

土木構造物の 耐震設計基準や健全度評価法 の作成に携わって

令和 3年 8月5日(地震工学委員会)

(株)西村耐震防災研究所

西村 昭彦

令和2年度土木学会功績賞受賞理由

推薦者 地震工学委員会委員長

(推薦理由要約)

橋梁やそれを支える基礎構造物の新しい耐震設計法の開発、特に1995年兵庫県南部地震以降の耐震設計法の進歩に貢献し、さらに基礎構造物の健全度評価・維持管理技術に関する研究成果を上げ、それらの技術体系を構築するなど構造物の耐震技術の向上と鉄道事業の安全性の確保に貢献した。

自己紹介

- 1970年** 国鉄構造物設計事務所勤務
耐震設計指針(案)の作成
応答変位法の基礎構造物への適用
- 1985年** 静岡構造物検査センター勤務
基礎の健全度評価・衝撃振動試験の開発
- 1987年** (財)鉄道総合技術研究所勤務
1992年 同上 耐震・基礎研究室長
基礎設計標準の改訂
- 1995年** 兵庫県南部地震の発生
耐震設計標準の制定

本日の講演内容

これまで、構造物設計事務所ならびに(財)鉄道総合技術研究所で設計の実務や設計法の研究に取り組んできました。それを本日は述べさせていただきます。

主な内容は

- ・兵庫県南部地震の被害とその解析
- ・被害解析等から設定された耐震設計法
- ・基礎の大変位を考慮した設計法

設計法を策定するにあたっては、構造物の挙動を出来るだけ正確に考慮すること、設計は出来るだけシンプルであること等を考えました。しかし、これはまだ道半ばだと思います。

耐震設計標準制定時に起こった 兵庫県南部地震(1995)

- 淡路島北端を震源とするマグニチュード7.3の兵庫県南部地震が発生。土木構造物や建築物等に甚大な被害を与え、優れていると考えられた日本の耐震技術に大きな問題を投げかけた。
- 被害は本震の震央(淡路島)から北東に延び、その範囲は明石市から高槻市に及ぶ。
- とくに被害が顕著であった震度7の地域には、鉄道では阪急神戸線、JR東海道線、阪神本線等があり、大きな被害を受けた。また少し北側にあった山陽新幹線も高架橋が大きな被害を受けた。道路橋の被害も大きかった。

兵庫県南部地震への対応

この地震を受け、各機関はすぐ対応を始めた。
(公)鉄道総合技術研究所(鉄道総研)においてもすぐ次の対応を取った。

① 被害調査および解析

- ・ 構造物の被害への影響要因の調査
- ・ 解析による被害原因の推定
- ・ 鉄道総研は地震災害復旧支援本部を組織し対応

② ①の結果に基づく設計法の提案

- ・ 解析結果に基づく設計手法の作成
- ・ 安全性の照査基準の設定

構造物の被害調査(影響要因の調査)

1. 地震動の特性

振幅の大きさ, 振動数特性, 位相特性など

2. 構造物の特性

固有振動数, 減衰定数, 強度およびじん性(破壊モード)

3. 表層地盤の特性

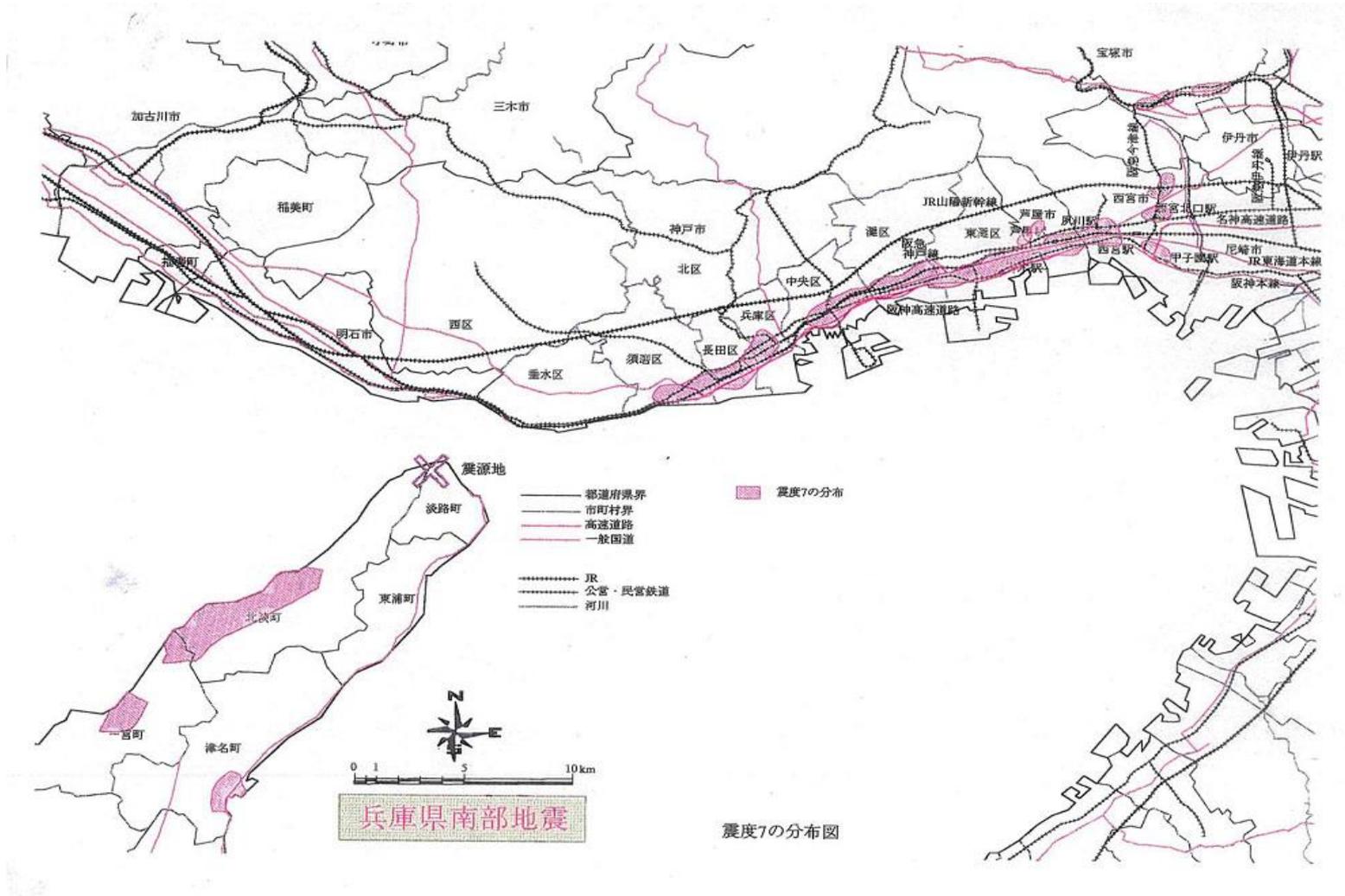
地形の特徴, 土の強度・変形特性, 液状化・側方流動

4. 施工の状況

材料強度, 鉄筋の段落とし

1. 地震動の特性

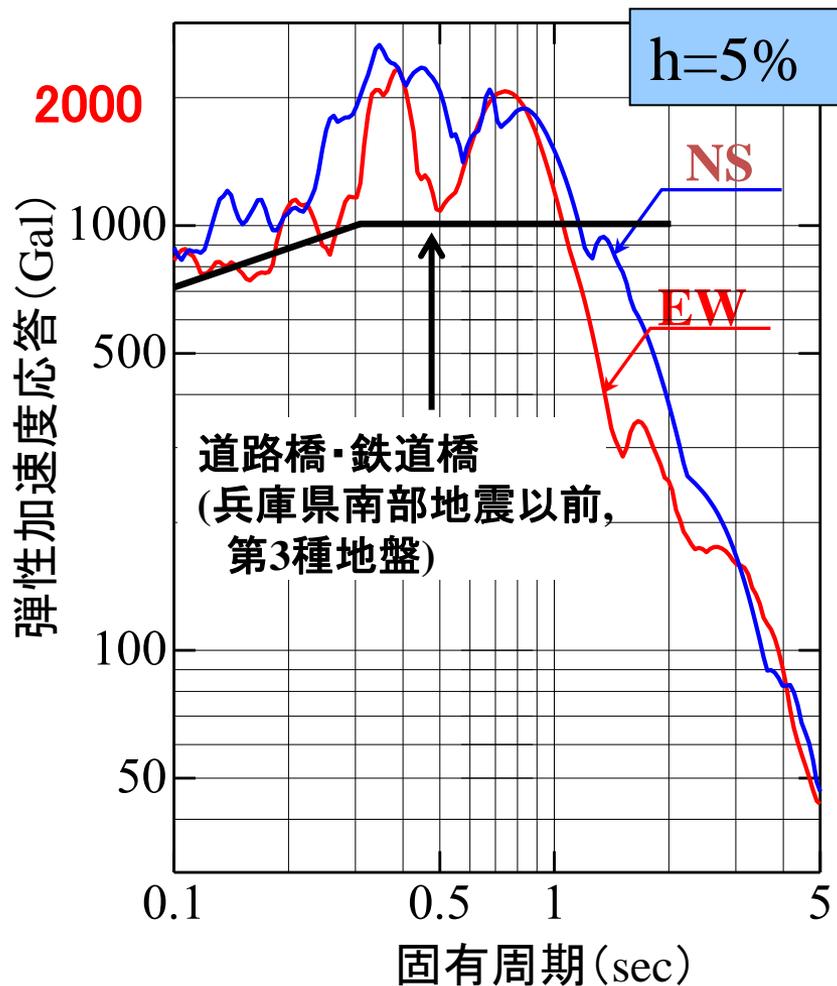
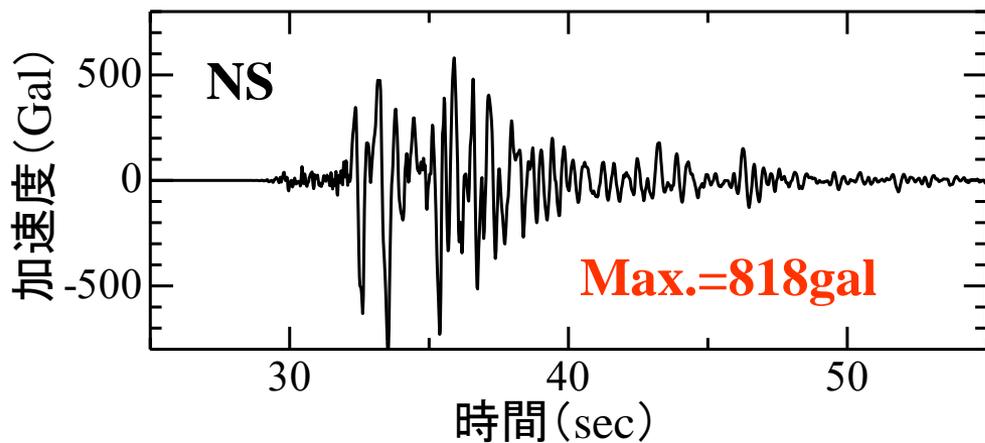
■ 兵庫県南部地震の震央と震度7の地域



兵庫県南部地震による地震動 (神戸海洋気象台)

弾性応答加速度スペクトル

加速度記録



兵庫県南部地震における 構造物被害の主な原因と対応(その1)

【地震動の性状】

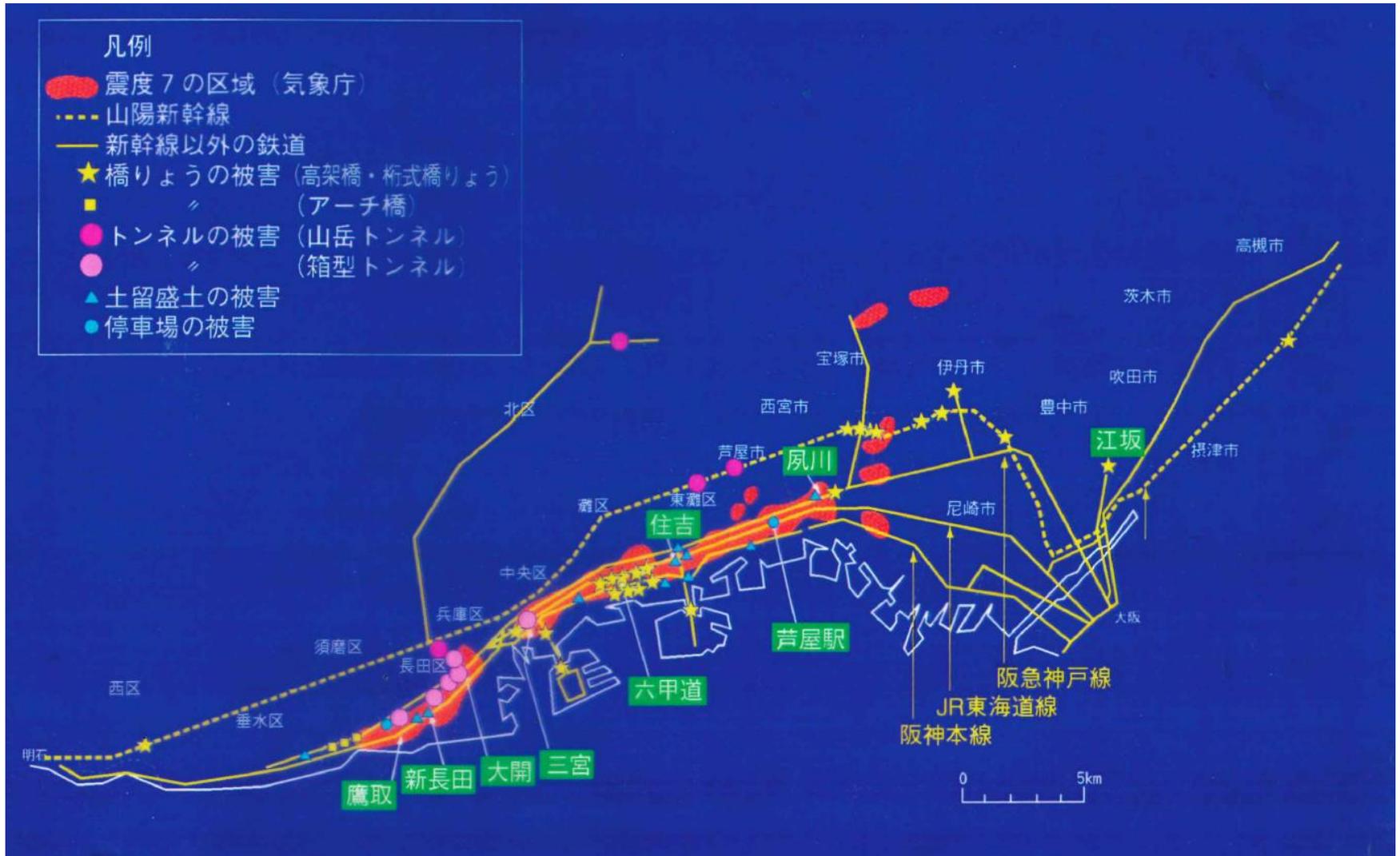
- ・設計で考慮した地震動より遙かに大きな地震動が作用
神戸海洋気象台で818gal
大阪ガス葺合測点で833gal を観測

【対応】

1. 直下型地震動を設計に考慮
2. 再現期間を考慮すると構造物全体が崩壊しないことを目標

2. 構造物の特性

鉄道の主な被害の分布状況



■ 鉄道高架橋の被害



上空から見た状況



柱の破壊状況

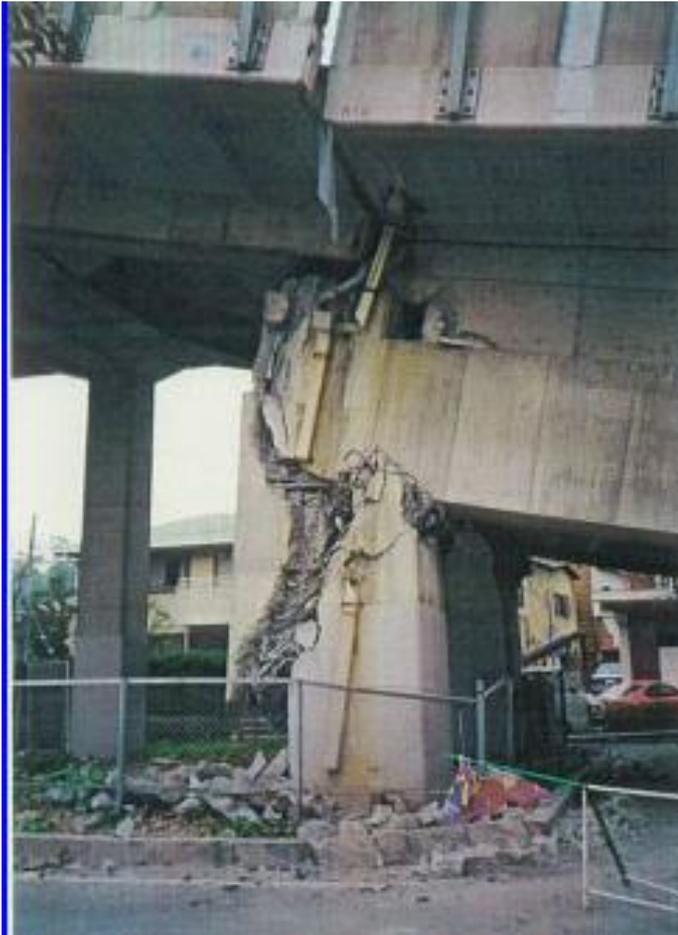


2層ラーメン高架橋の左ブロックは中層梁の下部の柱が破壊。右ブロックは上部の柱が破壊した。

高架橋 すさまじい 柱の破壊



ラーメン橋台の破壊

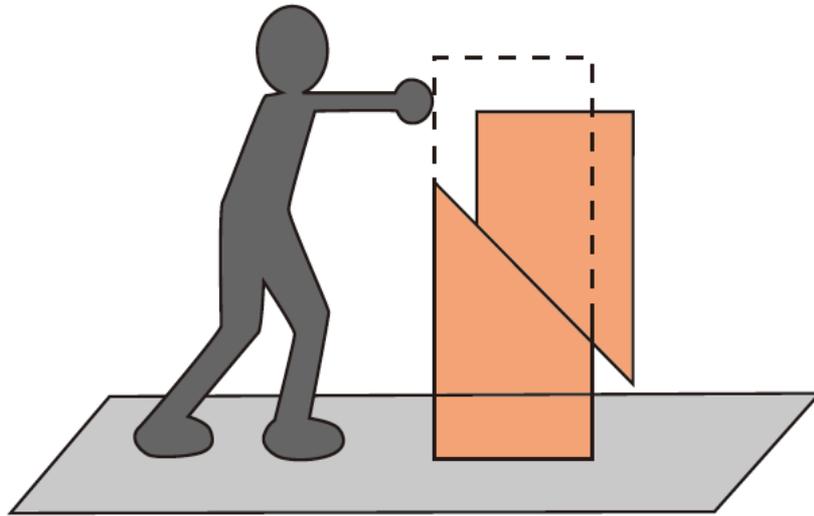


地下鉄の駅の中柱の破壊状況

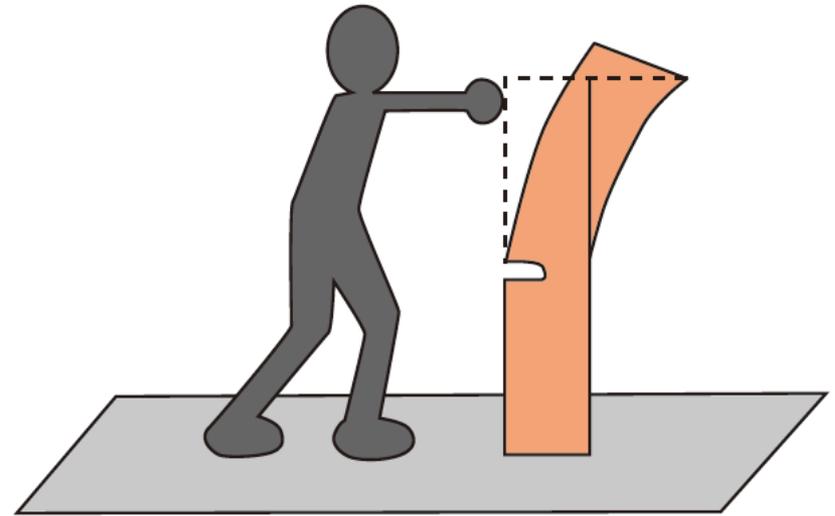


破壊した中柱は、柱上端
または下端部で、かぶり
コンクリートが剥落し、鉄
筋が座屈

高架橋の柱の破壊形態



せん断破壊



曲げ破壊

高架橋の被害(せん断破壊)

