

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

—192—

(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

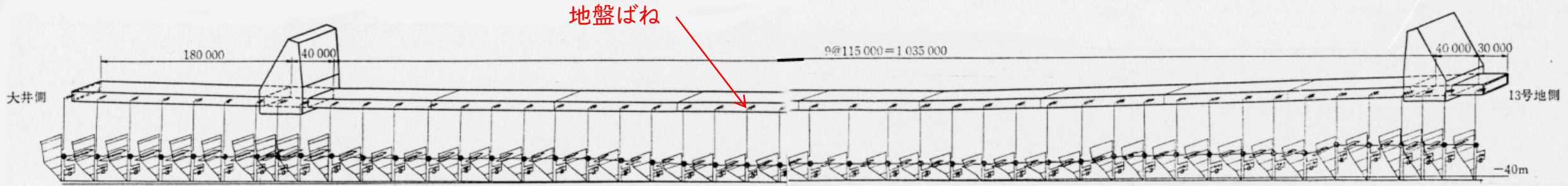
1. はじめに

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面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。

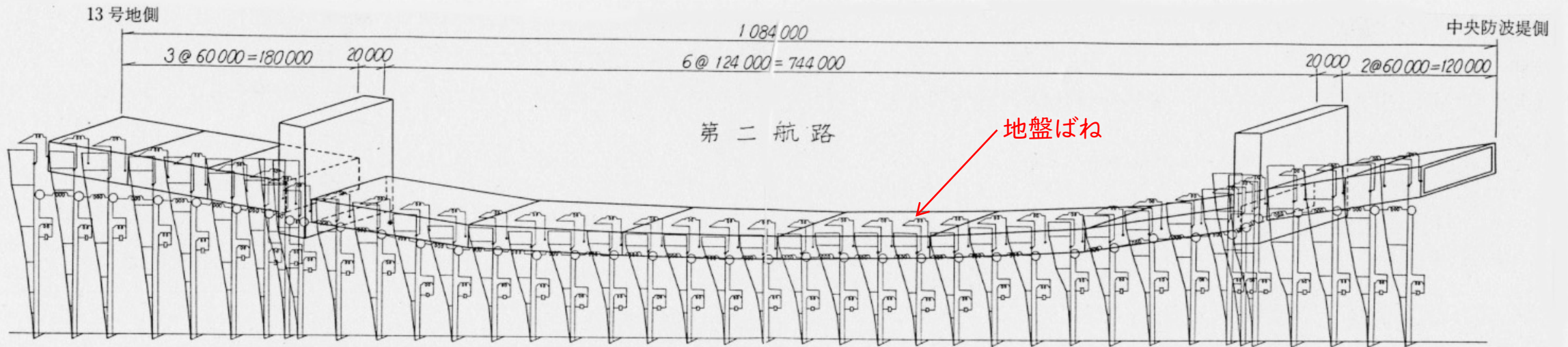
本文は、この沈埋トンネル～地盤間バネ定数の評価手法を確立するための資料とすべく実施した屋外模型実験結果及び解析結果について報告するものである。ただし、ここでいうバネは、沈埋トンネルの耐震設計上支配要因となるトンネル軸方向のバネ（せん断バネ）を指す。

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面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。

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、この時の荷重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、前者で動的荷重、後者で静的荷重を行い、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

