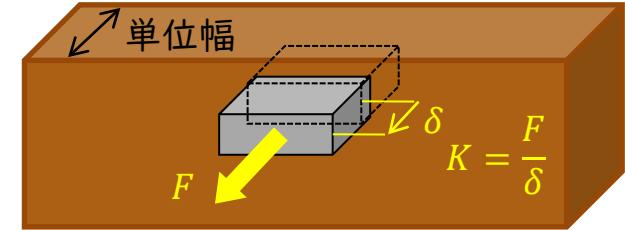
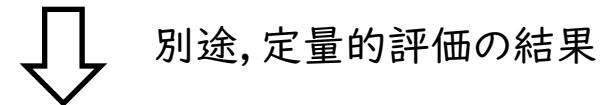


図-6 変位コンター図（盛土部）
(載荷荷重 $\tau = 0.10 \text{tf/m}^2$ 時)

作成した数値解析モデル

- ・盛土の3次元形状をモデル化したものではない
- ・奥行1要素の3D-FEMモデル
- ・節点変位の自由度は、荷重載荷方向のみ

「無限長試験体」の条件



このモデルによる解析値は、本来の「矩形試験体」のバネ値に対して
タイプ1試験体の場合は、1/4.6に評価される
タイプ2試験体の場合は、1/6.2に評価される

- ・弾性解析
- ・非線形弾性解析*

による実験の数値シミュレーション

*: 盛土材の動的三軸試験より得られたG~γ関係を使用

実験結果との比較(載荷曲線)

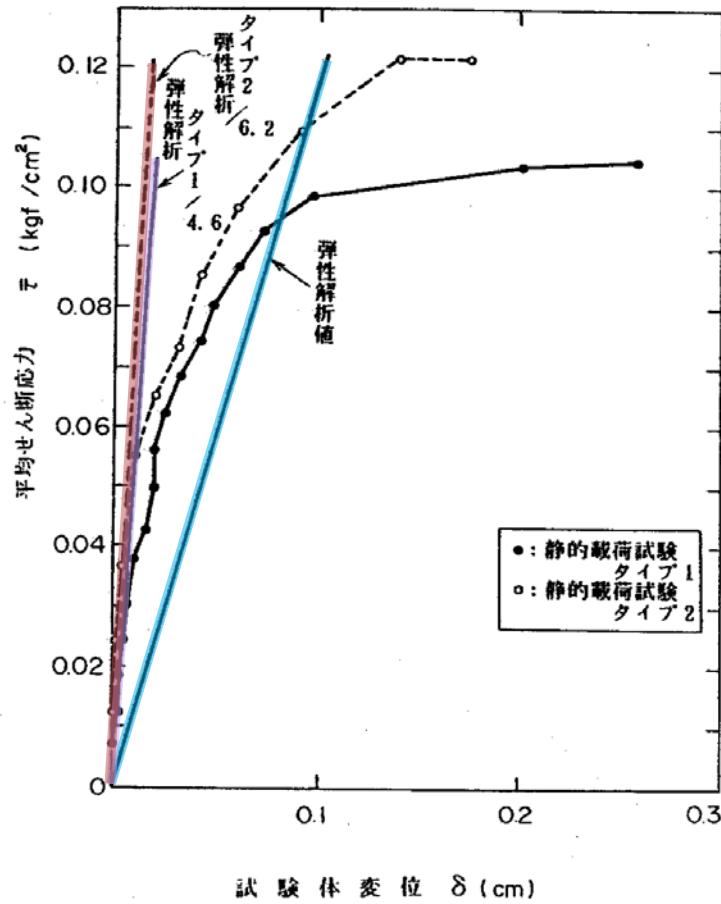


図-7 実験と解析との比較(弾性解析結果)