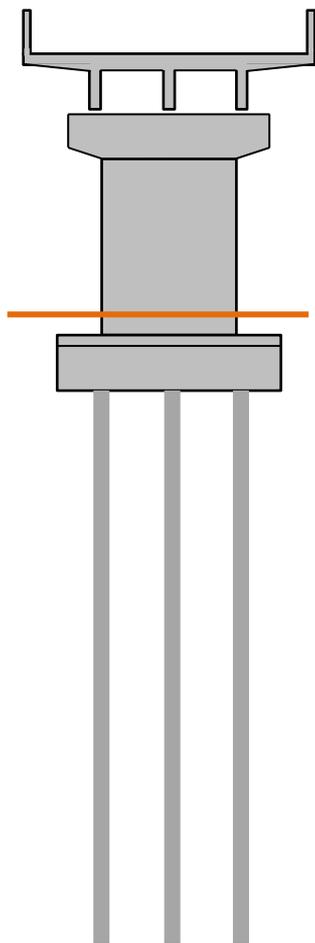


高架橋の被害(曲げ破壊)

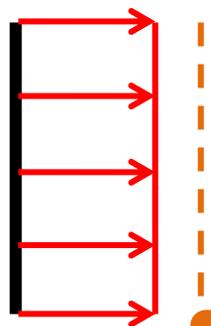


構造物の破壊形態による破壊状態の違い

橋脚に生じる断面力

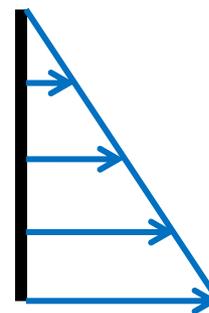


せん断力分布



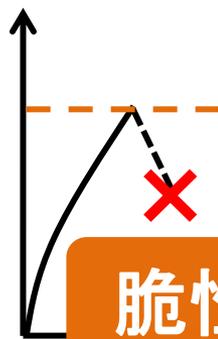
せん断耐力

曲げモーメント分布



曲げ降伏耐力

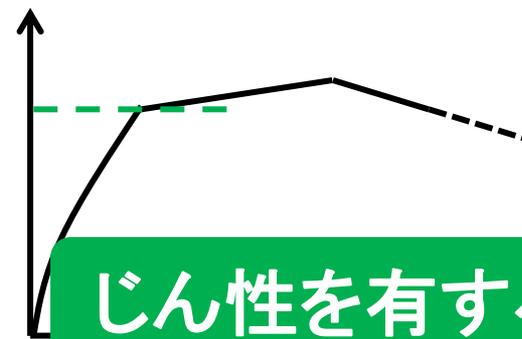
せん断力



脆性的に破壊

変位

曲げモーメント



じん性を有する

曲率

観察による被害の種類と程度のカテゴリ

SC



SB



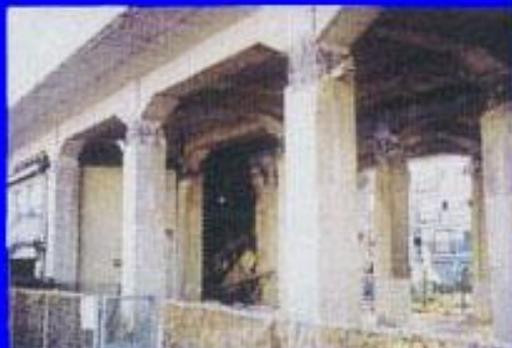
SA



MC



MB



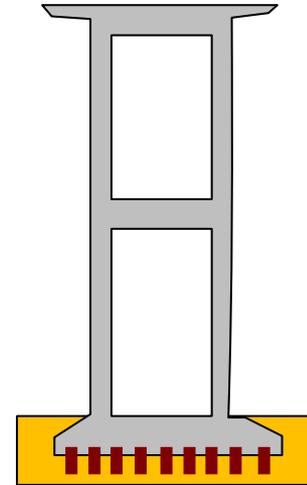
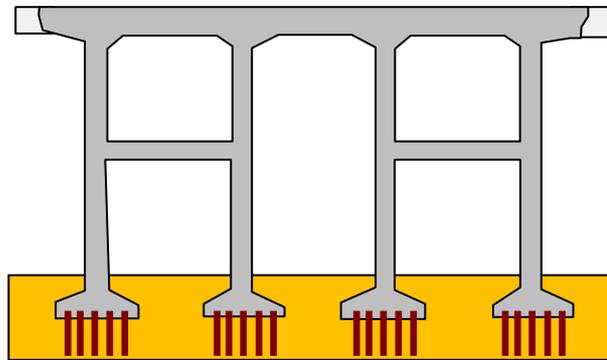
MA'



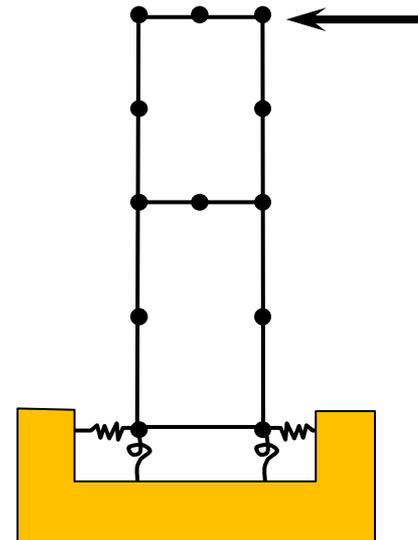
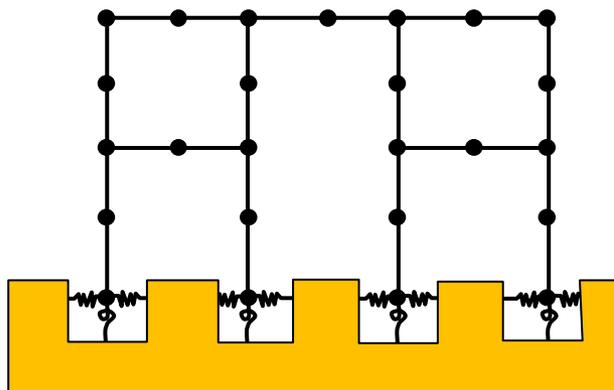
S:せん断による損傷 M:曲げによる損傷

高架橋のモデルと静的非線形解析

対象構造物



解析モデル



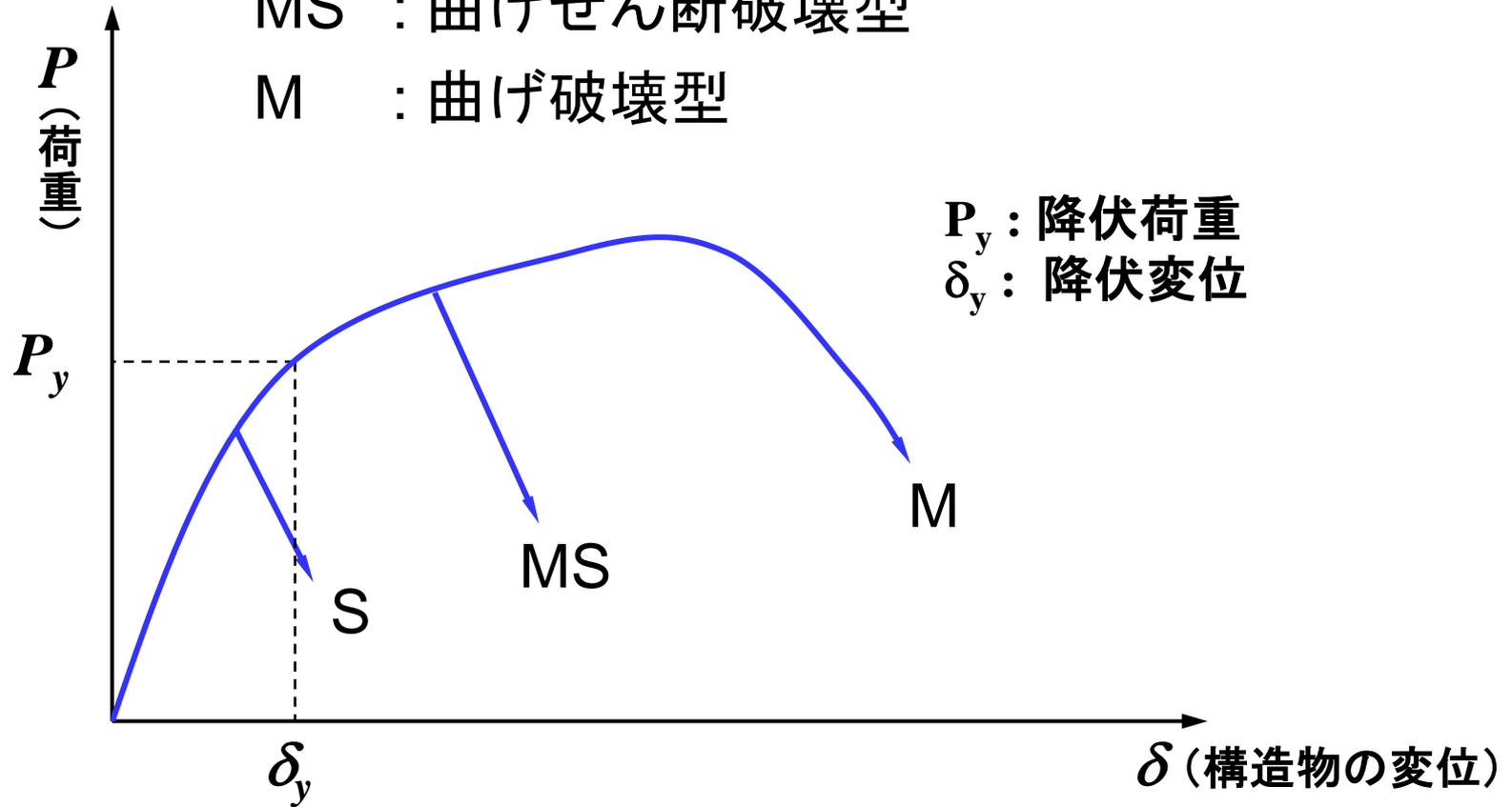
地震力を高架橋に静的に載荷し、荷重と構造物の変位の関係を求める

解析結果と構造物の破壊タイプ

S : せん断破壊型

MS : 曲げせん断破壊型

M : 曲げ破壊型

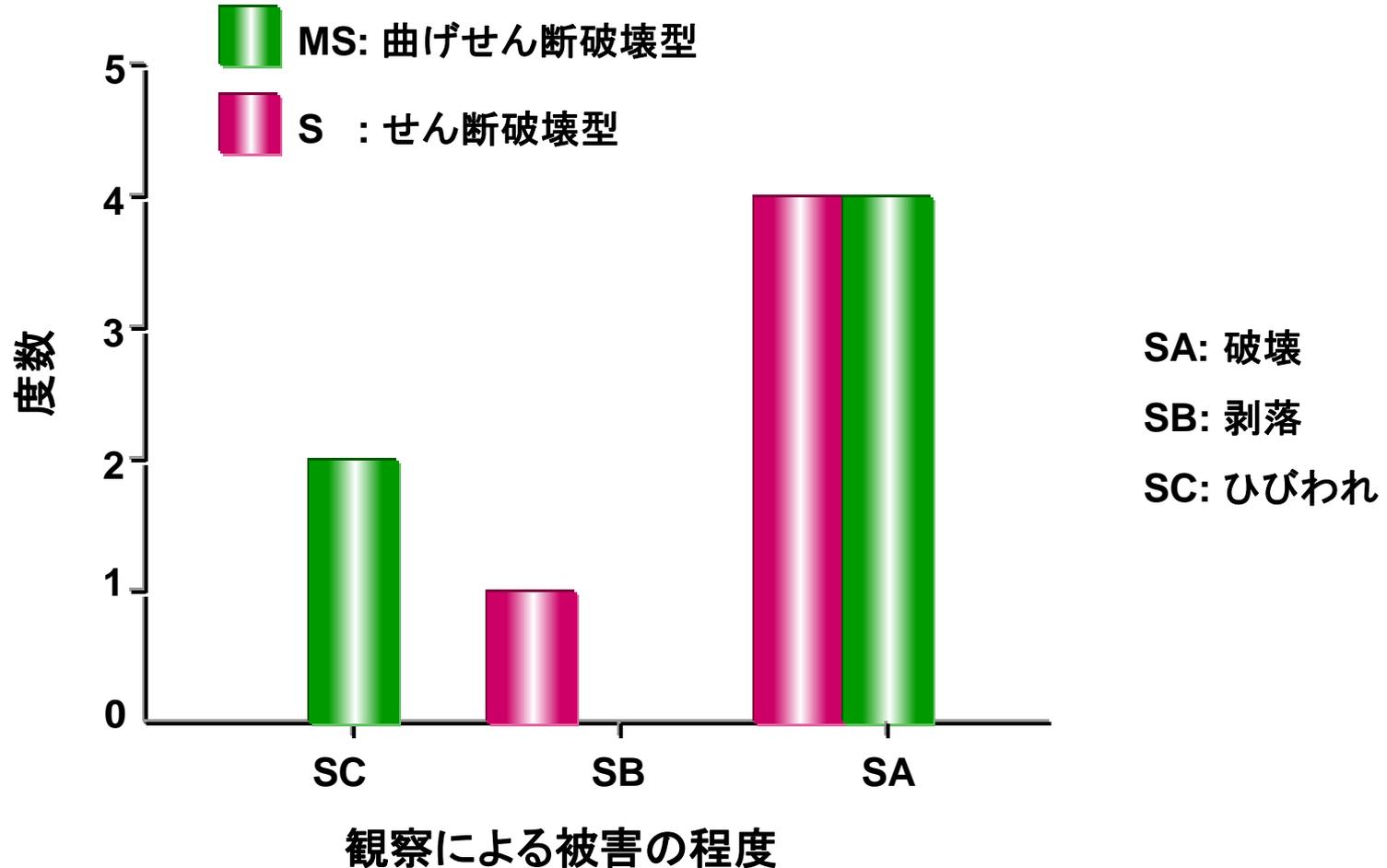


P_y : 降伏荷重

δ_y : 降伏変位

構造物の荷重～変位曲線

観察による被害分類と解析上の破壊タイプの関係 (山陽新幹線高架橋)



兵庫県南部地震における 構造物被害の主な原因と対応(その2)

【構造物の破壊形態】

- ・崩壊、落橋など被害の大きかった構造物の部材は主にせん断破壊型であった。せん断耐力(許容応力度)も現在より大きい値を用いていた。

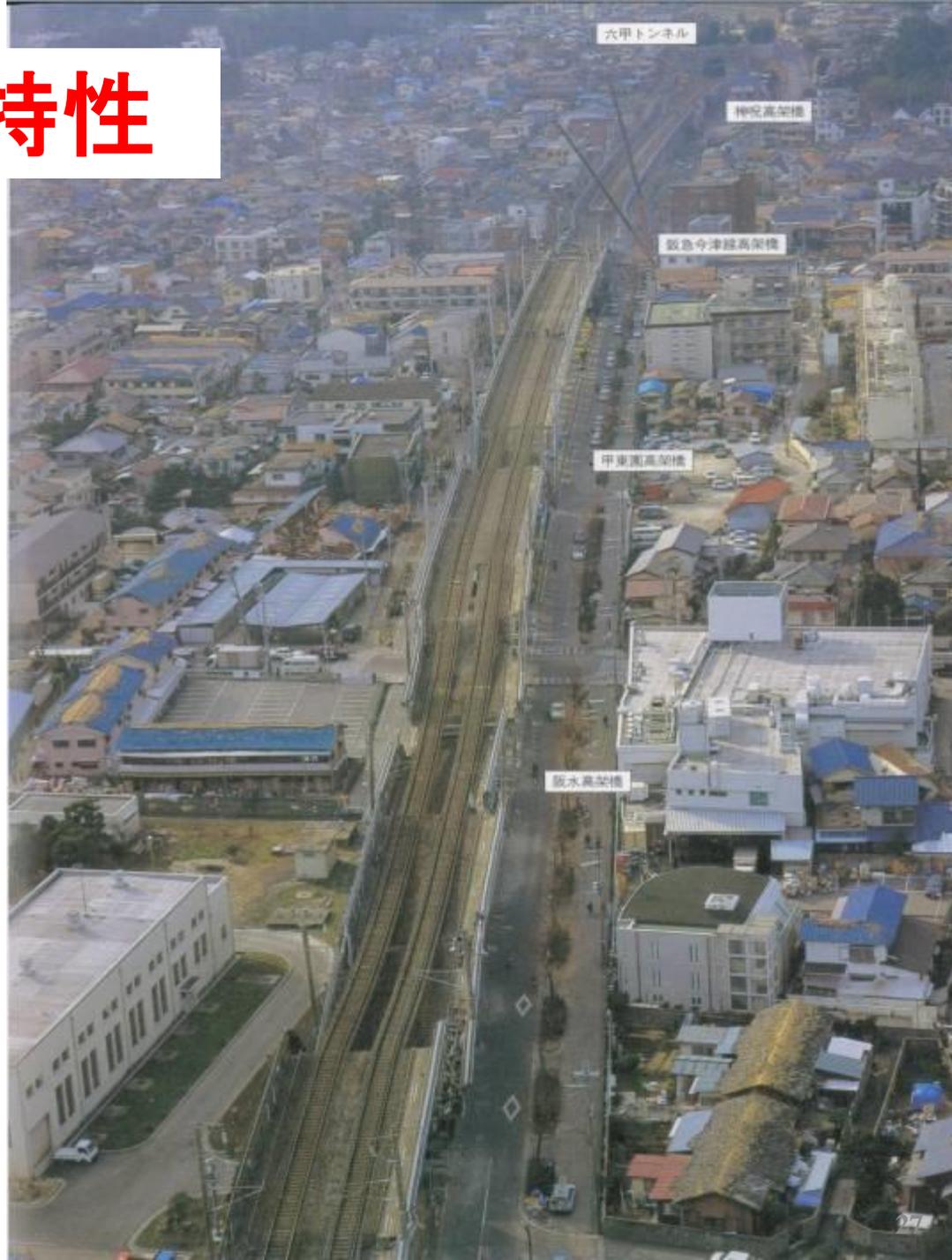
【対応】

1. 主要な部材は破壊形態を曲げ破壊型にする
2. 地震動の再現期間および経済性を考慮すると部材は変形性能での評価が合理的
3. 既設構造物は鋼板巻き等でせん断補強を実施する