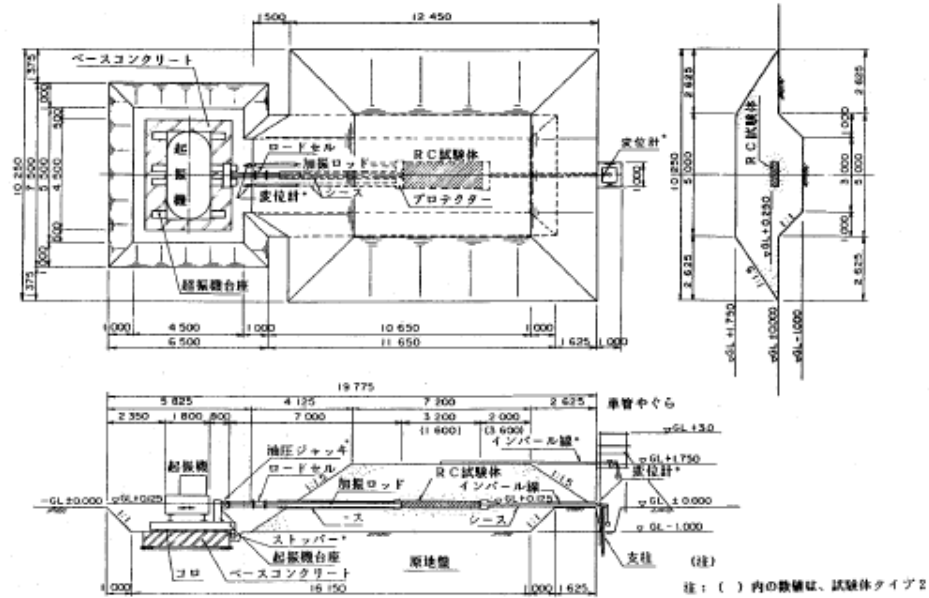


図-1 実験概要図

注：（ ）内の数値は、試験体タイプ2の場合を示す。
※印は、静的荷重実験時に使用。

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

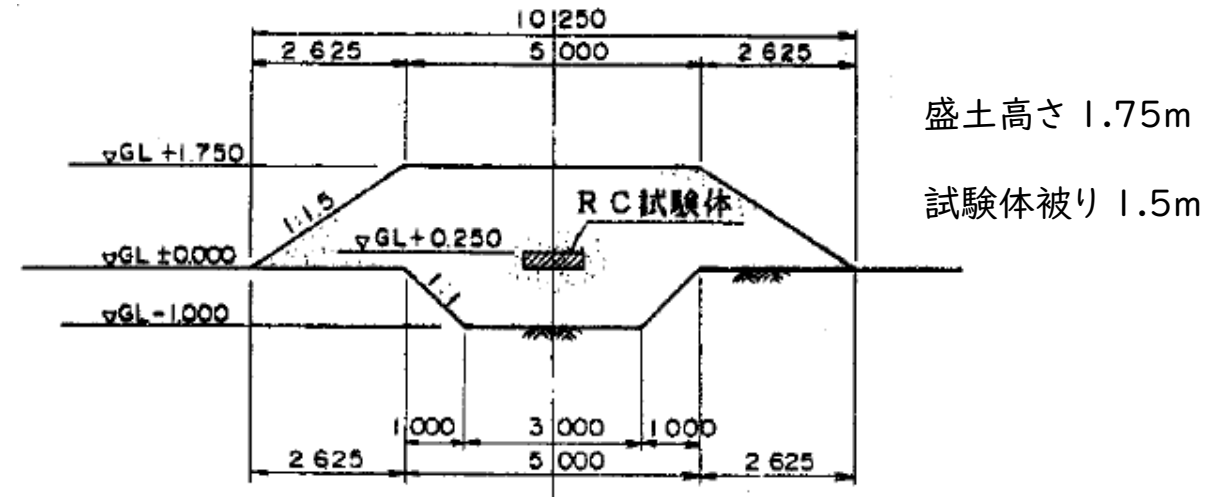
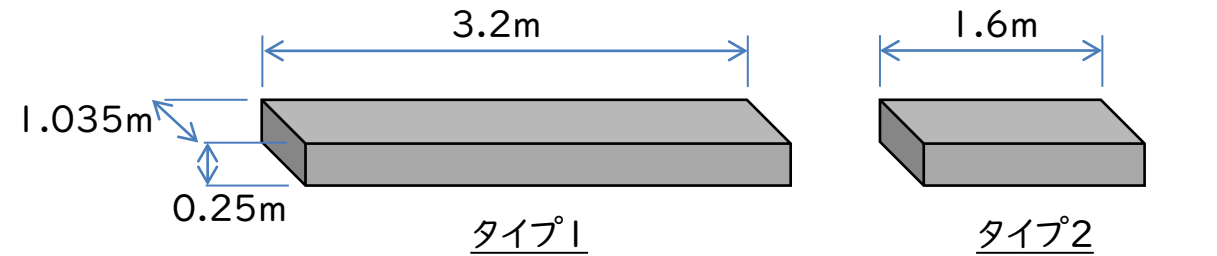
□ 試験体

沈埋トンネルの要素（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

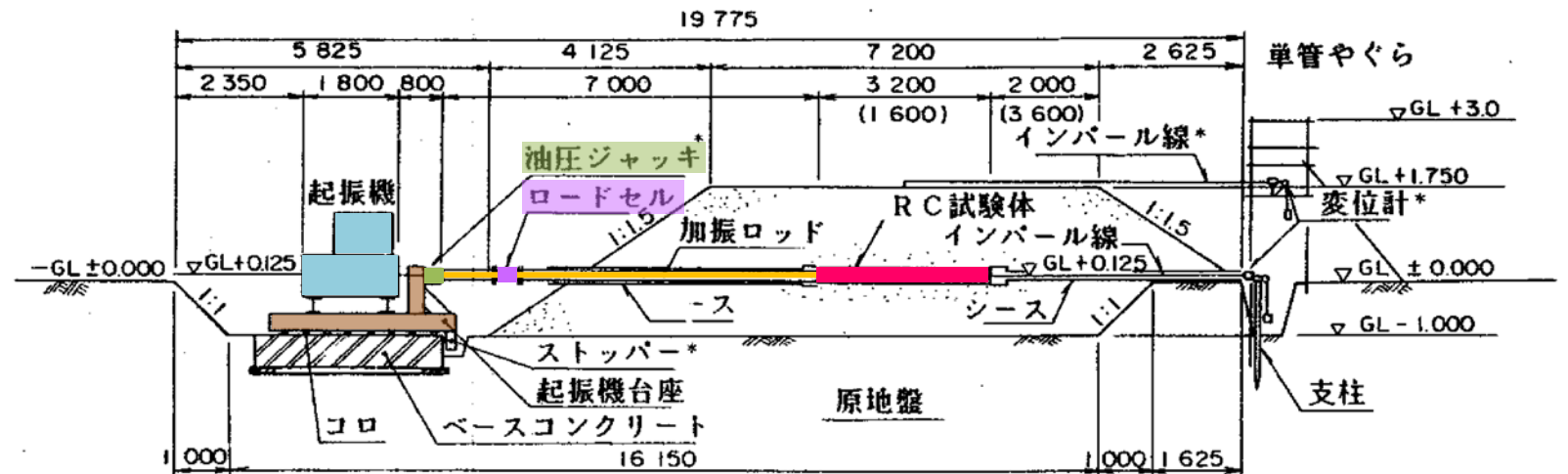
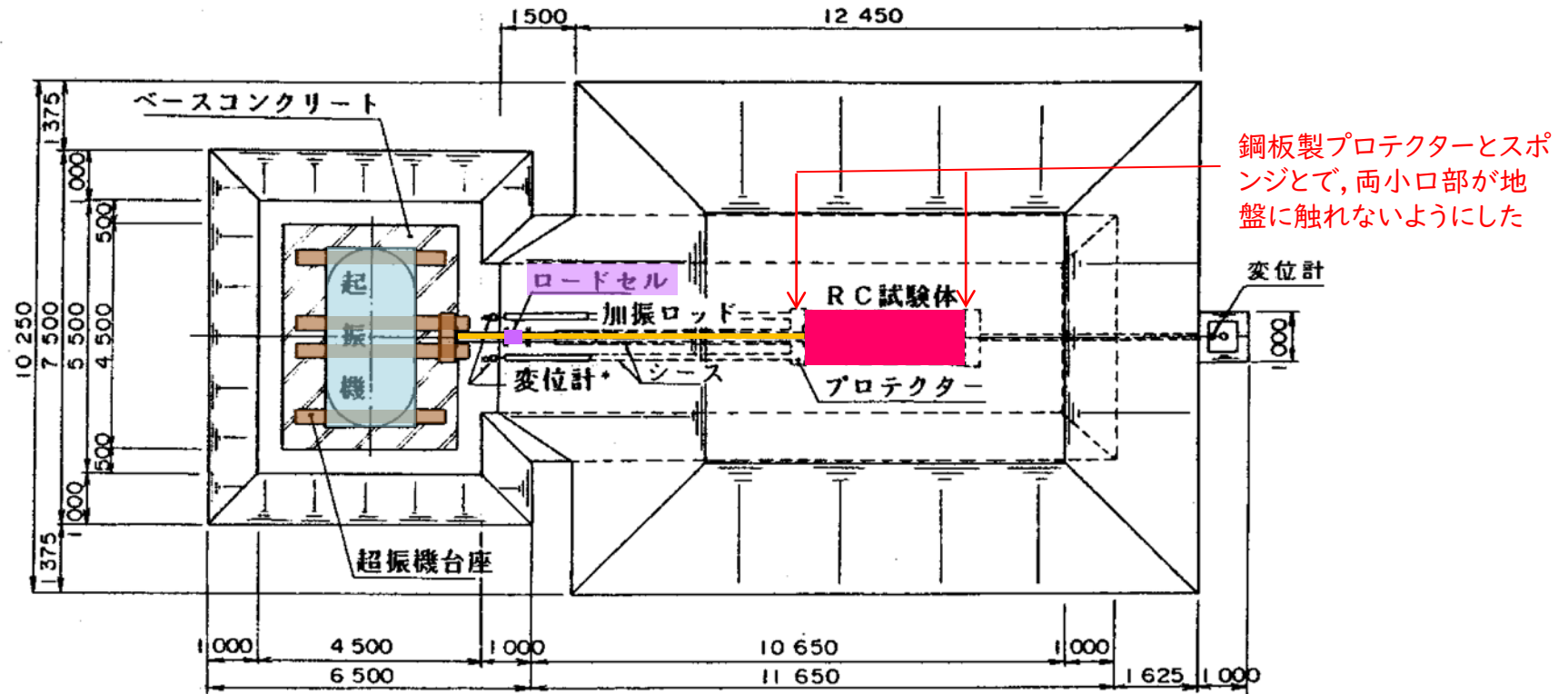
動的載荷 : 大型起振機を使う
静的載荷 : 油圧ジャッキによる