換算値を考慮すると、変位の小さい弾性範囲内でほぼ一致する傾向を示している

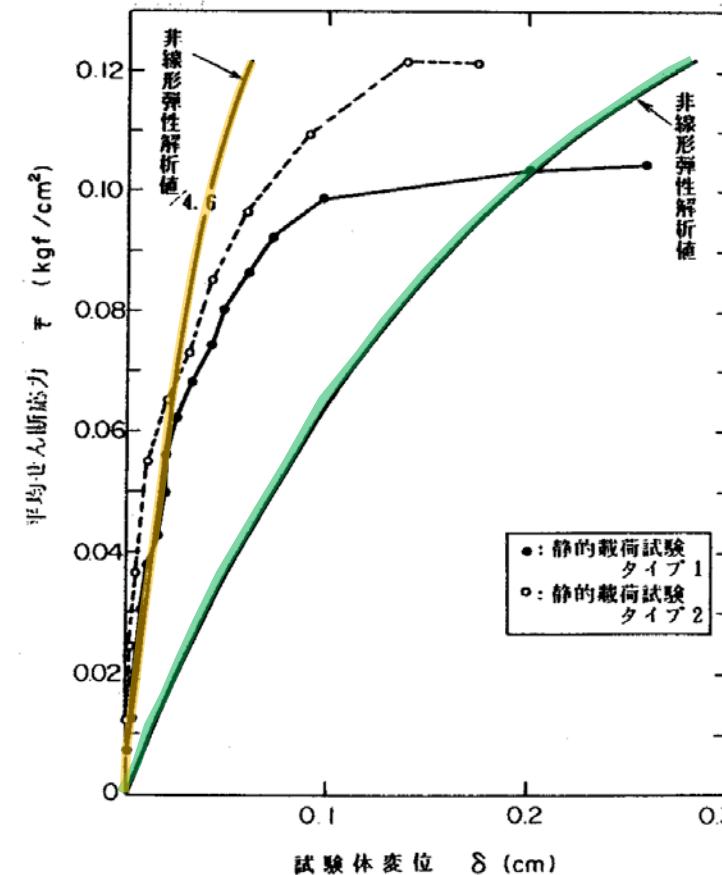
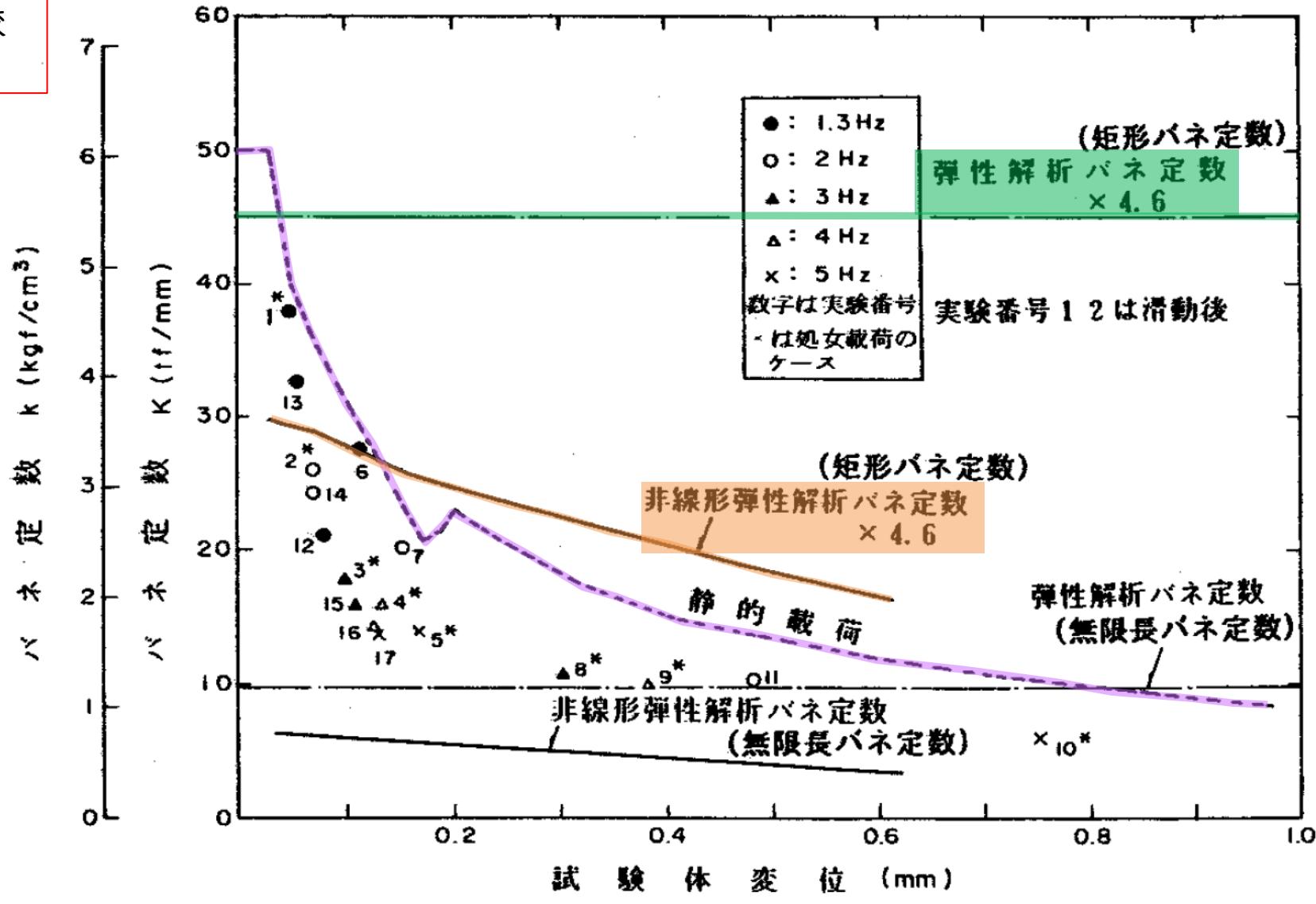


図-8 実験と解析との比較(非線形弾性解析結果)

弾性解析結果に比べてやや広い範囲でほぼ一致する傾向を示している

実験結果との比較
(バネ定数)



(a) 試験体タイプ1 (実験値と解析値との比較)

弾性解析結果、非線形弾性解析結果とともに、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。

結論

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。

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。