3. 表層地盤の特性

■ 上空から見た 鉄道路線の 被害状況

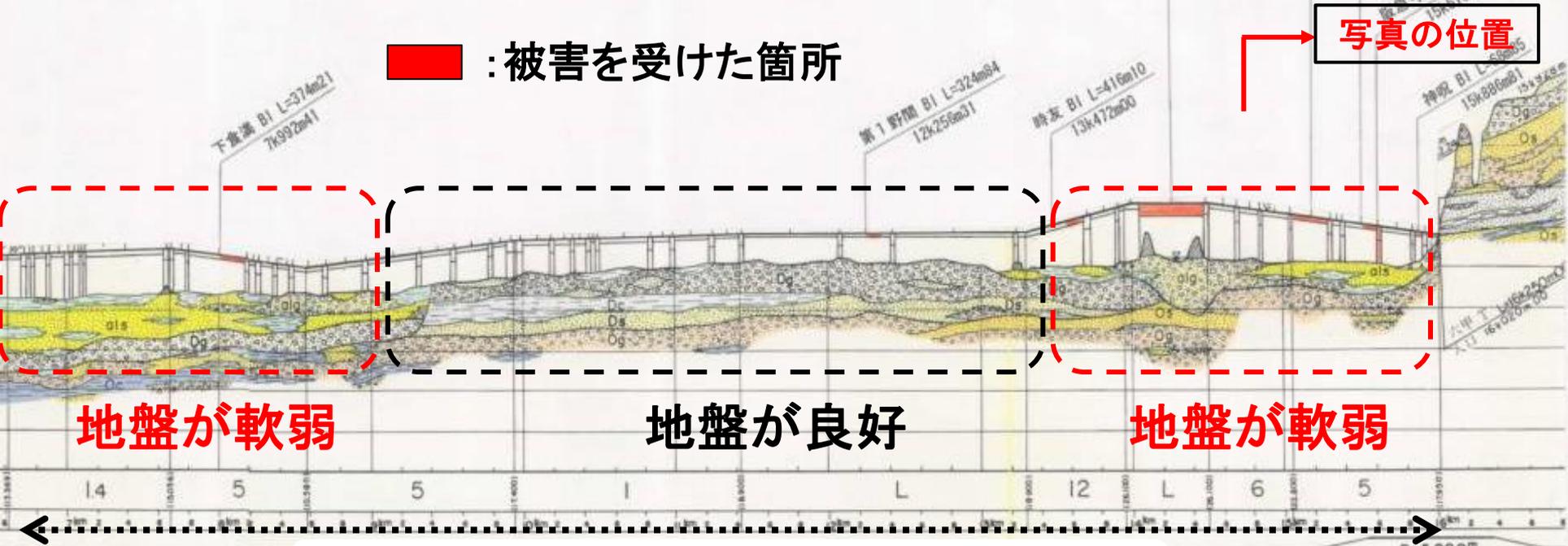
被害は連続して生じたのではなく、この写真のようにとびとびに生じた



■被害を受けた区間の地質縦断図

■ : 被害を受けた箇所

写真の位置



地盤が軟弱

地盤が良好

地盤が軟弱

上部構造物の形式・諸元は概ね同一

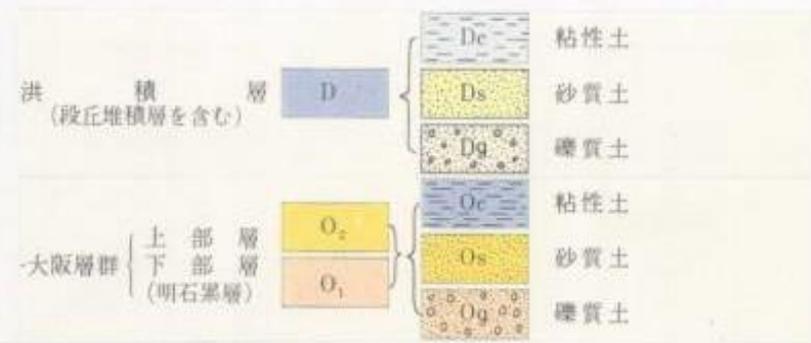
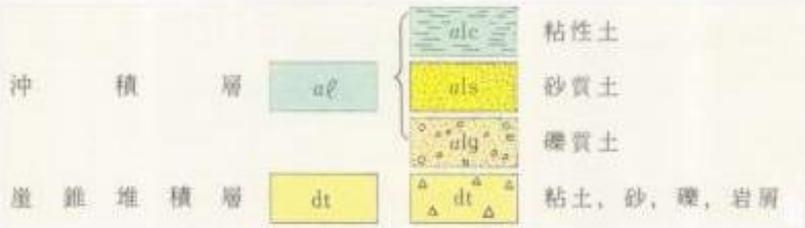
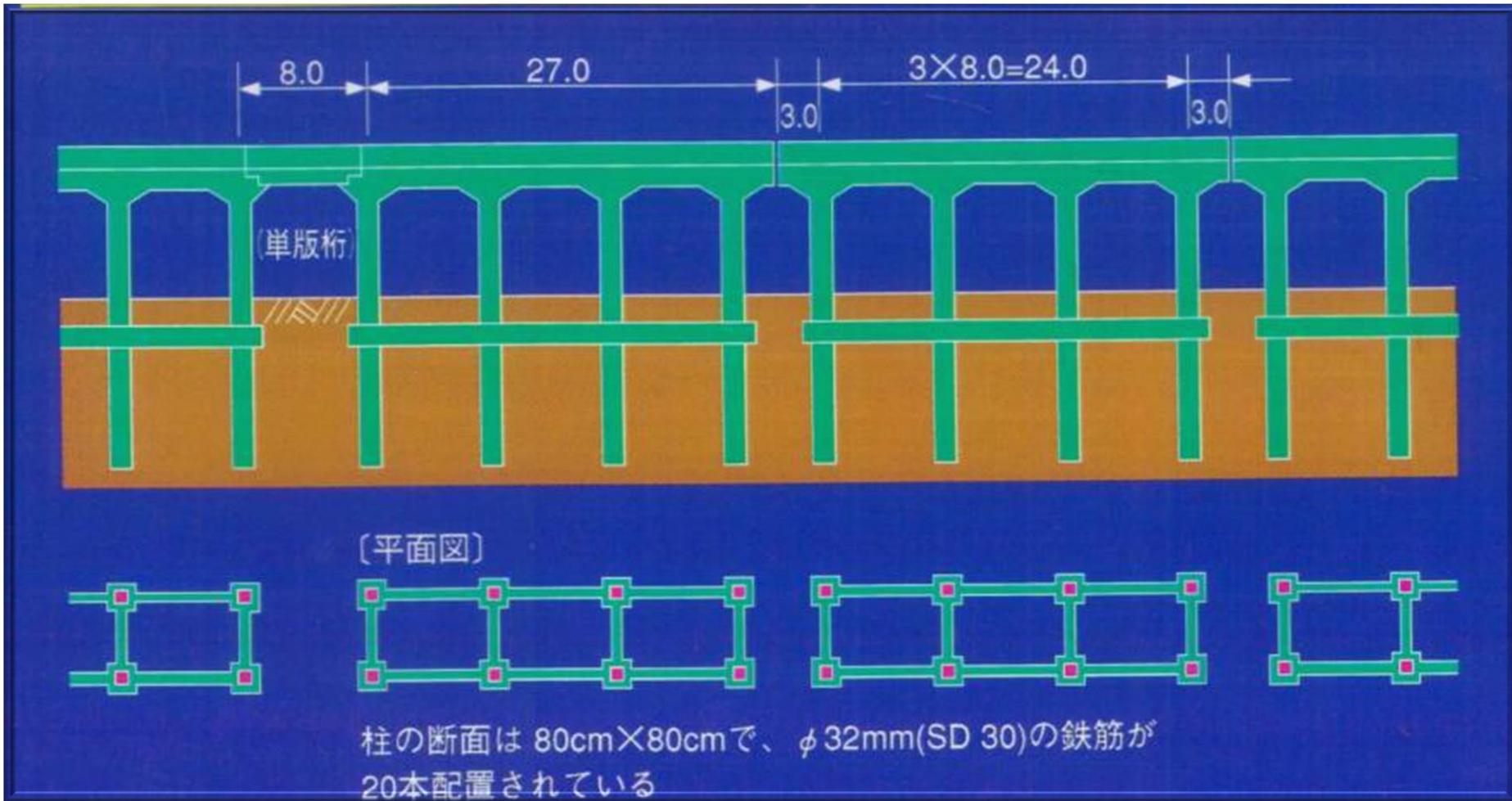
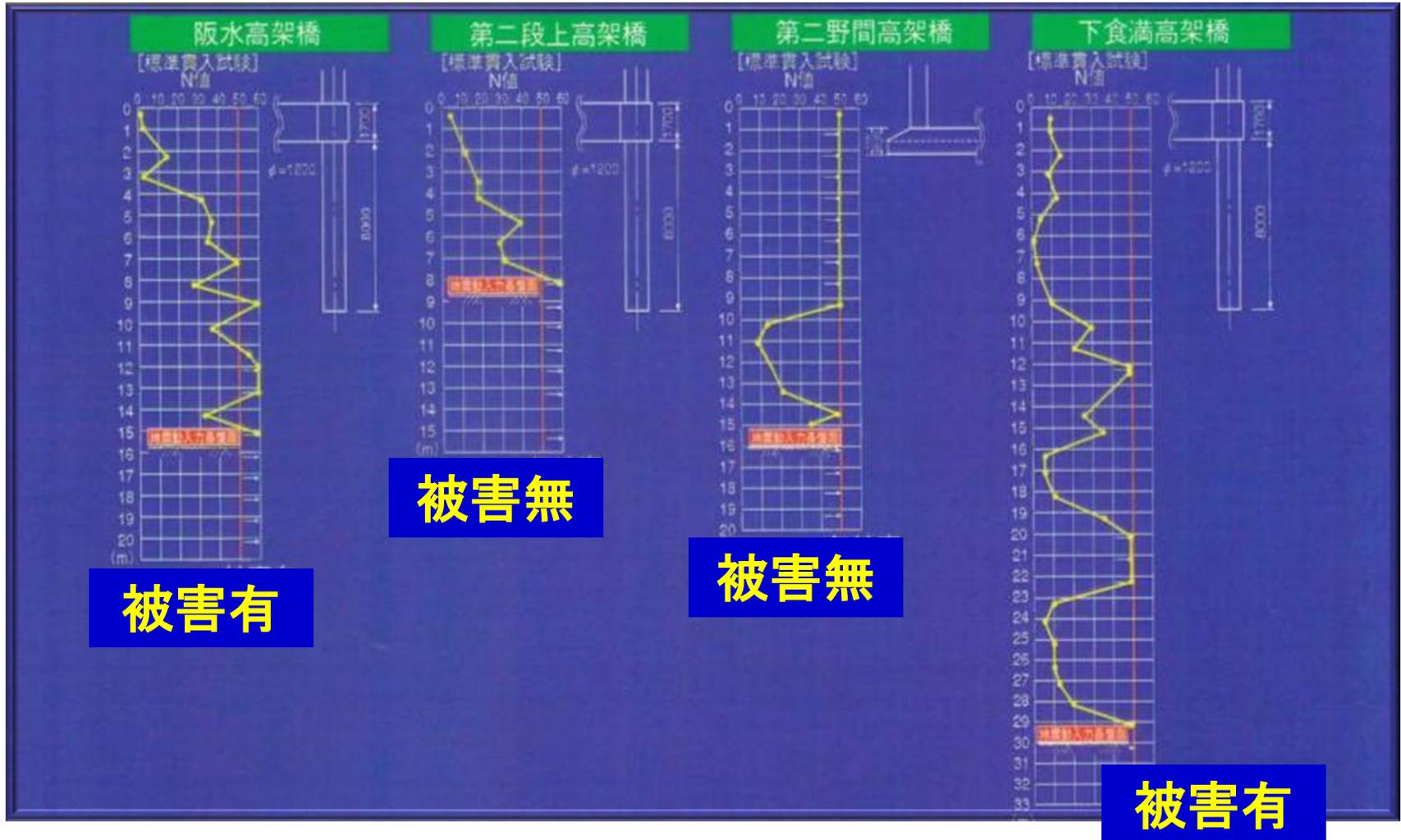


図3.1.4 山陽新幹線新大阪～新神戸間地質縦断図(新幹線竣工図より)

被害を受けた高架橋の概要(杭基礎)

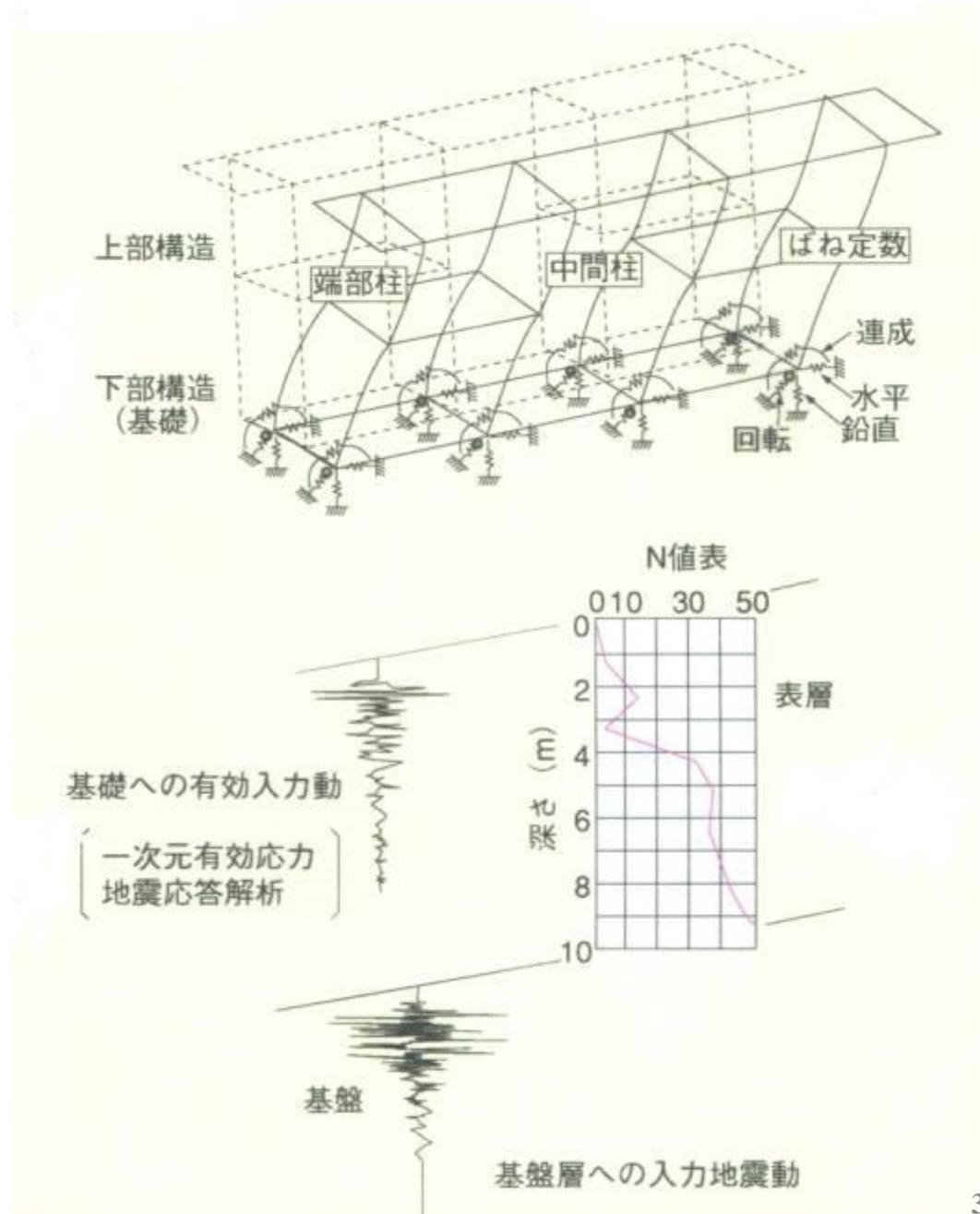


土質柱状図および基礎工

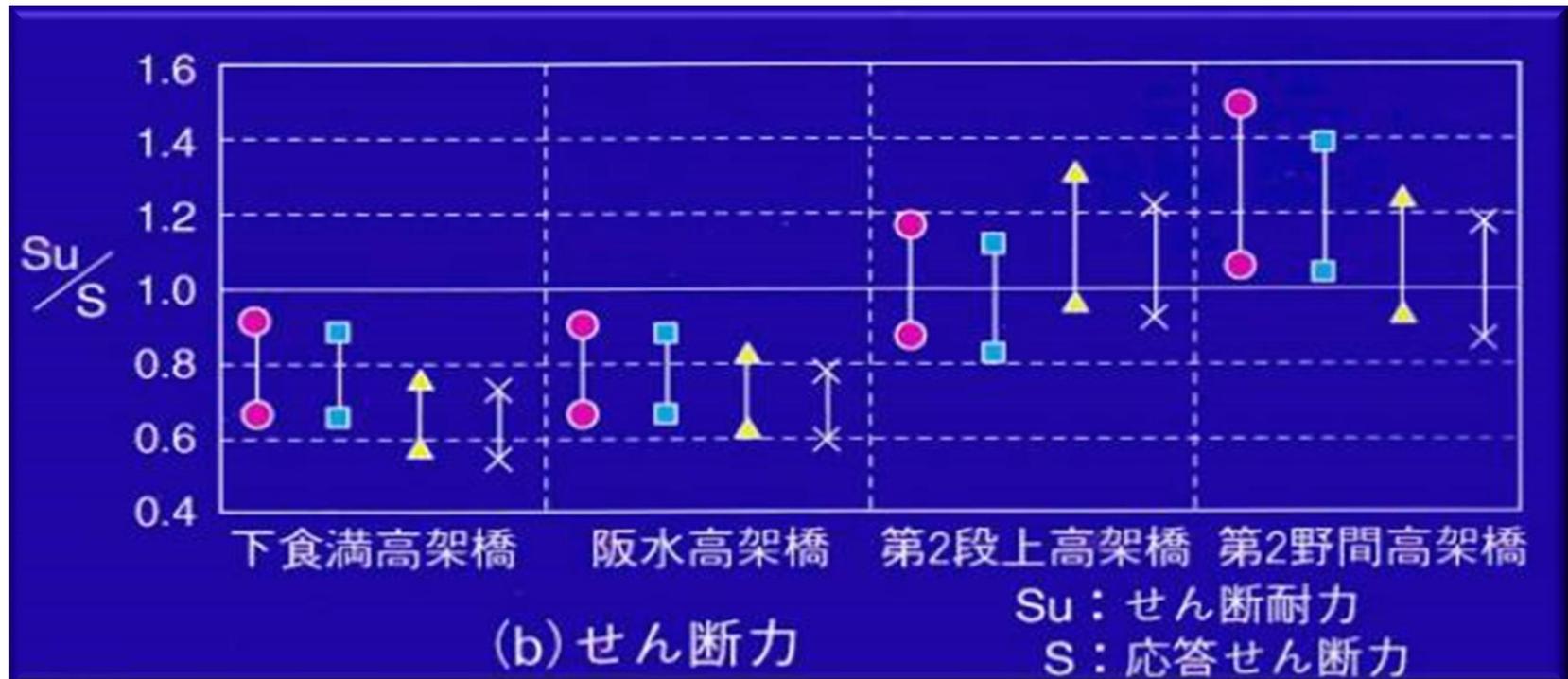


解析のイメージ

- ・基盤に地震動を入力し、
表層地盤の地震動を
計算する
- ・その波形を構造物に作用
させる



高架橋に生じた地震時せん断力と耐力の比率



小被害であった左二つの高架橋は地震による発生せん断力が耐力より小さかったが、破壊した右二つの高架橋はその値が耐力より大きかった。

兵庫県南部地震における 構造物被害の主な原因と対応(その3)

■隣接高架橋の被害程度の相違

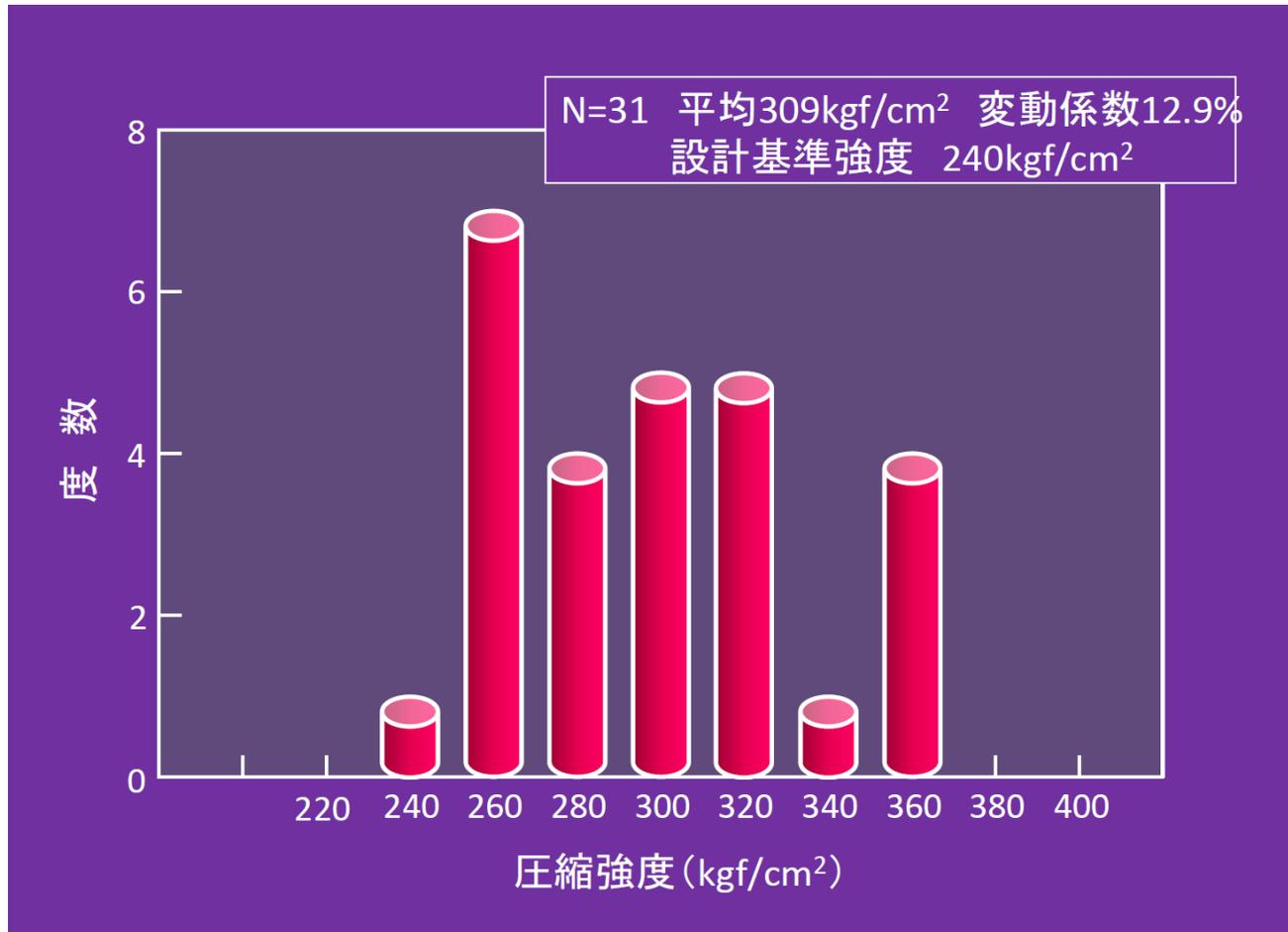
- 同じような構造形式を持つ隣接高架橋で、被害程度に違いが生じた。これは、主として表層地盤の性状の相違が影響していると推定される。
- このように地盤の性状の評価は重要である。