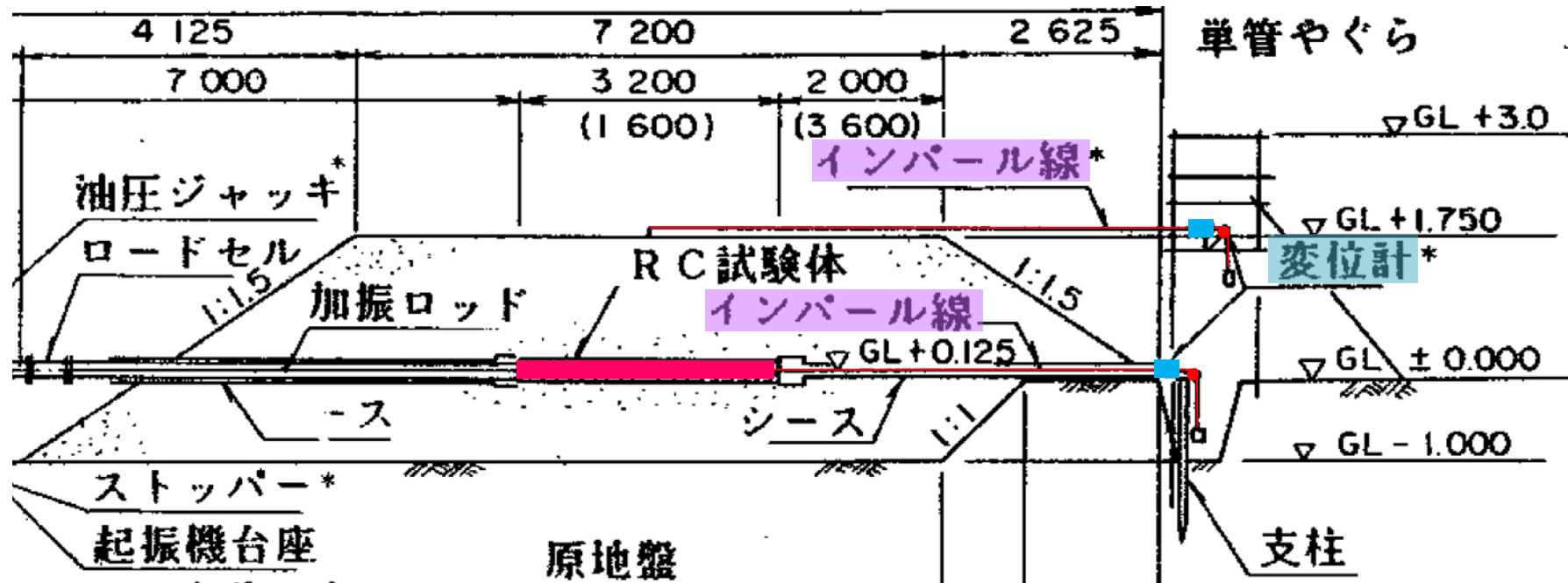
シースの中に加振ロッドを通し, 盛土との接触をなくす

加振ロッドの一部を校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

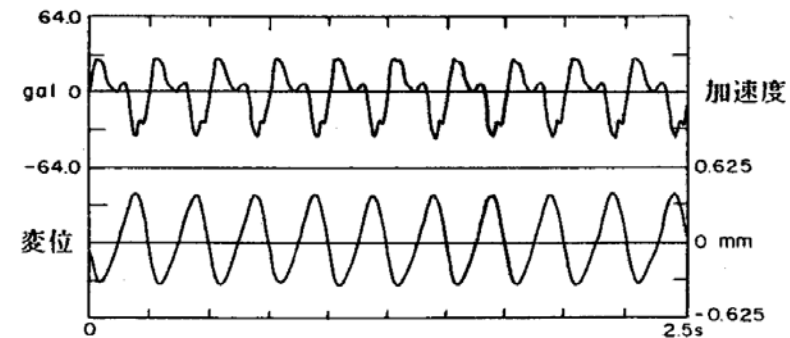


図-3 試験体の加速度波形および積分結果
(タイプ1: 3.8tf、4Hz加振)

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

1 tf/m² = 9.8 kPa

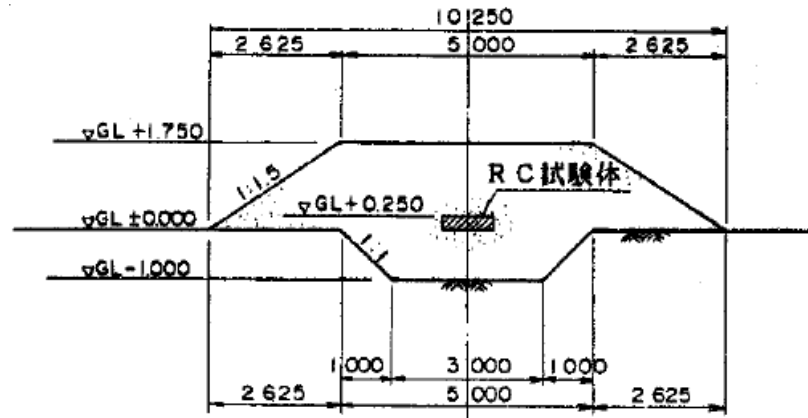


表-1 盛土の土質定数

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 ω (%)		14.2	12.5
*せん断 弾性係数	GL+1.75m	1940	2210
	GL+1.00m ~GL±0.00m	2700	2970
	GL±0.00m ~GL-1.00m	4880	4160