【対応】

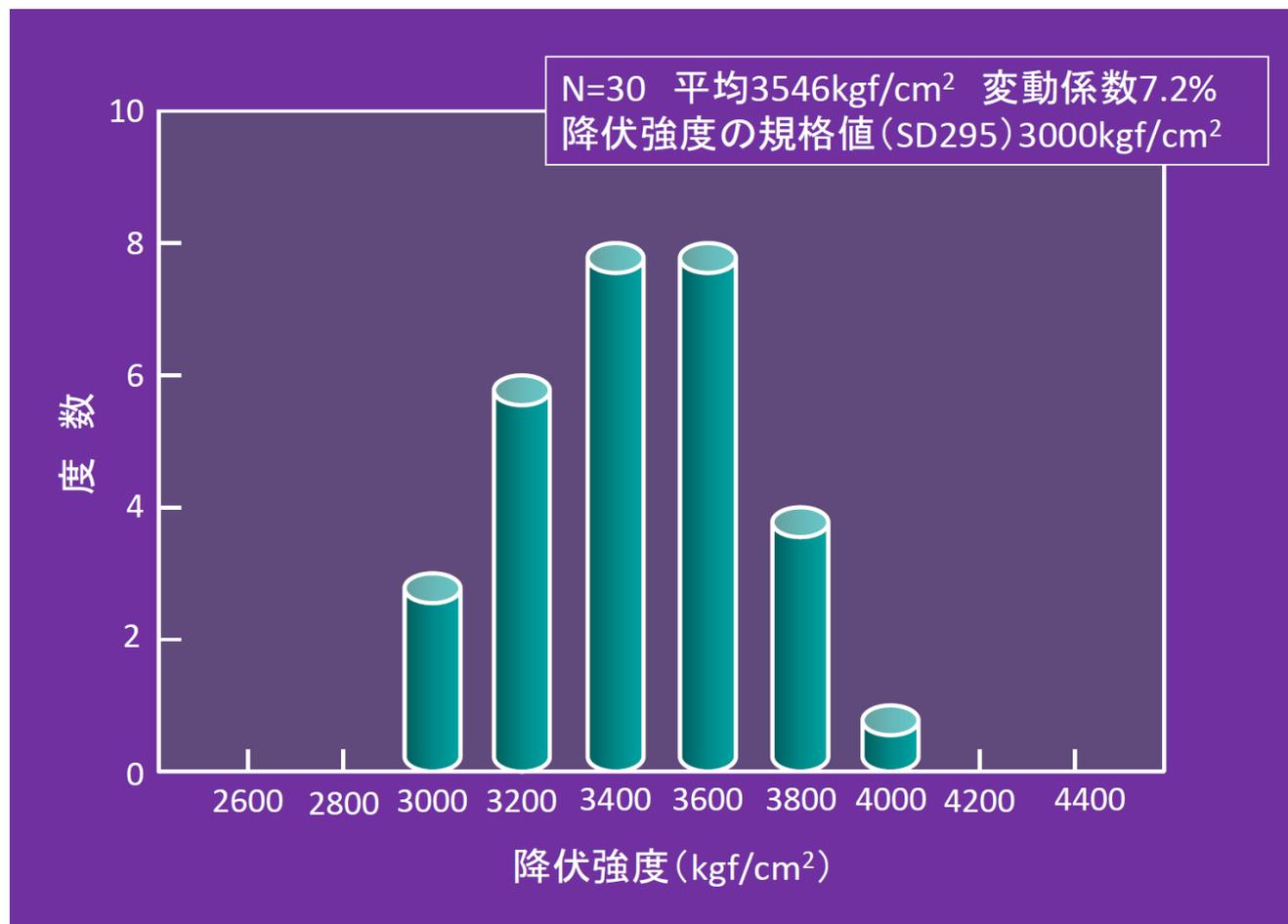
1. 表層地盤の性状を精度良く把握
2. 地震動の評価は地盤の動的解析を行うのがよい。

4. 施工の状況等(材料強度他)

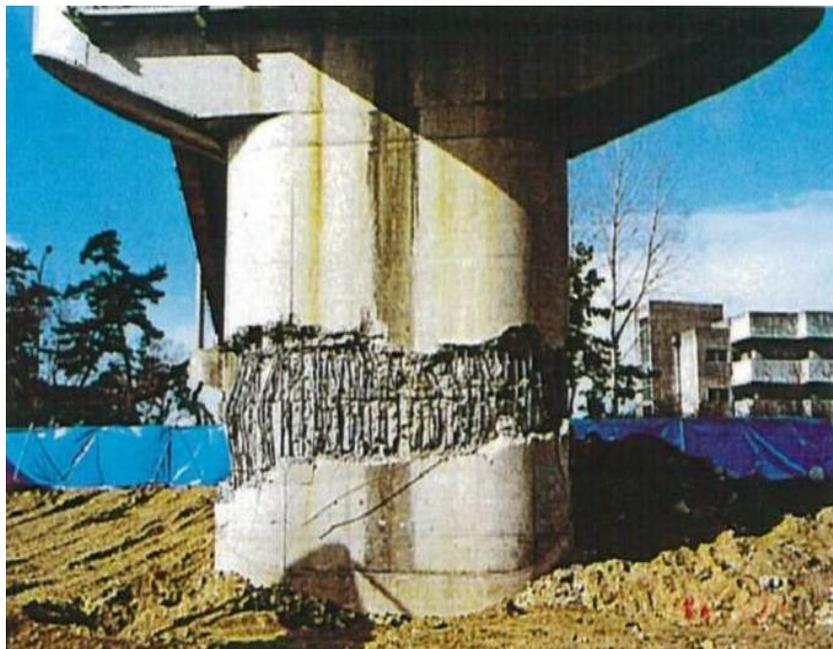
材料特性(コンクリートの圧縮強度)



材料特性(主鉄筋の強度)



鉄筋の段落とし部で破損



軸方向鉄筋の段落とし部のコンクリートが剥落

材料強度等のまとめと対応

材料強度等については、鉄道総研の調査では、ばらつきはあったものの、ほぼ所定の品質が保たれていた。また段落とし部は切断位置を高くすること等で対応

地震後の建造物の健全度調査における衝撃振動試験の活用

衝撃振動試験は目視による確認が難しい基礎を含めた高架橋全体が列車走行上問題ないかを調査する方法であり、復旧した高架橋や被災区域内にあり、無被害または小被害の建造物で実施し健全度判定(使用の可否)をした。

この試験法はもともと基礎の健全度判定のために開発したもので、ジェイアールや民鉄等で活用されてきた非破壊検査法である。

被害調査においてこの試験法が建造物の健全度判定に適用されたことで、掘削等の大がかりな基礎の調査が必要なくなり、列車の運行までに要する時間が大幅に短縮された。

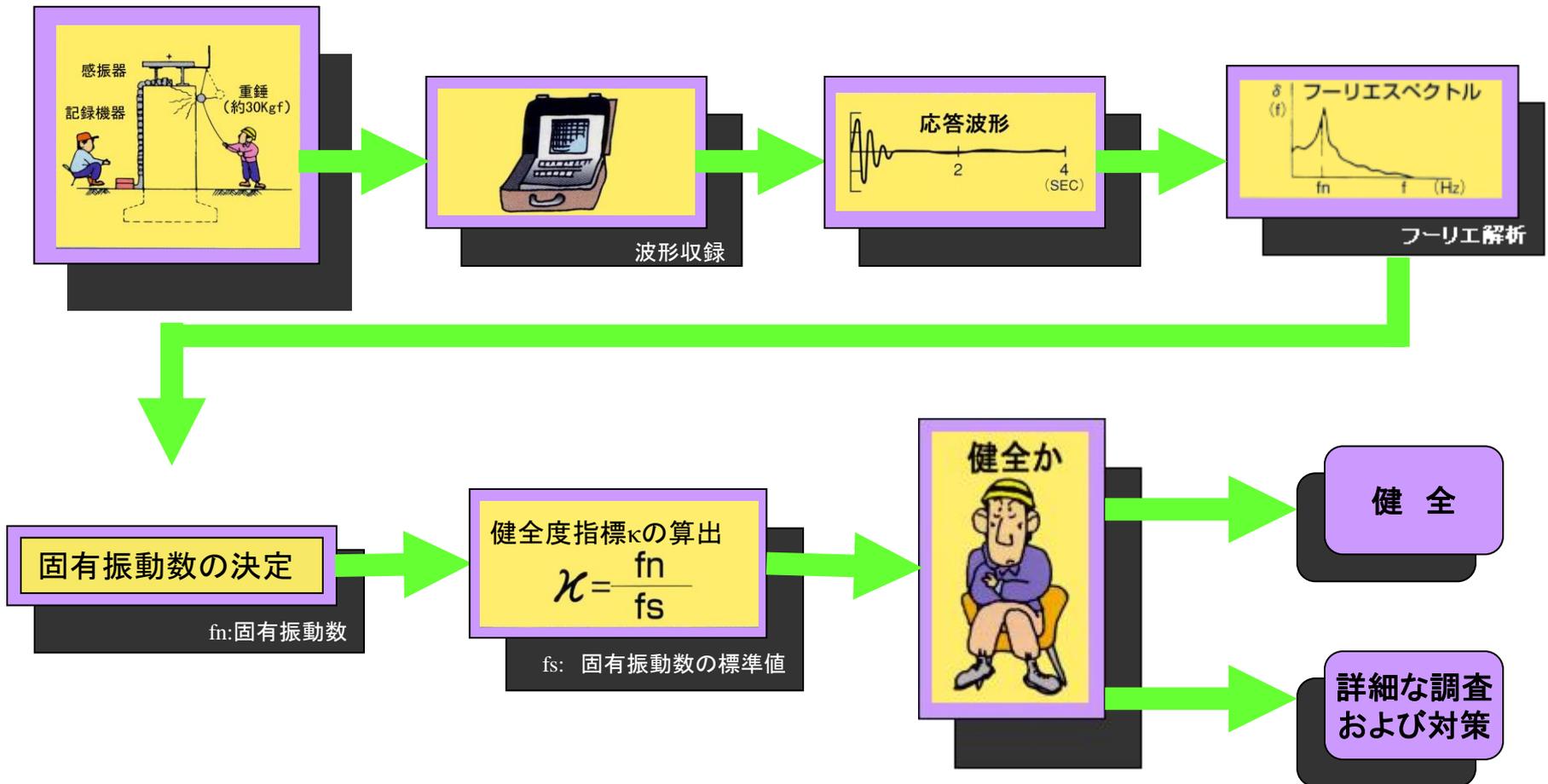
衝撃振動試験とは

重錘(30kgf程度)で橋梁を打撃し、その応答から構造物の固有振動数を求め、それに基づいて橋梁の健全度を判断する非破壊試験法である。

衝撃振動試験は精度のよい試験法で、以下の特徴がある。

- 橋梁の健全度を固有振動数で判定する。
- 試験は簡易に実行できる。(短時間で測定可能)
- 正確に固有振動数を測定する。
- 目で見えない基礎の健全度も正確に判定できる。
- 効率が良いため、安価に実施できる。

衝撃振動試験による橋梁の健全度判断手順



衝撃振動試験開発の目的

掘削等をしないと目で直接みて検査できない
基礎を含む橋梁等構造物の健全度を

**定量的に
精度よく**

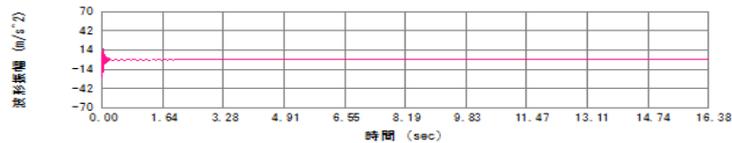
判定するための検査法の開発。

そのためには重錘を用いて構造物を振動させ、
その波形から固有振動数をもとめる

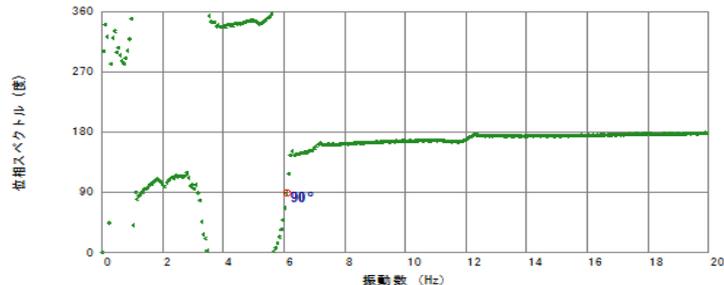
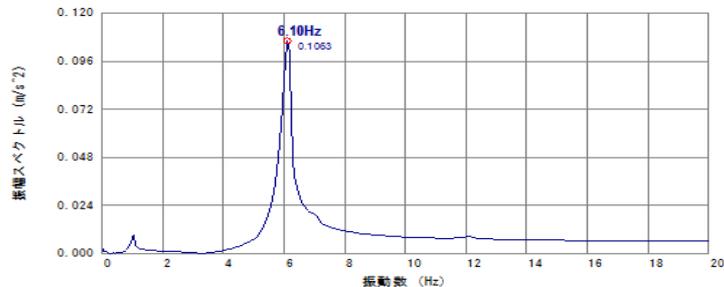
固有振動数の決定法

Ch1 トリガ : Ch1 電柱CASE1-1砂入れない状態 <NS-U1-FREE-2 (sum)>

【重ね合わせた波形】



【フーリエスペクトル】



時刻歴波形(加速度波形)

振幅スペクトル

位相差スペクトル

固有振動数は次の二つで決定する。

- ①振幅スペクトルの山(周囲と比べて高い点:卓越した点)
- ②位相差スペクトルが右上がりになり90度を示す点

衝撃振動試験の様子



衝撃振動試験による健全度判定方法

これまで、多くの橋梁やラーメン高架橋の計測値があり、それから、判断手順(P39)で示したように、基礎の種類、柱や橋脚の高さ、スパン別等の要素で構造物が健全な場合の固有振動数の標準値を作成していた。

これに山陽新幹線の計測値を加えて、標準値を補正し、その値と比較することで、健全度を判定した。

判定基準はこれまでの経験や解析等を踏まえ、計測値が標準値の0.7以上あれば使用可能と判断した。

地震被害の原因と対応に基づく 耐震設計法作成の目標(1)

1. 耐震設計にあたって、震度という多少曖昧さのある値を用いるのではなく、地震動をそのまま作用させること。

さらに、兵庫県南部地震のような大きな地震動に耐えるには構造物の設計に非線形を採用すること。

地震動は土木学会の提言にあるレベル1、レベル2の地震動を考慮すること。

また、地震動の入力位置は設計基盤面とすること。

地震被害の原因と対応に基づく 耐震設計法作成の目標(2)

2. 地震動を基盤面入力とすることにより、これまで上部工に生じる荷重(慣性力等)で上部工を設計し、それで生じた荷重を基礎が支えるとした設計法をあらため、上部構造、下部構造を一体で設計すること。

また、必要であれば地盤も一体として解析すること。

そのために必要な事項(例えば解析プログラム)を整備すること。

新しい耐震設計法の概念

目標に基づいて策定した耐震設計法の概念を次に示す

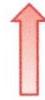
- ① **地震動は設計基盤面で設定**
兵庫県南部地震レベルの内陸型地震動を考慮
- ② **表層地盤の特性を詳細に評価**
地盤の動的解析で表層地震動を評価
- ③ **応答値の算定は動的解析法**
上部構造および基礎構造の一体解析
- ④ **構造物の安全性は部材のじん性を評価**
主要な部材は曲げ破壊型とする

耐震設計のイメージ

耐震安全性の照査



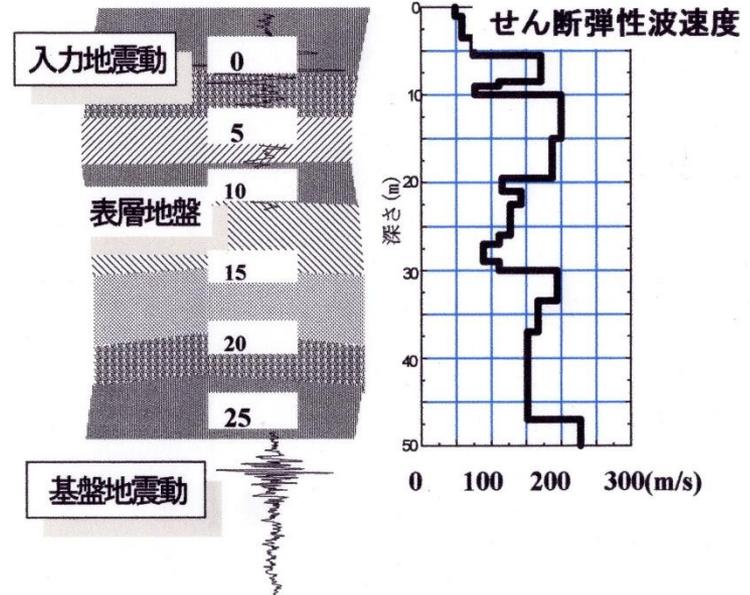
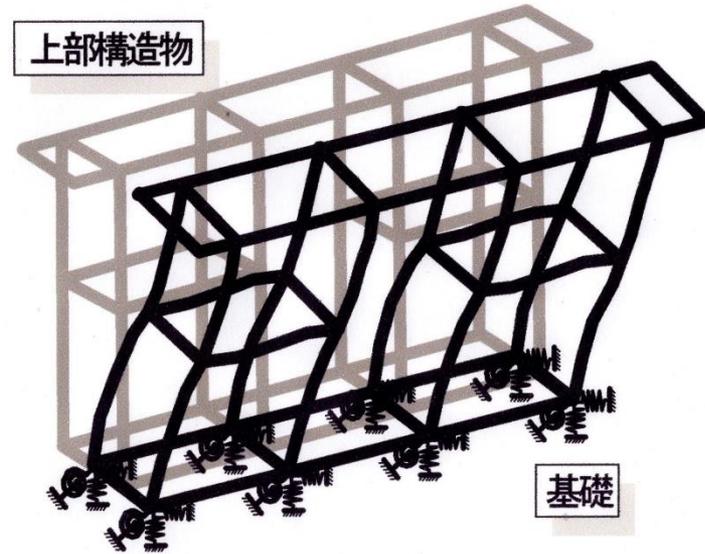
構造物の応答値の算定



表層地盤の評価



入力地震動の設定



耐震性能照査の流れ

① 目標とする耐震性能の設定

② 地盤条件, 設計地震動等の設定

構造物の解析条件の設定(断面, 荷重等)

③ 構造物のモデル化

④ 耐震性能の把握

⑤ 応答値の算定

⑥ 耐震性能照査

終了

照査を満足しない場合は再設計

構造物の耐震性能の考え方

耐震設計を行うにあたってはまず構造物に要求される耐震性能を定める必要がある。

1) 構造物の耐震性能

- ・耐震性能は3つ（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）
- ・主として地震後の復旧の難易性に対する性能

2) 耐震性能の表現

- ・部材の損傷レベル
- ・基礎の安定レベル

構造物の耐震性能

耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない

耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる。

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない

部材の損傷

損傷レベル 1：無損傷

損傷レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷

損傷レベル 3：補修が必要な損傷

損傷レベル 4：補修が必要で、場合によっては、部材の取替が必要な損傷

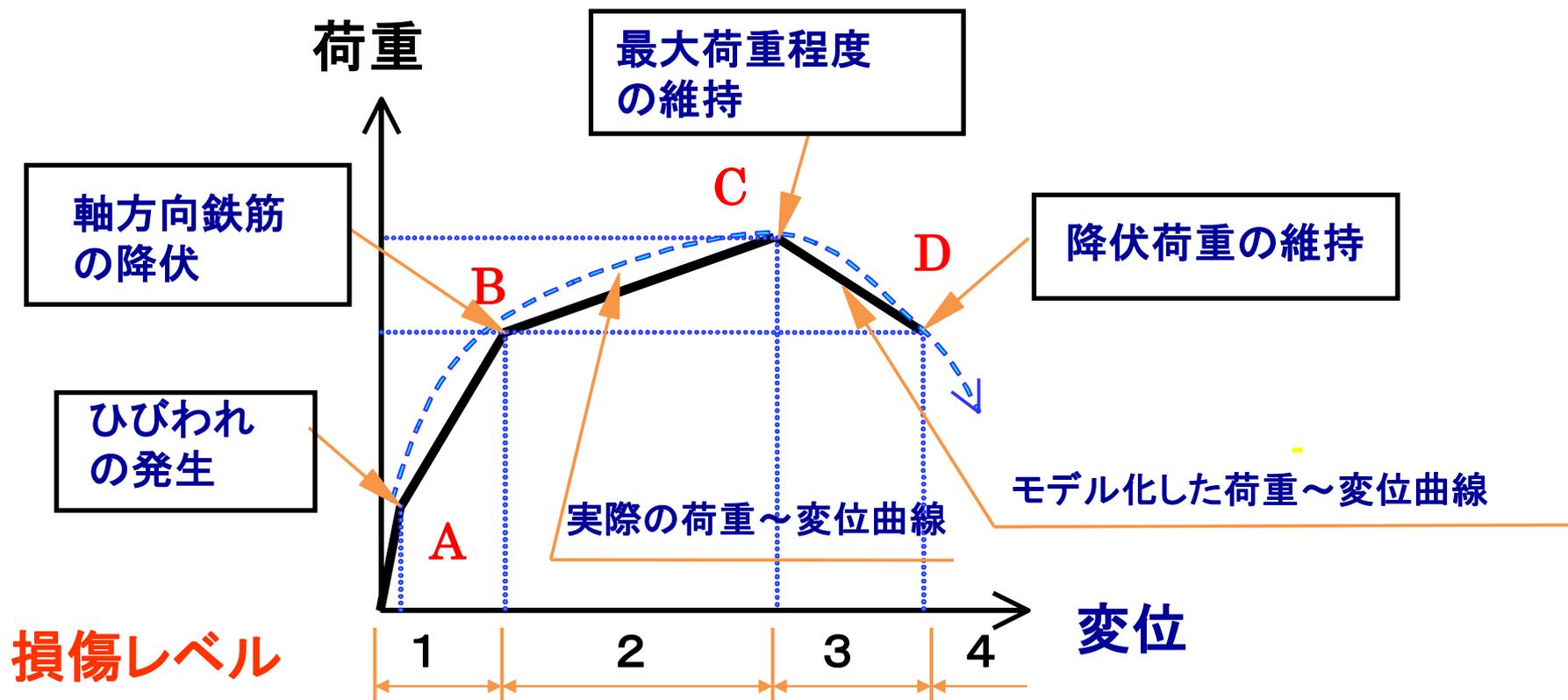
基礎の安定

安定レベル 1：無損傷（作用荷重が降伏支持力以下）

安定レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷

安定レベル 3：補修が必要で、場合によっては構造物の矯正等が必要な損傷

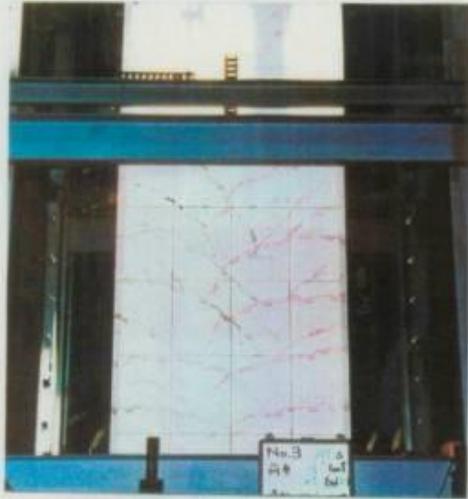
部材の損傷レベルの考え方



鉄筋コンクリート部材の荷重～変位曲線(低軸力下)

高架橋の柱における損傷レベルの状態

損傷度と変形性能の関係(1)



損傷レベル1

損傷度と変形性能の関係(2)



損傷レベル2

損傷度と変形性能の関係(3)



損傷レベル3

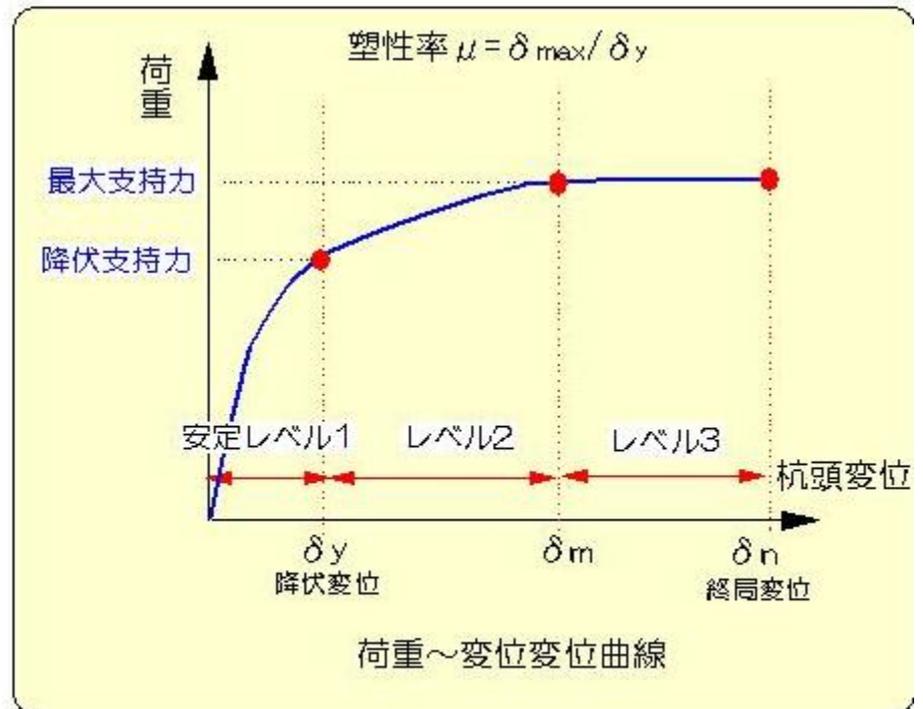
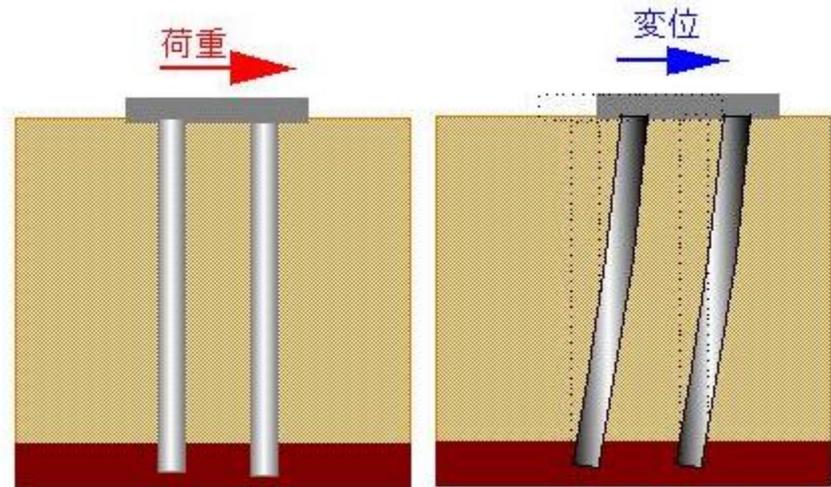
損傷度と変形性能の関係(4)



損傷レベル4

基礎の安定レベル

基礎構造物の耐震性能には、地盤による支持(変形)と基礎を構成する部材の損傷を考える必要があり、それらを含めて安定レベルとした。



基礎構造物における 目標を達成するための問題点(1)

1. レベル2地震動では、加速度が飛躍的に大きくなるため上部構造、基礎構造ともに限界状態(耐震性能等)を定め、その限界に至る力学的挙動(非線形性状等)を把握すること。
さらに耐震性能を設定すること。

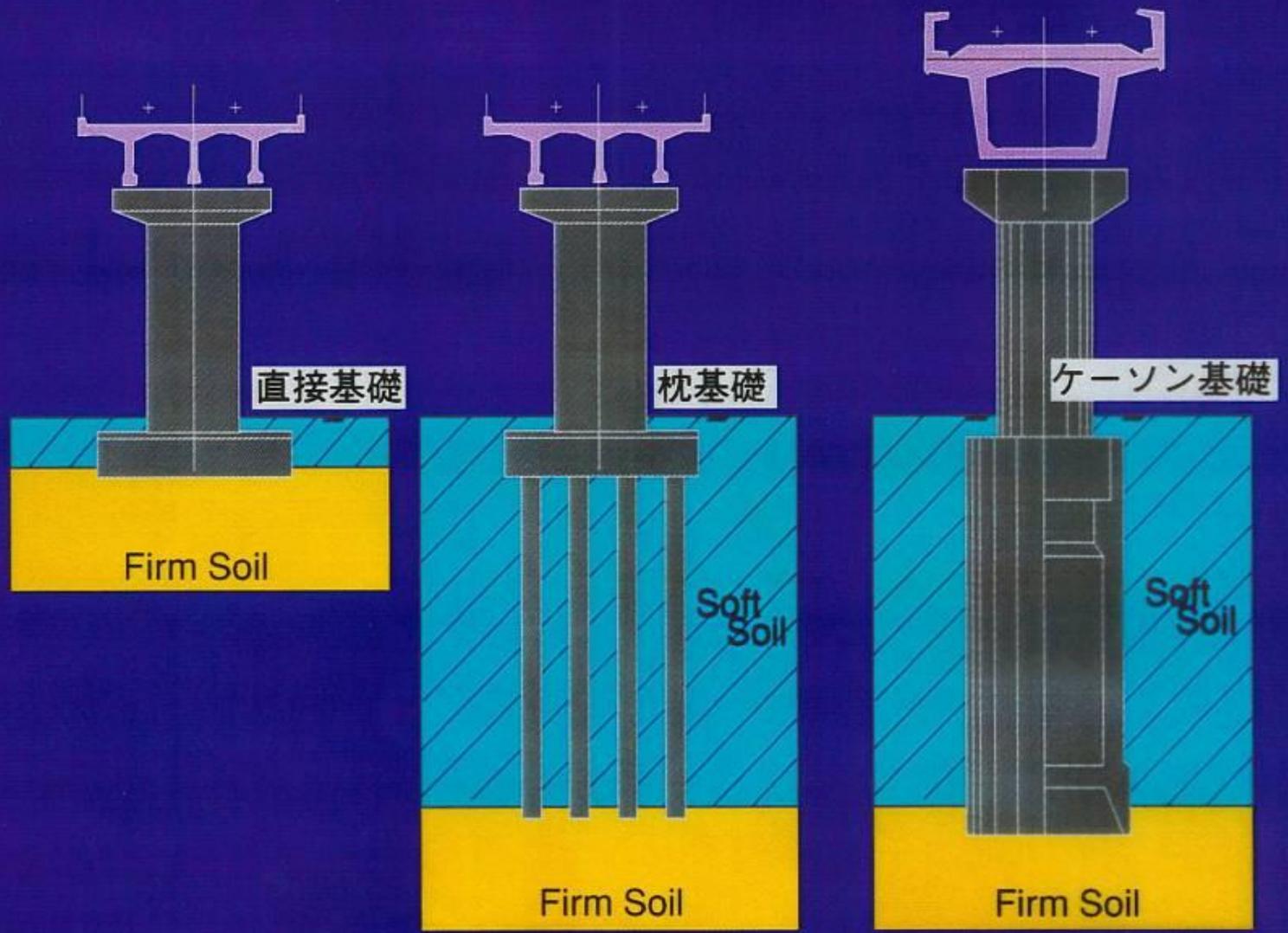
非線形を考慮した挙動を表現するためには動的解析解析ソフト等が整備されているまたは整備することが必要。

基礎構造物における 目標を達成するための問題点(2)

2. 一体解析を実際に行うためには、上部構造物と基礎構造物の材料等の物性値の推定(設定)精度等が大きく異ならないことが必要である。異なる場合は、構造物の安全性を損なわないような配慮が必要である。

鉄筋コンクリートや鋼構造等が主材料の上部構造は非線形性等の研究がかなり進んでおり、すでに限界状態設計法が採用されていたが、基礎構造についてはこの時点では許容応力度設計法が主体であり、限界状態等の把握が十分ではなかった。

基礎構造物の主な構造



新しい耐震設計法導入における 基礎構造物の問題点(1)の検討

1. 基礎においても耐震性能（耐震設計において照査する状態）を定義する。そのためには弾性領域から塑性領域におよぶ基礎の挙動を明確にする必要がある。また、出来れば基礎の設計の考え方を各基礎で同様としたい。
2. そのためには、小変位から大变位領域に及ぶ基礎の静的および動的載荷試験を実施し、その挙動を把握し、それを解析で表現することに取り組んだ。

基礎構造物の載荷試験

1. 直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎で実施

2. 実施した試験

1. 大変位領域に及ぶ静的交番水平載荷試験

・基礎の支持力性状の把握

2. 大振幅振動台試験

・動的効果の確認

直接基礎の水平載荷試験

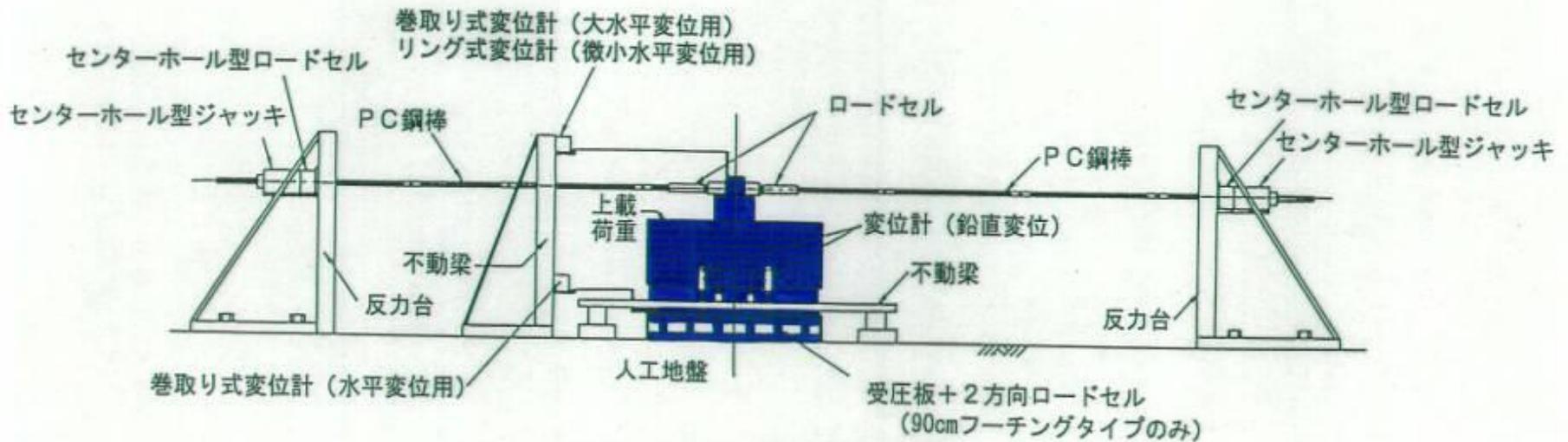
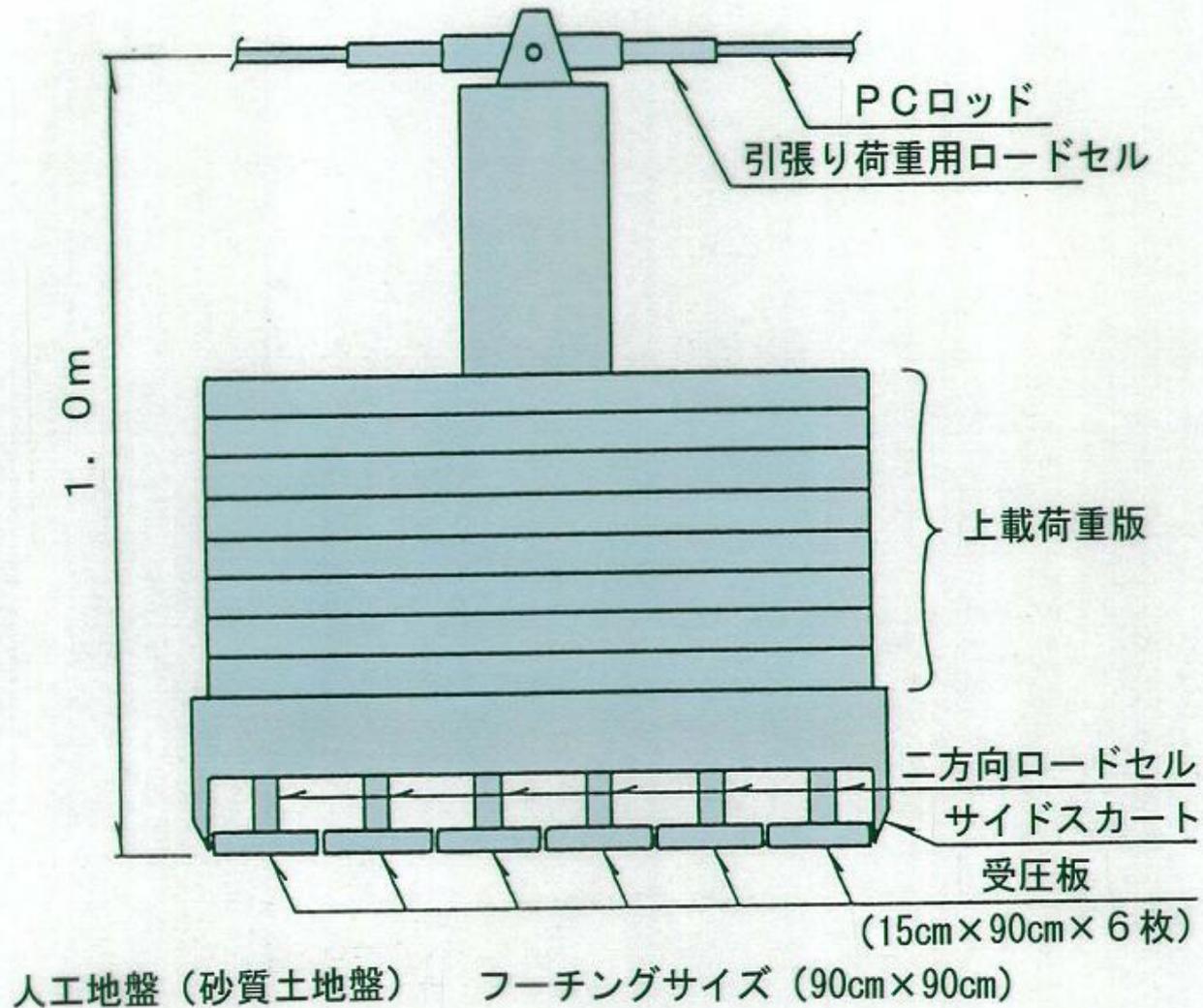
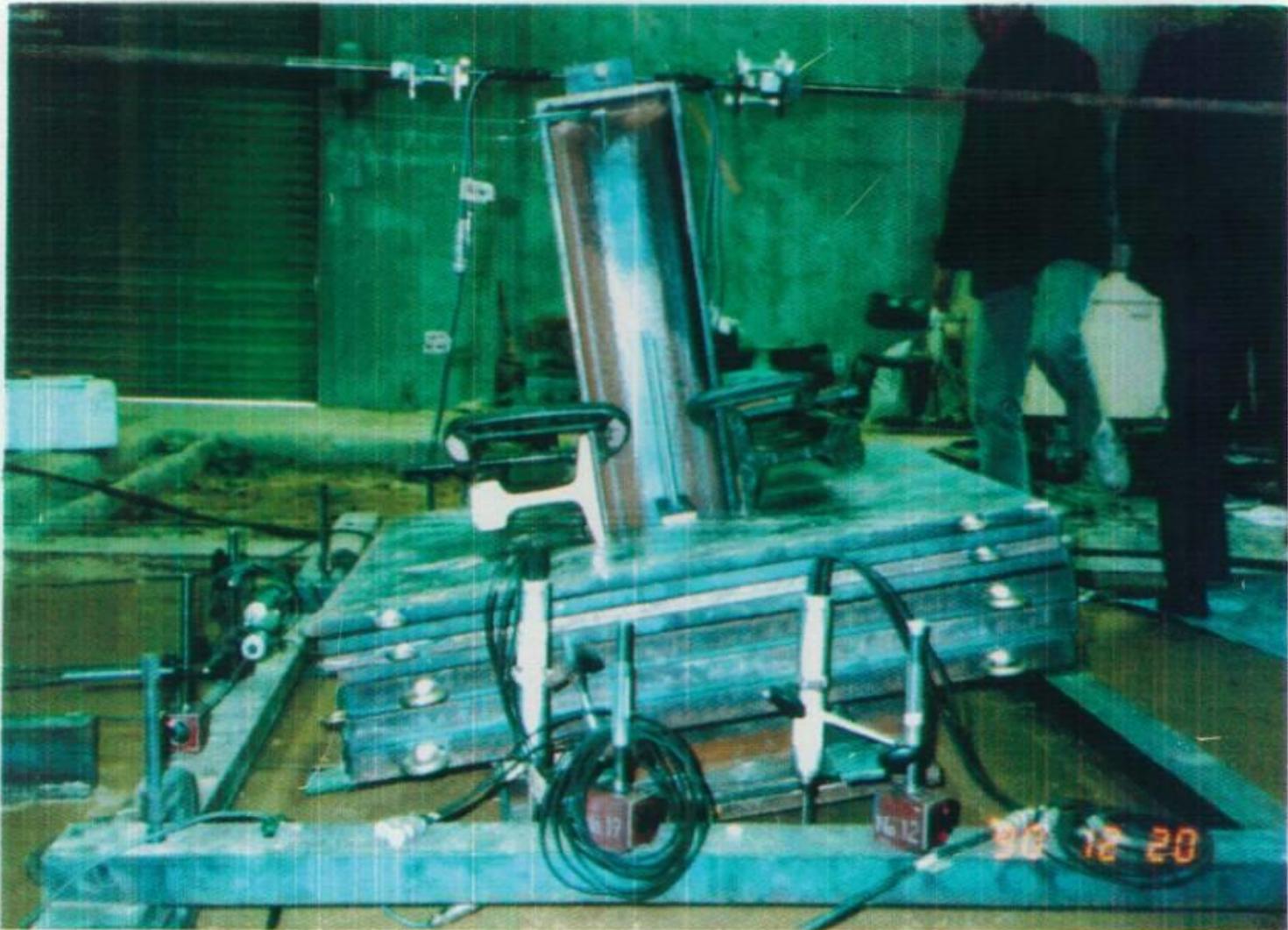