* S波検層による値

G = 48 MPa
 $V_s = 168$ m/s

G = 19 MPa
 $V_s = 106$ m/s

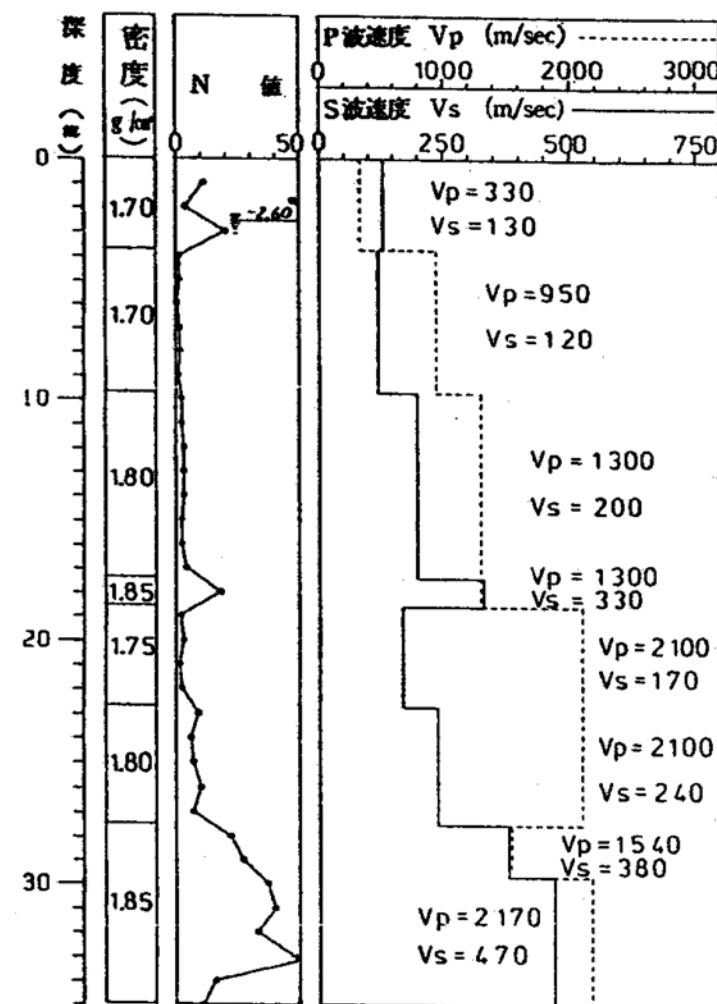


図-2 在来地盤のPS検層結果

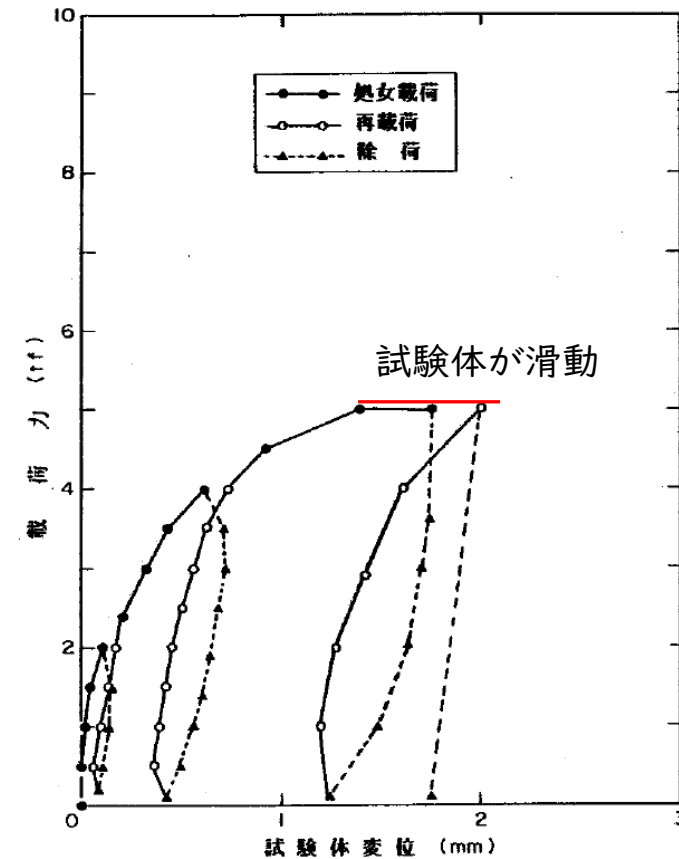
実験手順

◆ 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)

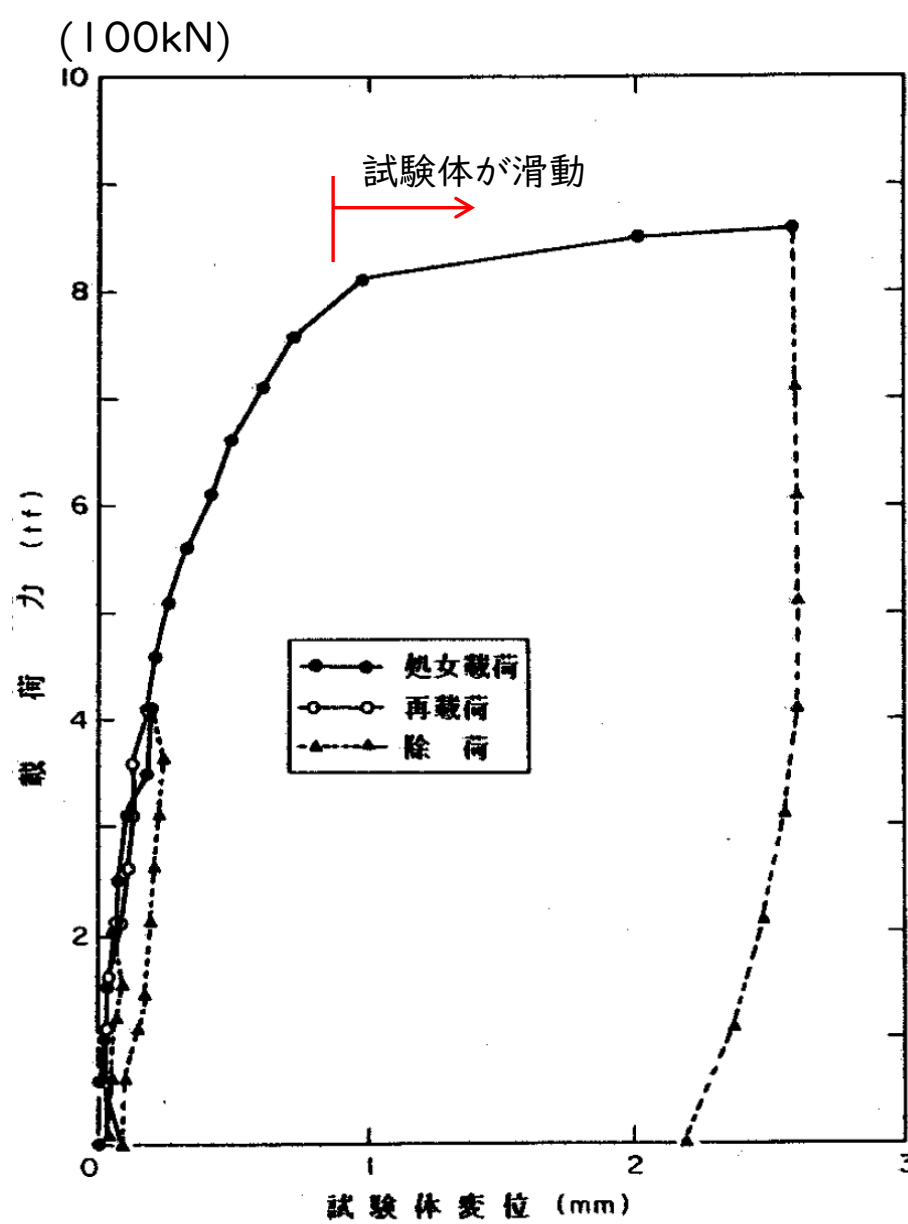
タイプ1試験体, タイプ2試験体とも
最大荷重2ton (20kN), 4ton (40kN), 滑動まで
の3サイクル載荷
各サイクルで, 荷重保持時間は,
処女載荷過程では5分間
除荷および再載荷過程では2分間