図2 直接基礎載荷試験概要

直接基礎模型の概要

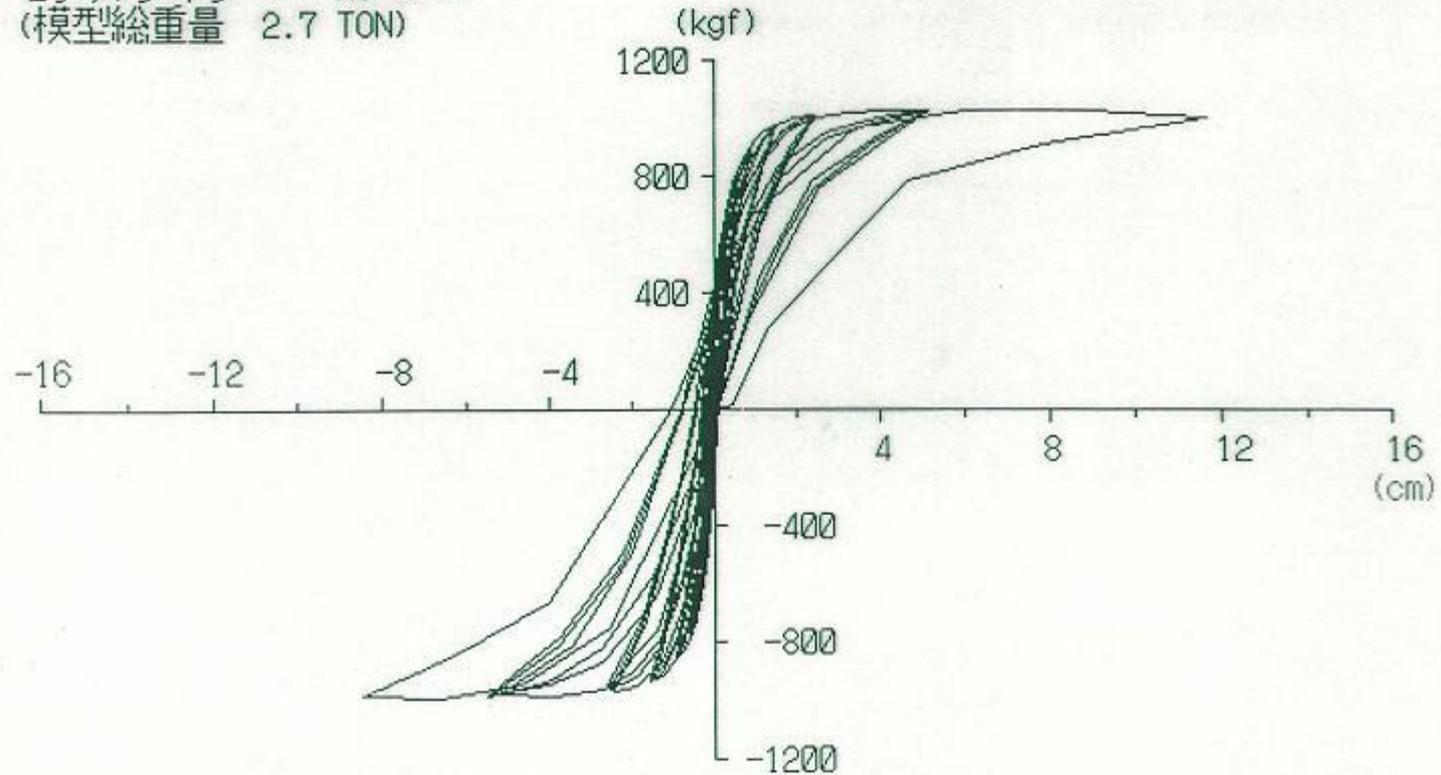


水平載荷試験の様子



直接基礎の水平載荷試験結果

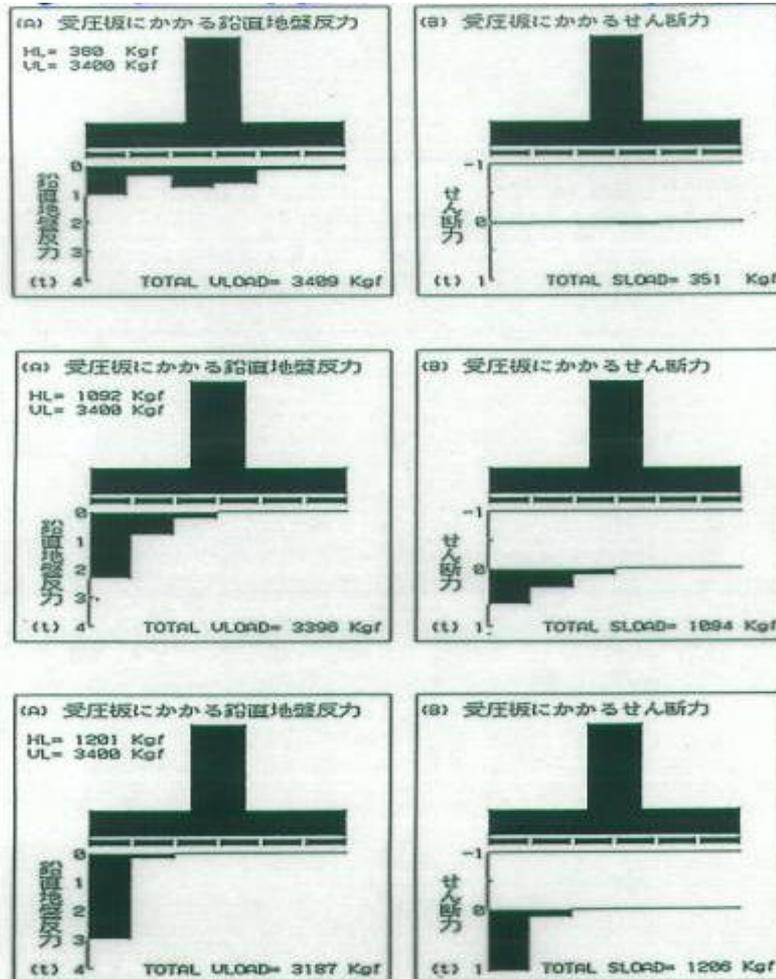
モデルタイプ = HS-90-2
(模型総重量 2.7 TON)



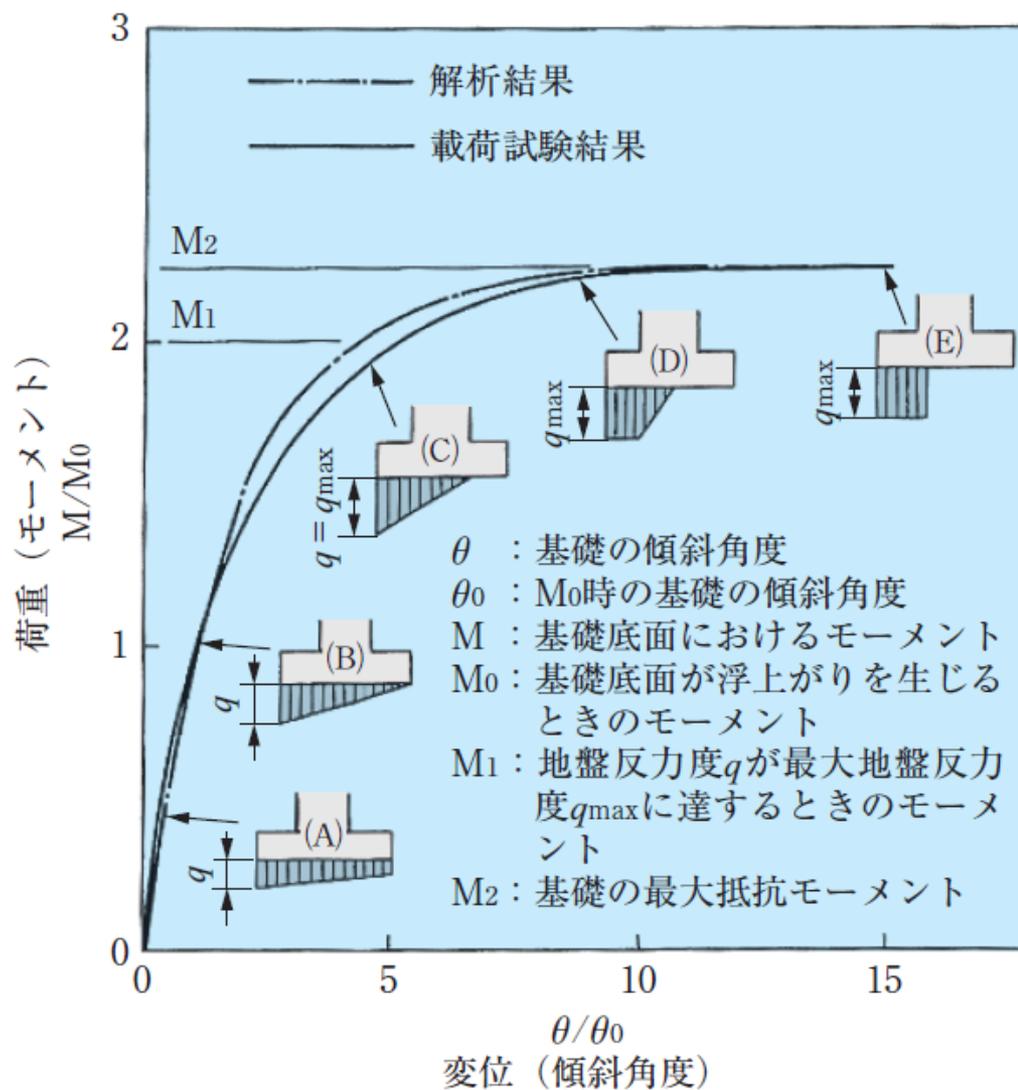
水平荷重と加力点水平変位の関係

地盤反力分布形状の変化

鉛直方向 水平方向



直接基礎の荷重～変位曲線と解析結果



直接基礎の振動台試験

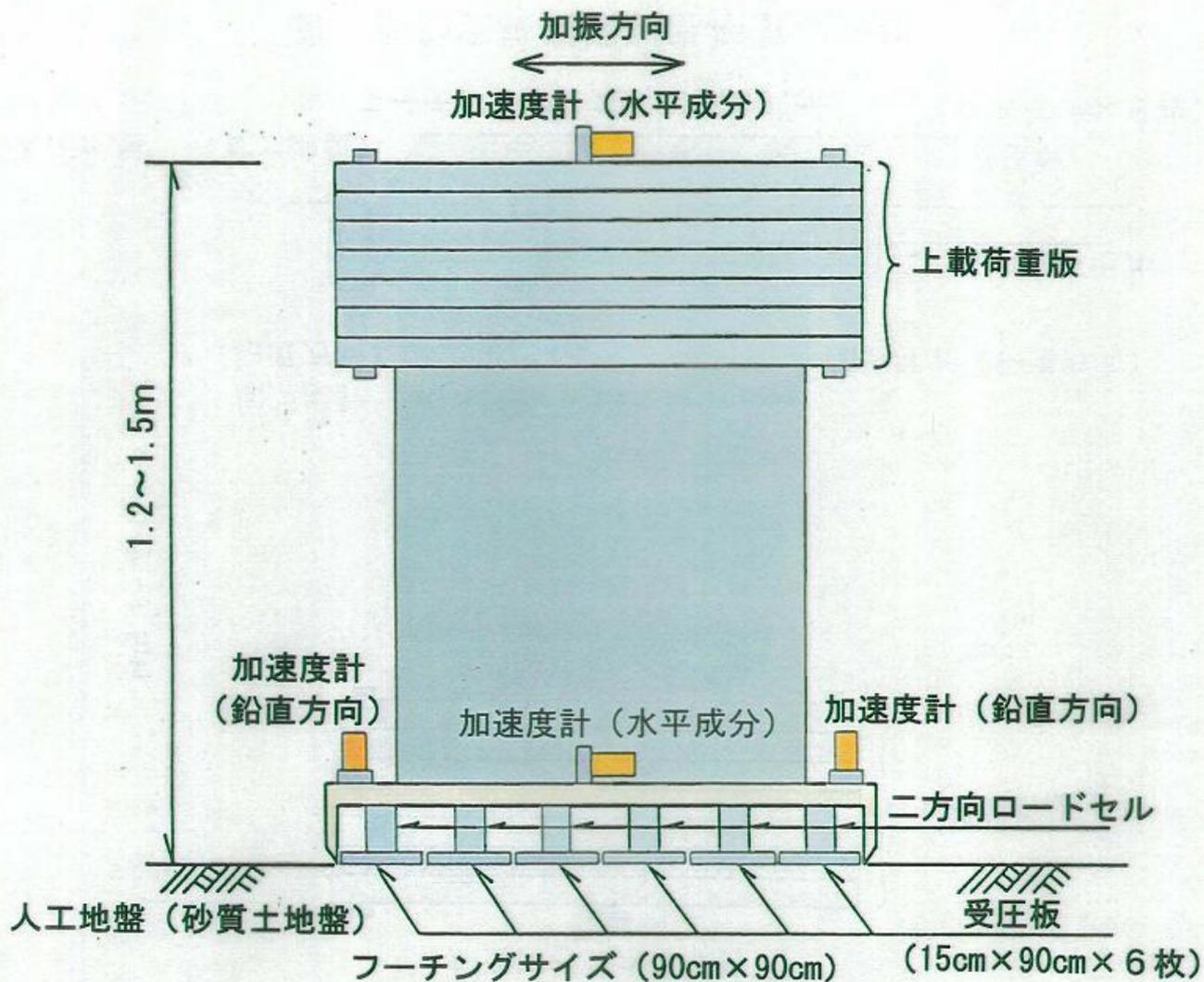
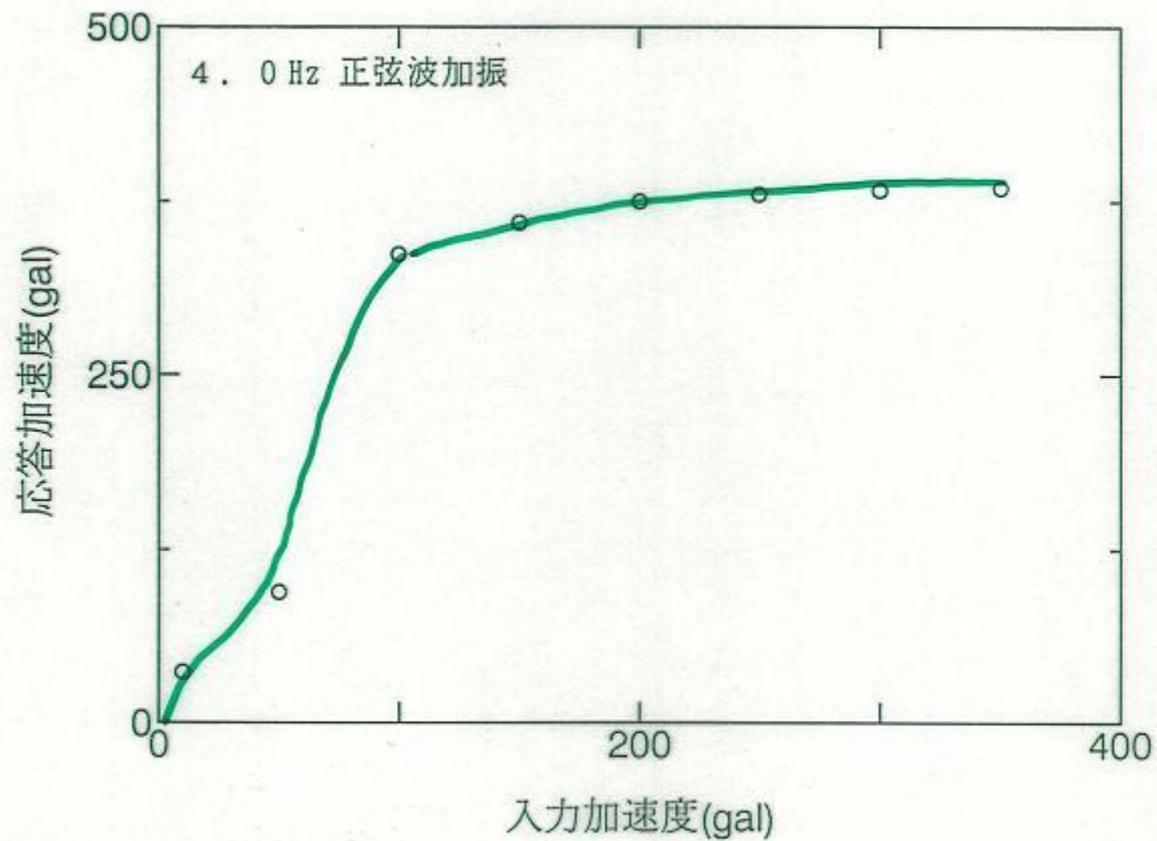
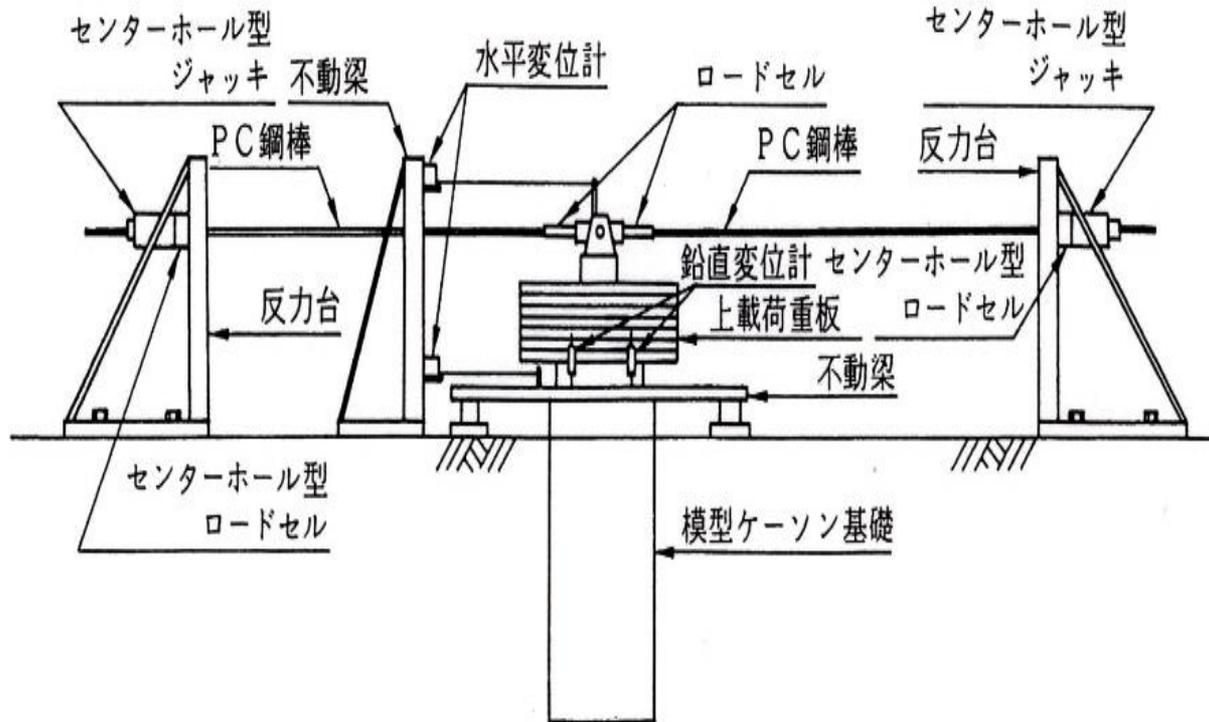


図 振動実験用模型直接基礎概要

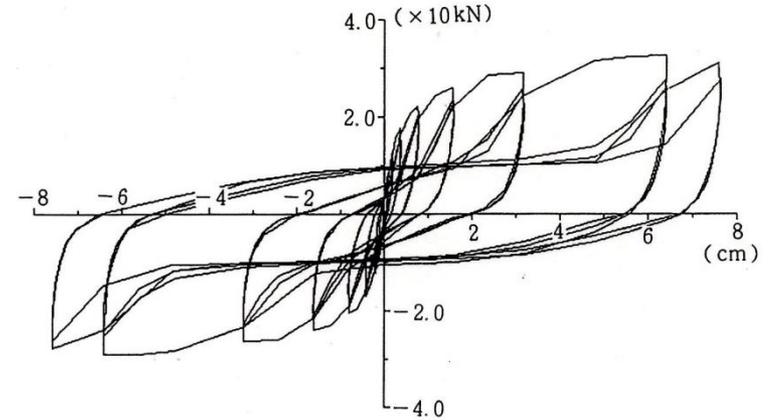
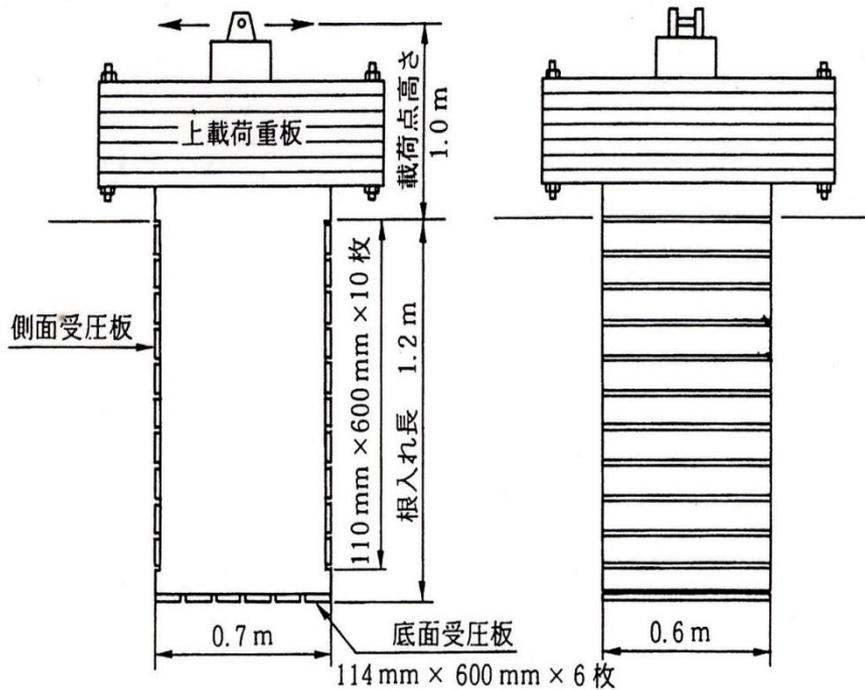


入力加速度と応答加速度の関係 (DS-90-2)

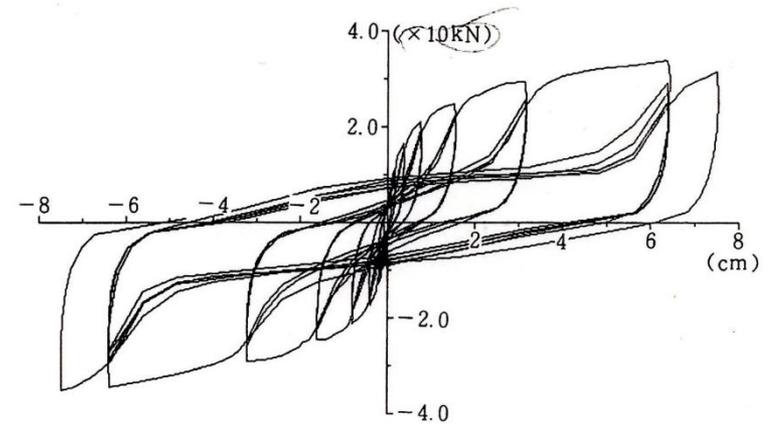
ケーソン基礎の水平載荷試験



ケーソン基礎の模型と載荷試験結果



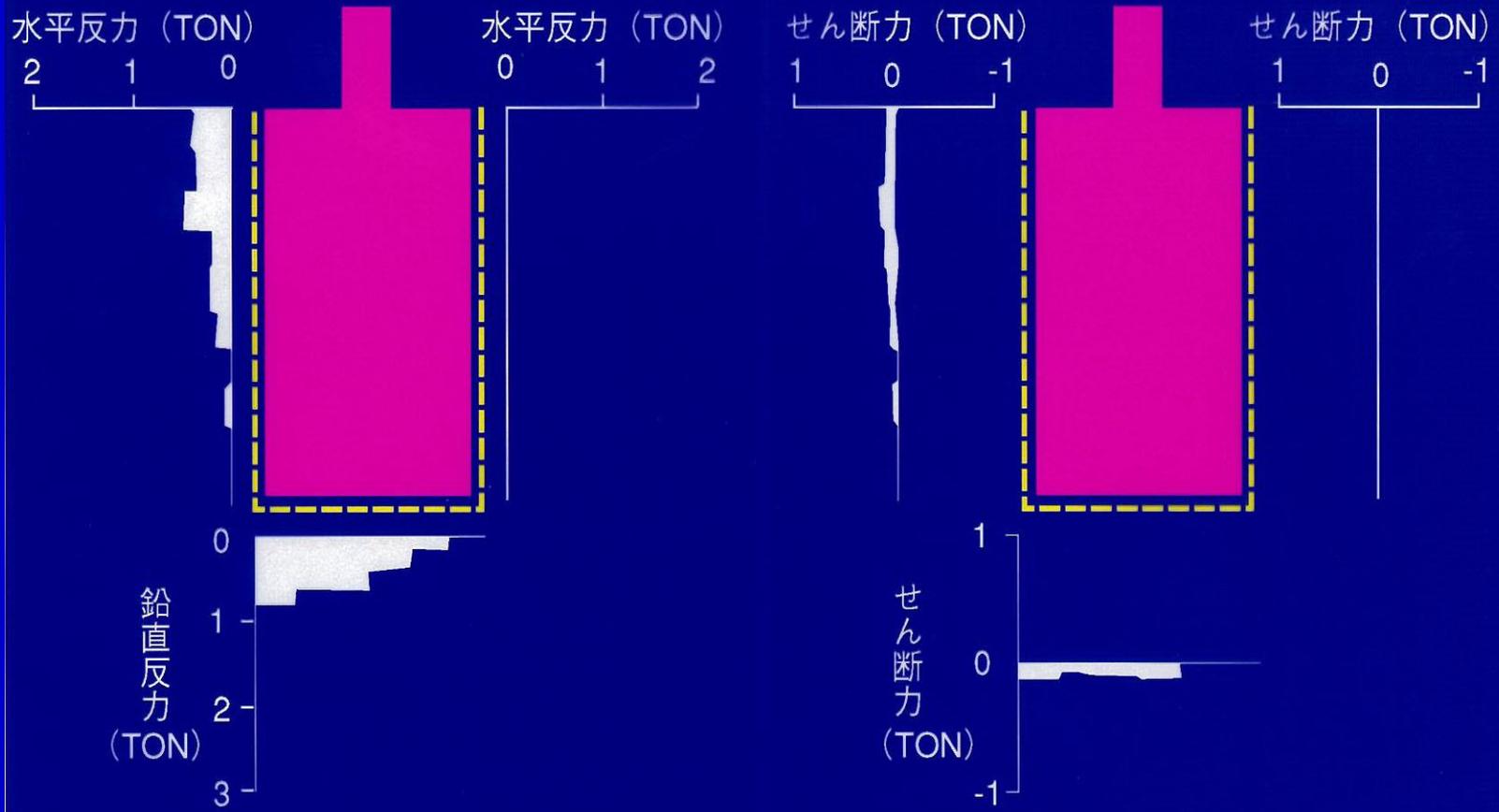
水平載荷力とケーソン天端水平変位の関係
(ケース11)



水平載荷力とケーソン天端水平変位の関係
(ケース12)

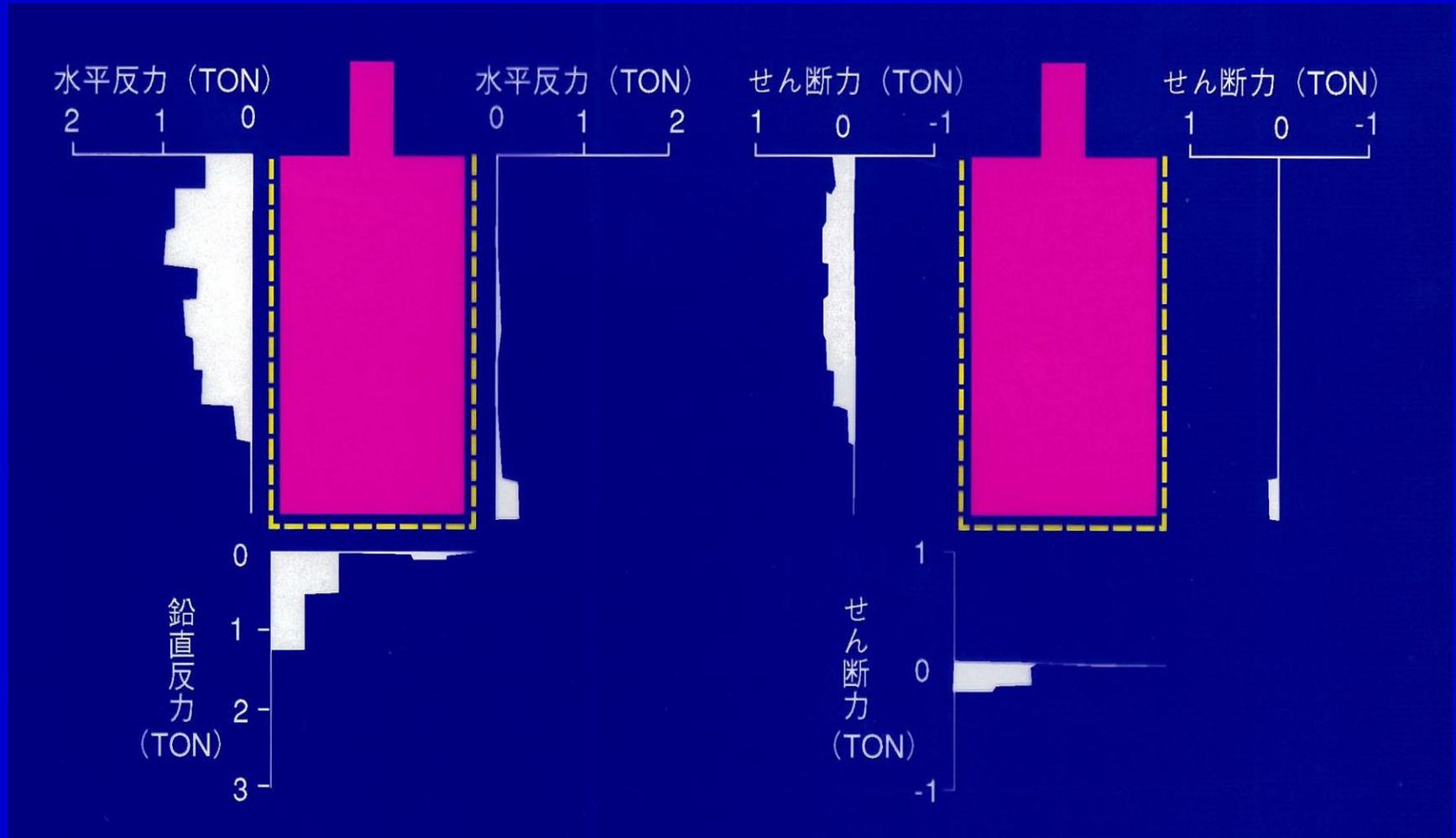
ケーソン基礎の載荷試験における地盤反力(1)

水平引張り力 15.6KN

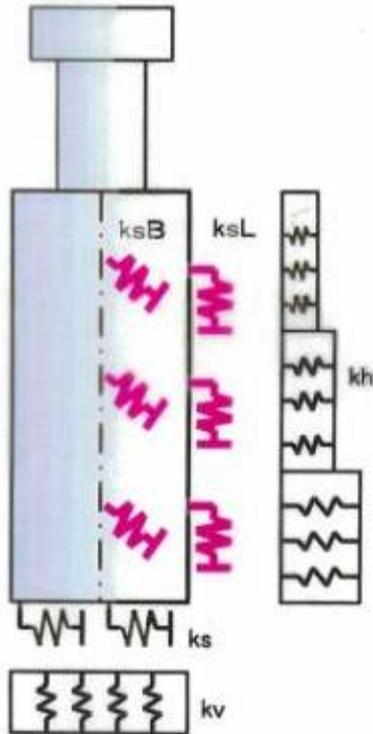


ケーソン基礎の載荷試験における地盤反力(2)