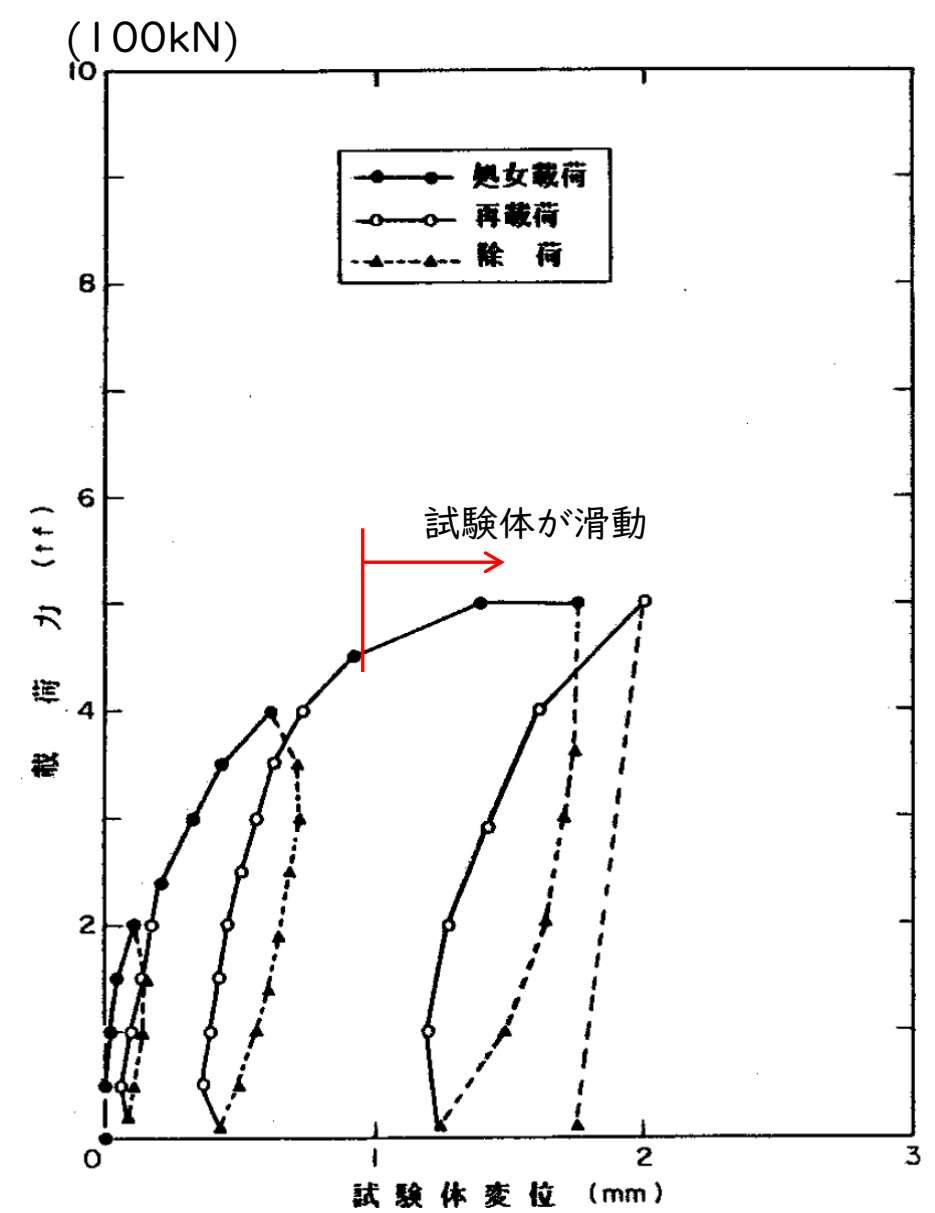
静的載荷実験の結果

- 両試験体とも1mm程度で滑動
- 滑動荷重は,
タイプ1試験体: $8.1 \pm f$
(79kN)
タイプ2試験体: $4.5 \sim 5.0 \pm f$
(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: $0.98 \pm f/m^2$
(9.6kPa)
タイプ2試験体:
 $1.09 \sim 1.22 \pm f/m^2$
(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

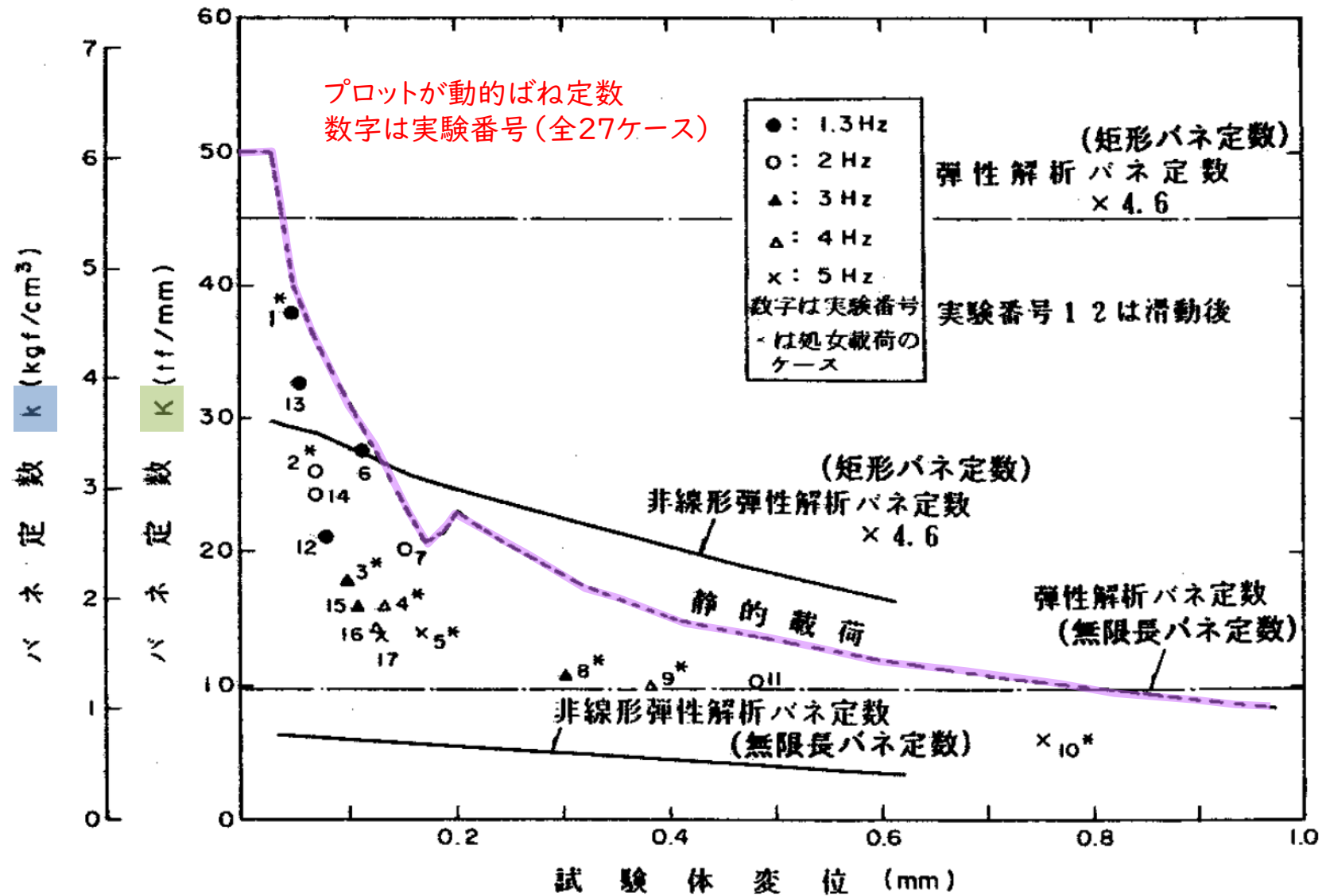
1 tf/mm = 9.8 kN/mm

$$k = \frac{K}{\text{地盤との接触面積}}$$

単位: kgf/cm³

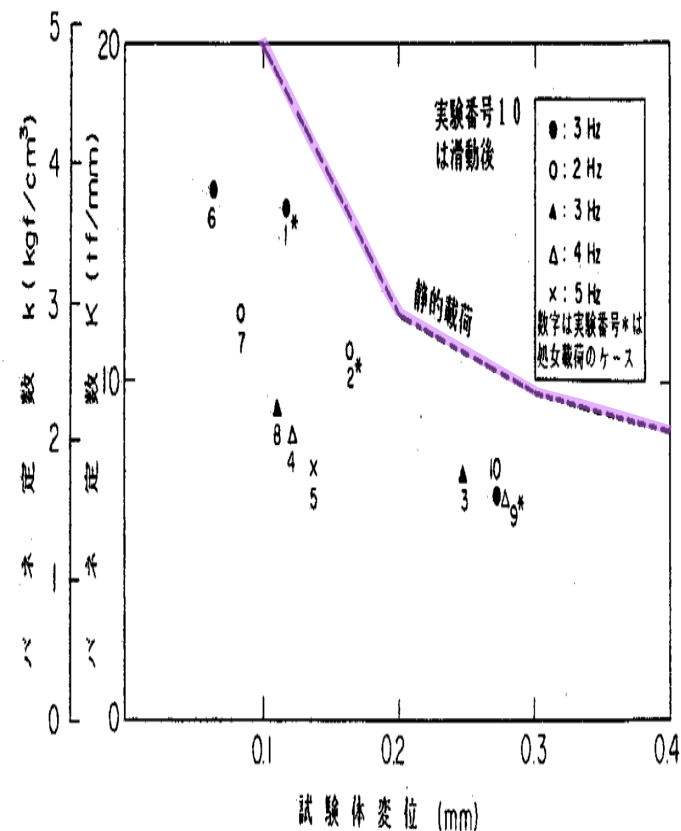
1 kgf/cm³ = 9.8 MN/m³

- ◆ k は概ね 1~5 kgf/cm³ (10~50 MN/m³)
- ◆ 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)

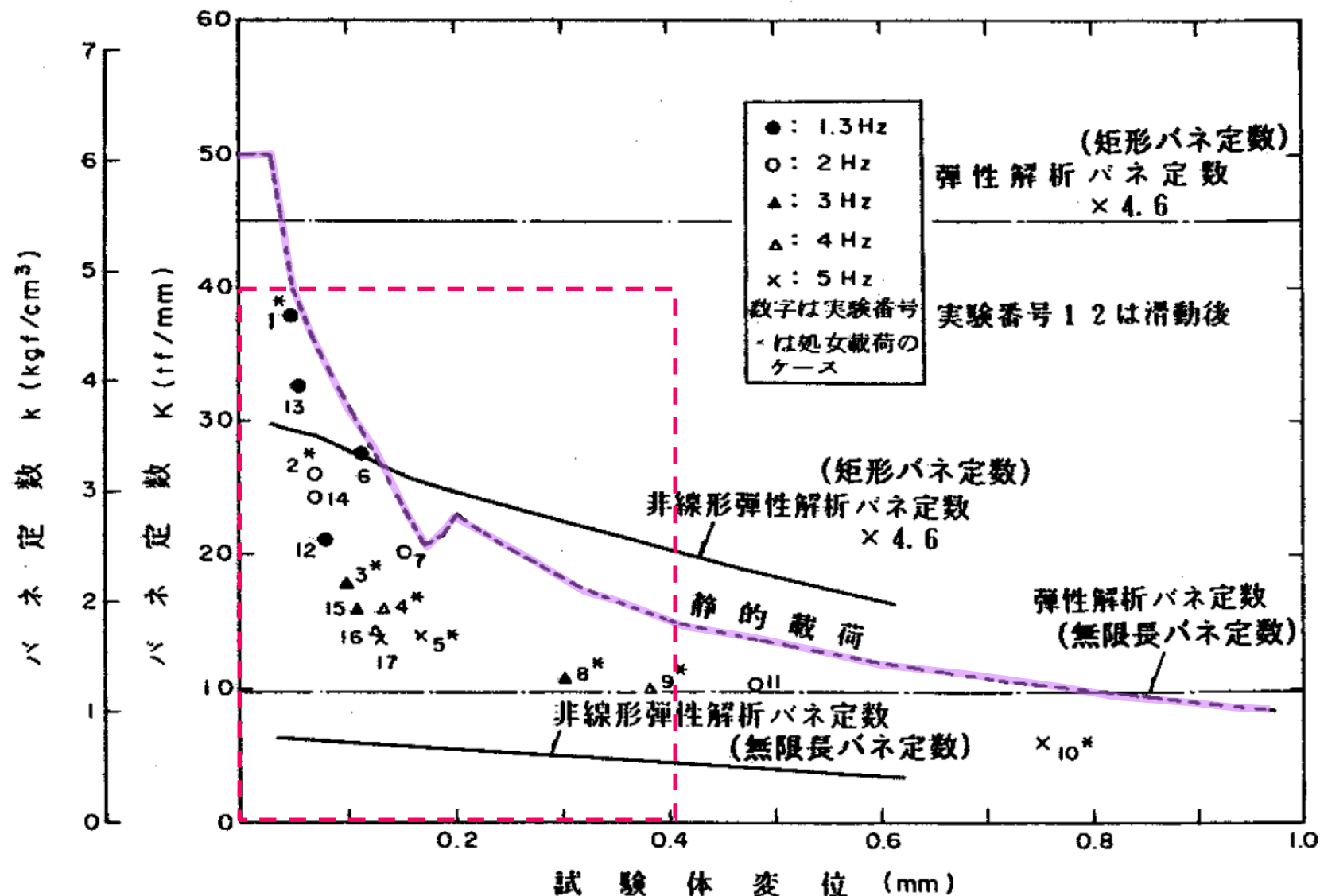


(a) 試験体タイプ1 (実験値と解析値との比較)

- ◆ 静的载荷のばね定数は、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



(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。

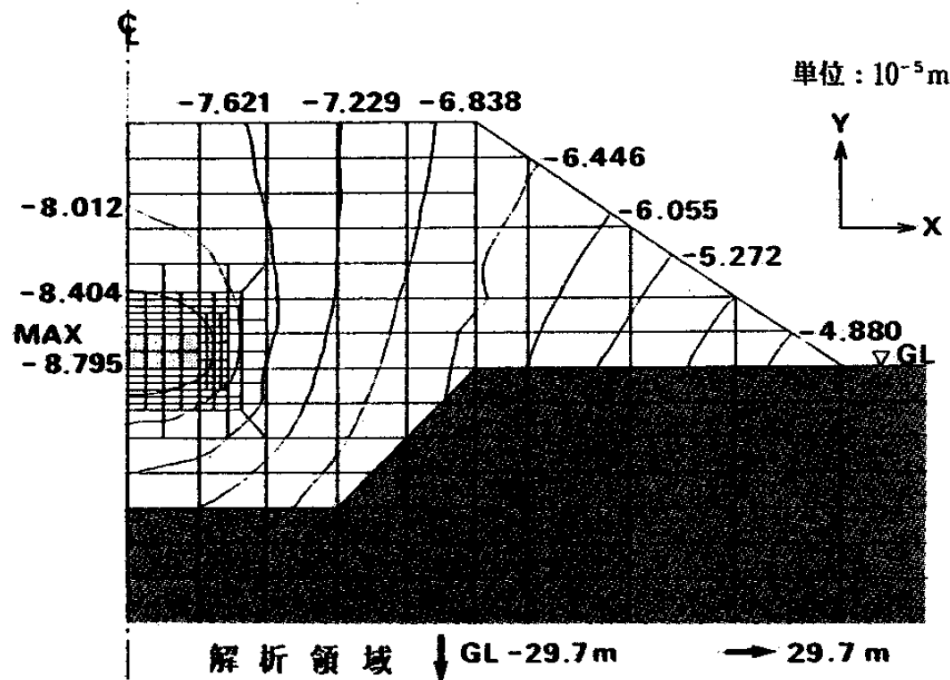
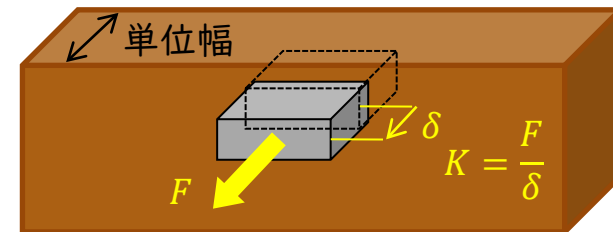


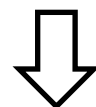
図-6 変位コンター図（盛土部）

（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



別途、定量的評価の結果

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 $G \sim \gamma$ 関係を使用

実験結果との比較（載荷曲線）

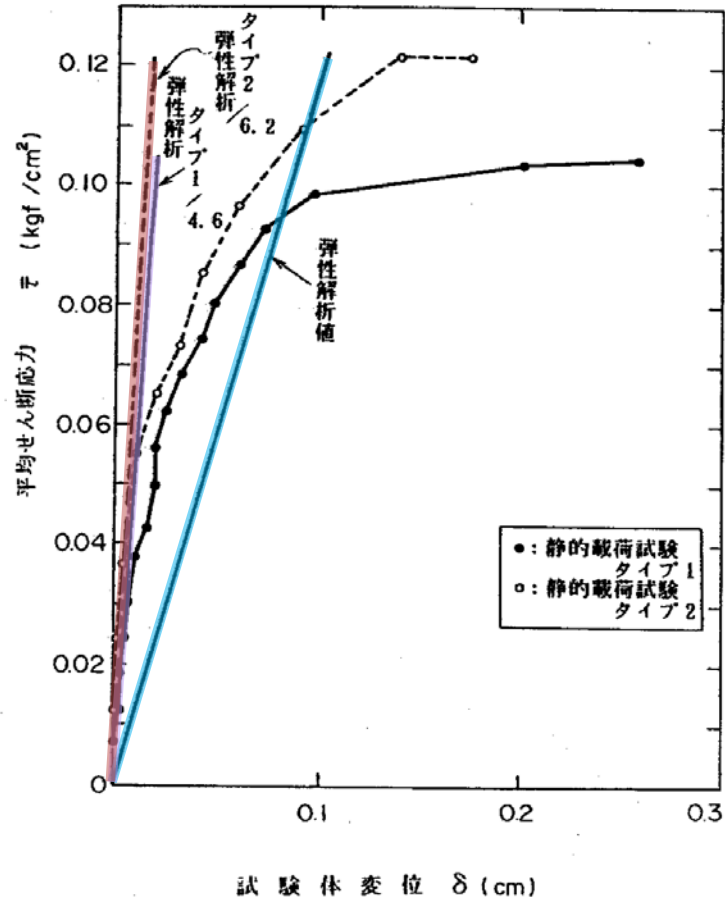


図-7 実験と解析との比較（弾性解析結果）

換算値を考慮すると、変位の小さい弾性範囲内ではほぼ一致する傾向を示している

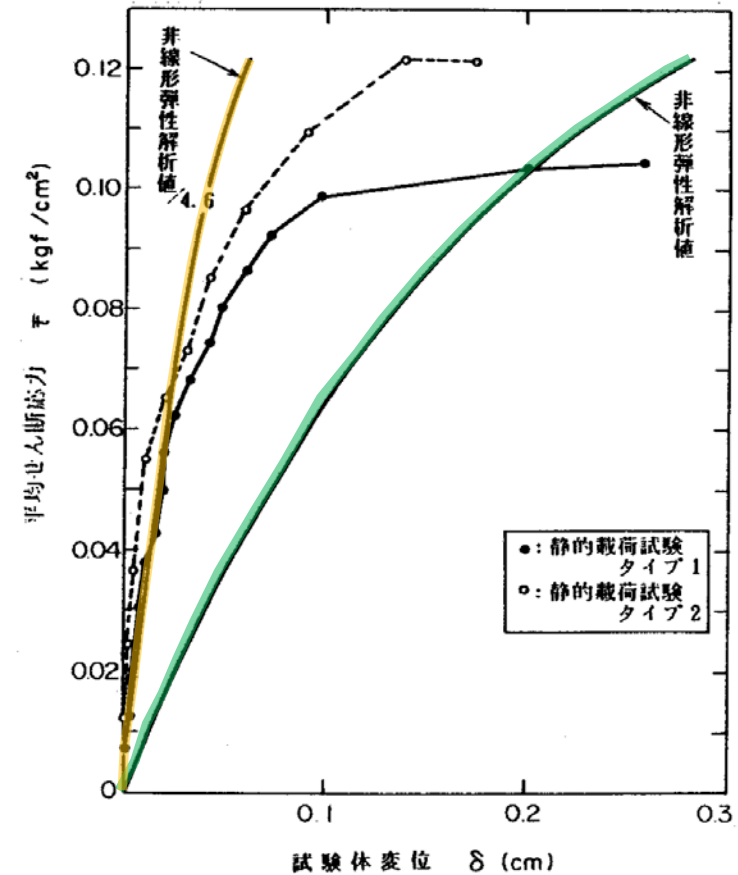
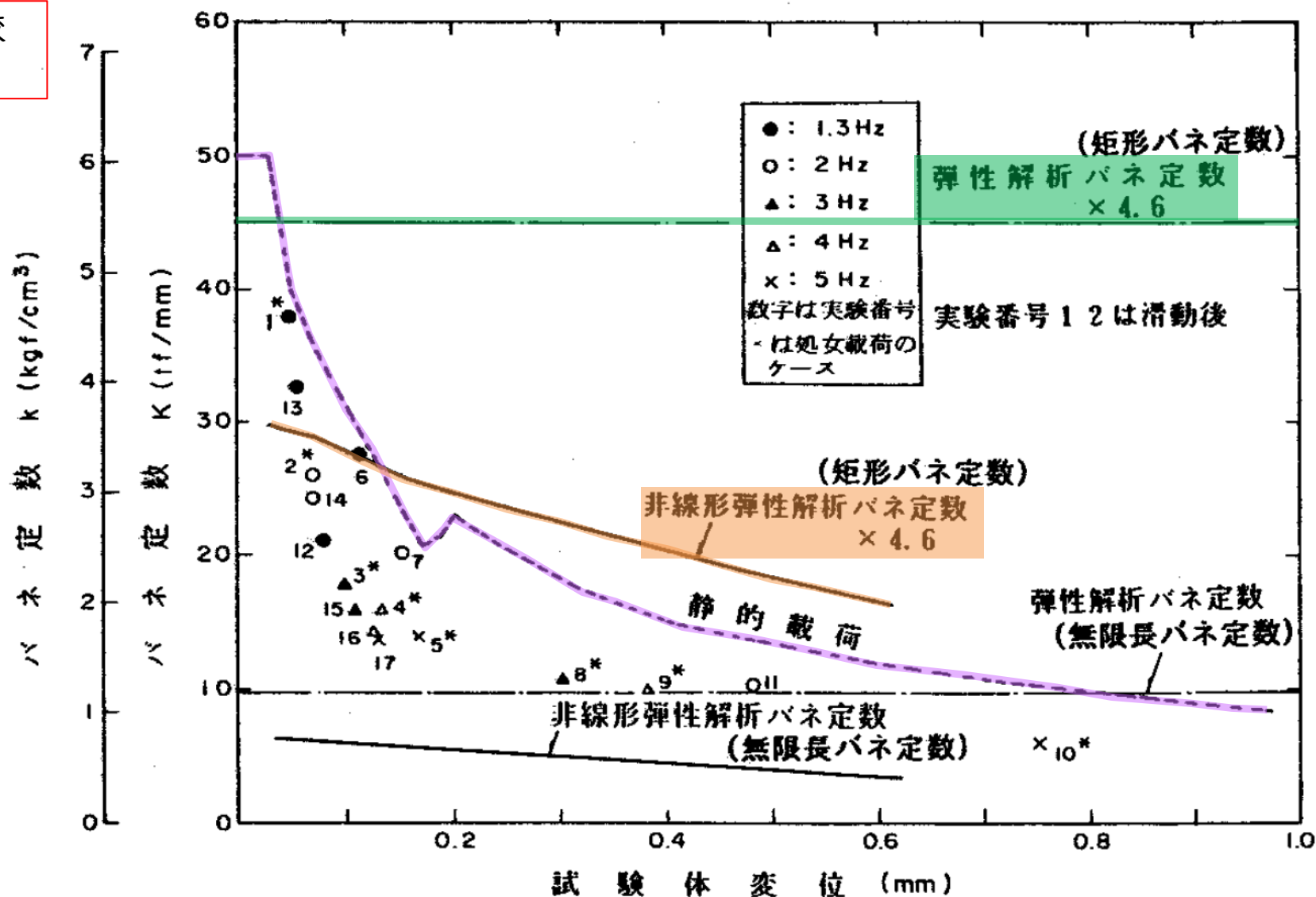


図-8 実験と解析との比較（非線形弾性解析結果）

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。