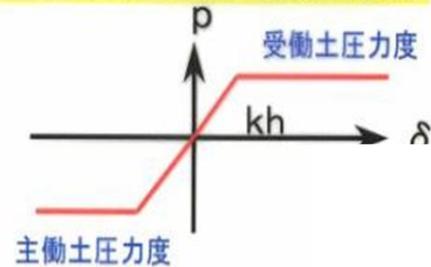
水平引張り力 30.6KN



ケーソン基礎の地盤抵抗要素の設定

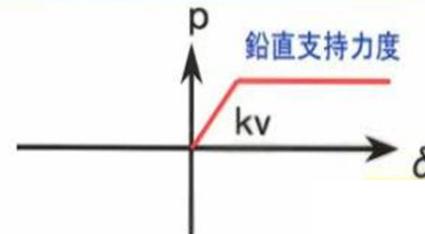


・ kh : 設計水平地盤反力係数

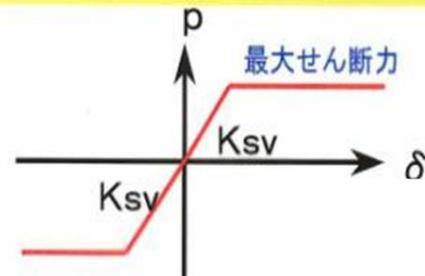


前面の形状係数を考慮した受働土圧力度

・ kv : 設計鉛直地盤反力係数



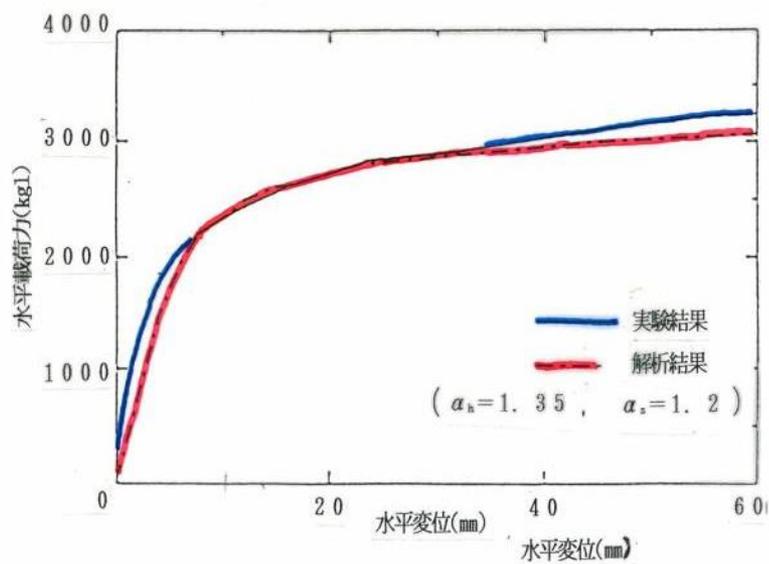
・ K_{sv} : 設計せん断地盤反力係数



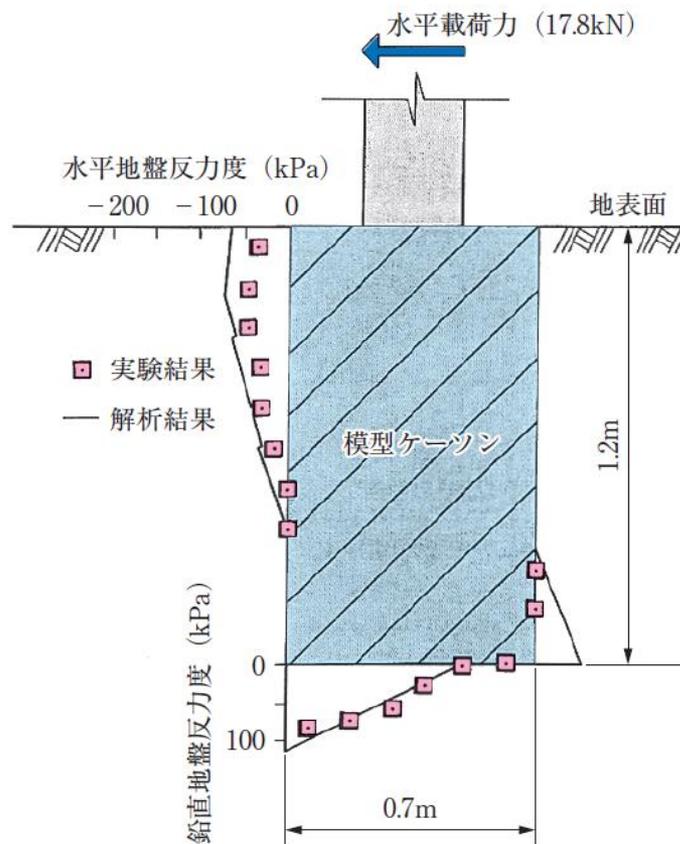
ケーソン基礎の実験結果と解析結果の比較

荷重～変位曲線

地盤反力分布



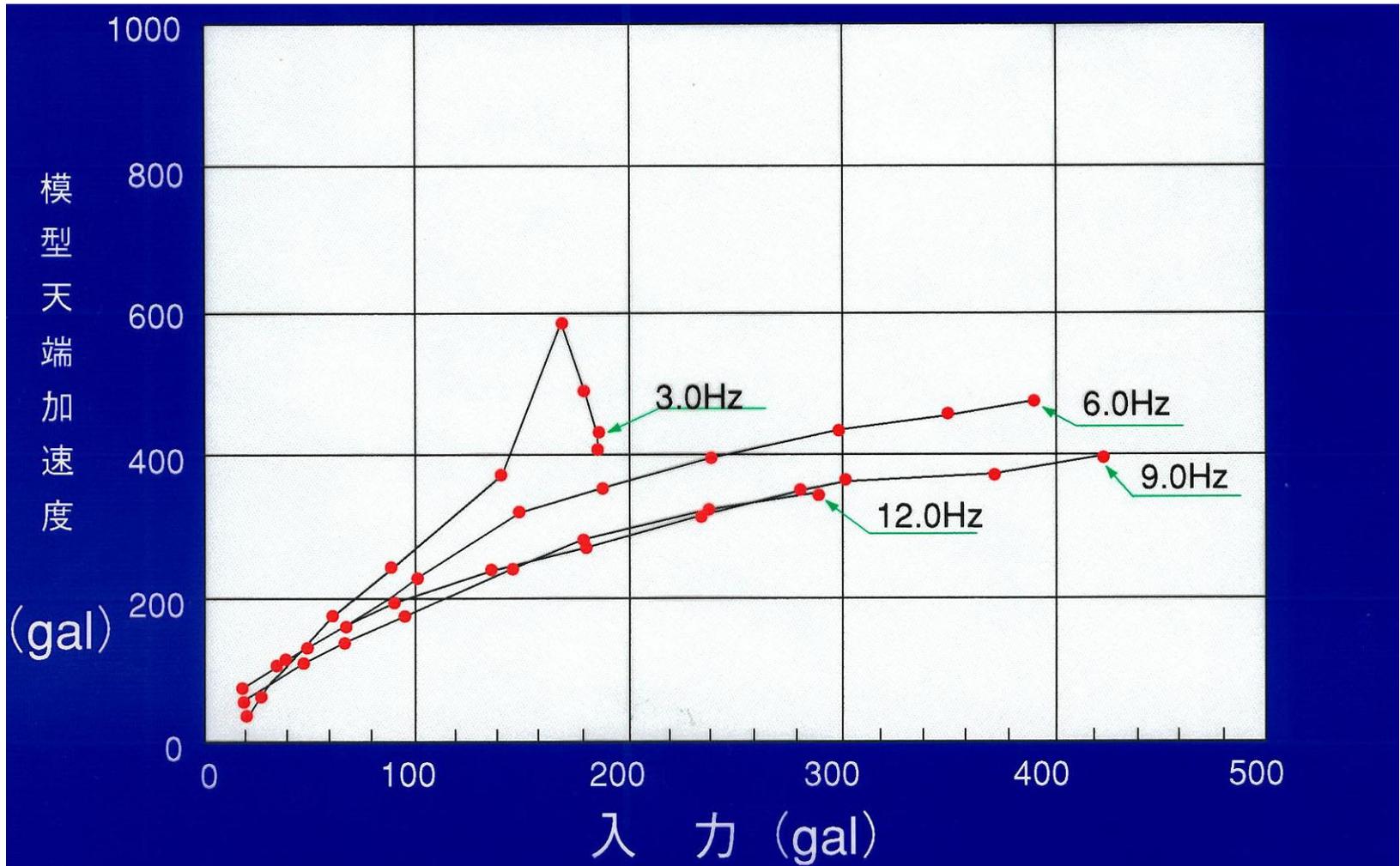
10%程度変位しても耐力は落ちない



ケーソン基礎の振動試験



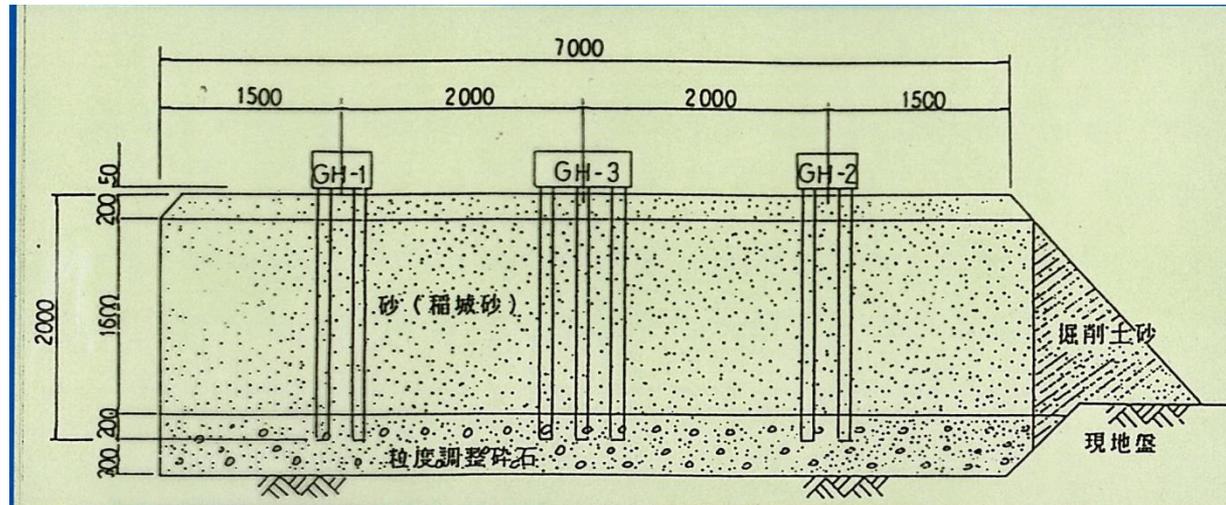
ケーソン基礎の振動試験結果



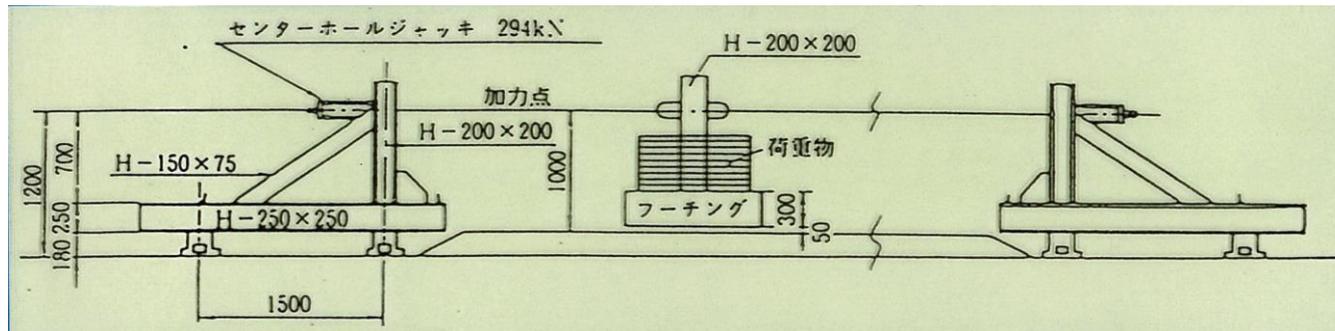
杭基礎の水平載荷試験

模型杭基礎: 鋼管杭 $D=10\text{cm}$

杭長=2m



試験概要



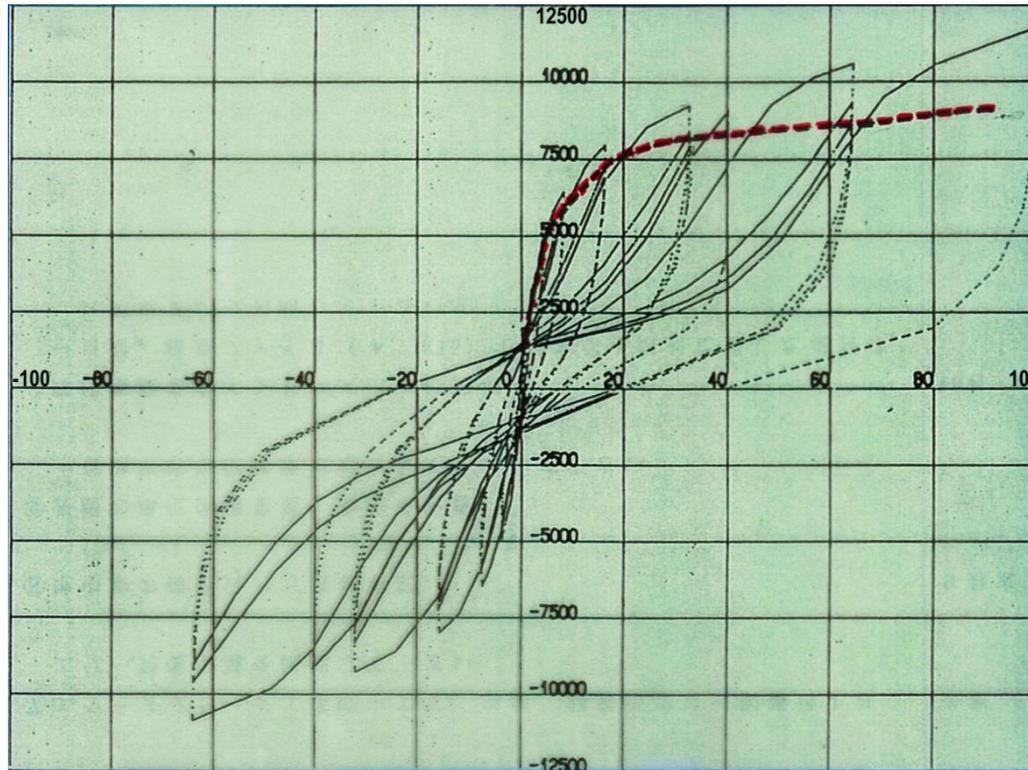
杭基礎の設置状況



杭基礎の水平載荷試験の様子



杭基礎の水平載荷試験の結果

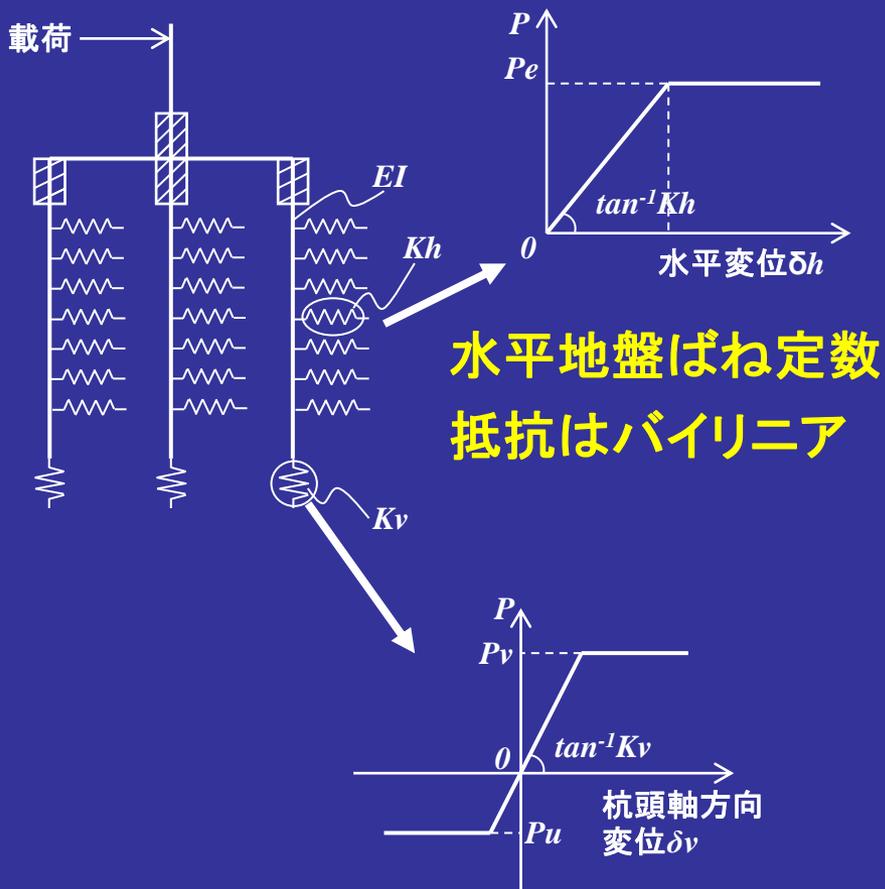


* 荷重～変位曲線は明確な非線形挙動を示す

* 大変位領域においても杭基礎の耐力は低下しない

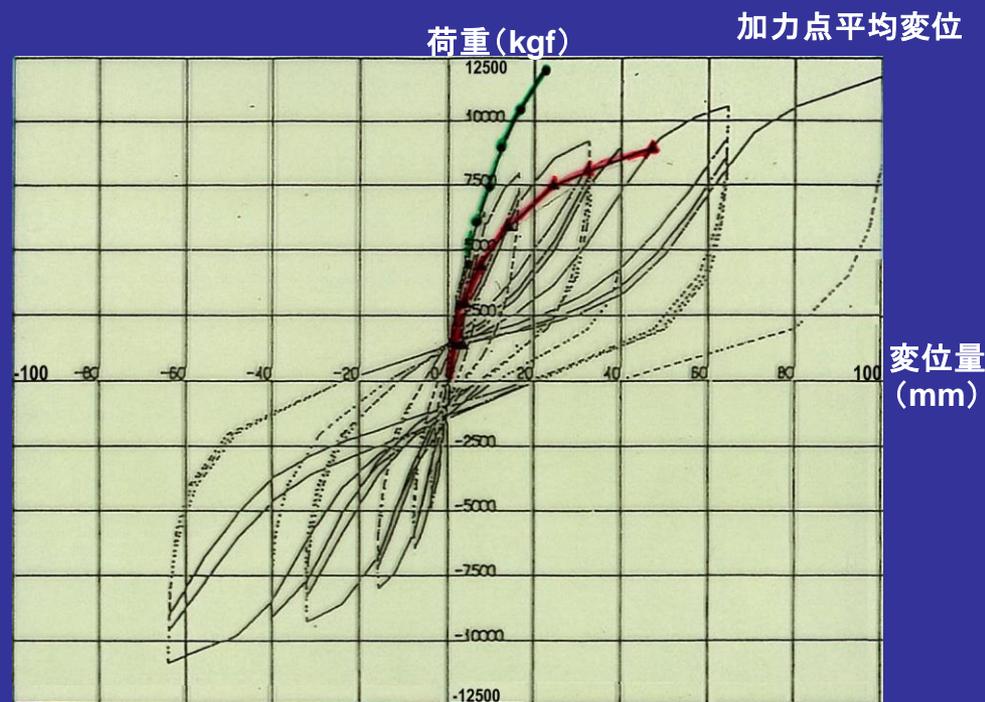
杭基礎静的載荷試験の解析結果

解析モデル



杭先端の鉛直ばね定数は
引張り力に抵抗しない

シミュレーション結果(荷重～変位曲線)

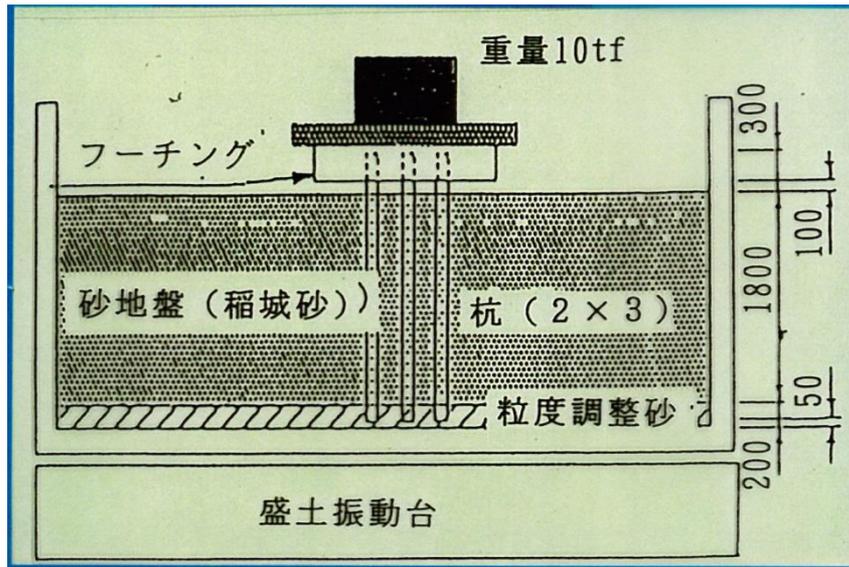


解析値

- : 群杭効果(水平地盤ばね)考慮なし
- ▲ : 群杭効果(水平地盤ばね)考慮あり

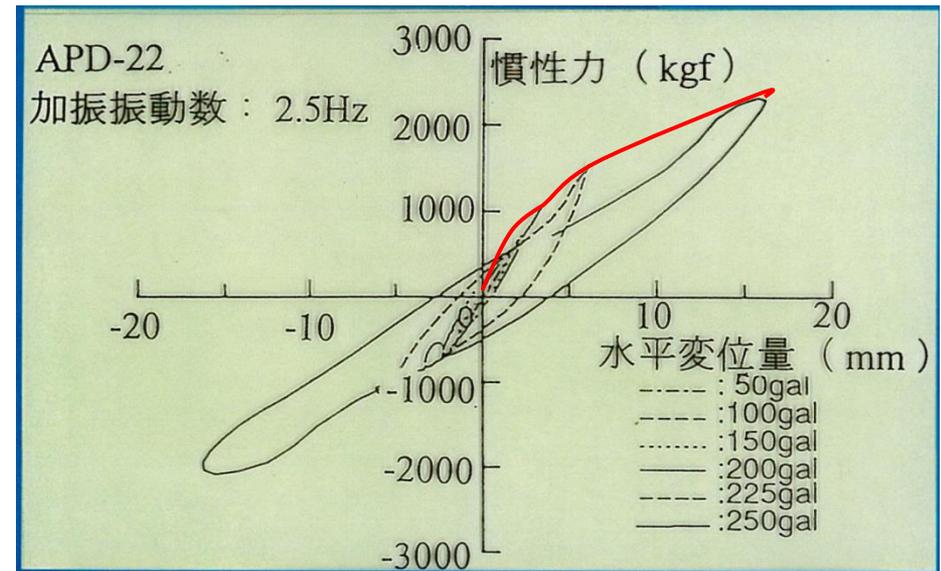
杭基礎の振動試験

試験状況



静的水平載荷試験と同モデルで実施

試験結果



静的載荷試験と同様の傾向

載荷試験結果から耐震性能を定める

載荷試験の結果、基礎は降伏点や明確な非線形性を示し、またかなりの塑性率が確保できていることがわかった。

さらに、耐力や変形の状態も静的試験と振動試験は似た形状を示すことがわかった。

そこで、耐震性能は降伏点と終局状態で表すこととし、その表現は荷重～変位曲線状で示すこととした。それを作成する過程で、部材は上部工と同じ損傷レベルで設定し、支持力は変形レベルで設定する。そのイメージは耐震性能の項(P53)で示したとおりである。

荷重～変位曲線を採用する理由

1. 各基礎間の設計法の考え方の統一
2. 照査内容の明確化と適切な安全性評価
(限界支持力 塑性率の制定)
3. 大きな設計水平震度に対応
4. 破壊状態の具体的な把握
(各限界状態における変形等の値)

新しい耐震設計法導入における 基礎構造物の問題点(2)の検討

一体解析を実際に行うためには、上部構造物と基礎構造物の材料等の物性値の推定精度等が大きく異ならないことが必要である。

しかし地盤の調査は標準貫入試験で求まるN値が主体であり、地盤の諸定数もこの値から算定されている。調査も数十メートル間隔で実施されるため、ばらつきもおおきい。そこで、推定値には大きい安全性が考慮され、土質諸数値は小さめの値が設定されている。このことを設計に考慮する必要がある。

一体解析の問題点とその解決(その1)

一体解析を行う場合、構造物の降伏点は上部工または基礎の降伏点の小さい方で決定される。そして、地震後の補修の容易さから上部構造物の降伏点より、基礎構造物の降伏点を高くし、基礎構造物の損傷を小さくする。(ただし、壁式橋脚のように特別な場合は基礎の降伏が先行する。)

降伏以降は上部工の損傷が進行し、その耐震性能で諸元が決定される。

基礎先行降伏の場合、基礎の損傷が進行し、その耐震性能で諸元が設定される。その場合、基礎の減衰は大きいので、構造全体の応答が小さくなり、上部工は経済的な設計が可能となる。

一体解析の問題点とその解決(その2)

しかし、問題は土質諸定数が、設定より大きい方にばらついた場合(土質諸定数の上限値に近い場合)は基礎は降伏せず、先に上部工が降伏し、大きな被害を受けることになる。

そこで、基礎が先行降伏する場合は、土の定数等に係数を乗じて大きくし、再設計を行うこととした。

この係数を**支持力係数**(αf)とし、その値は杭の載荷試験の結果のばらつきや、上部工の安全性を考慮して 2 と設定した。

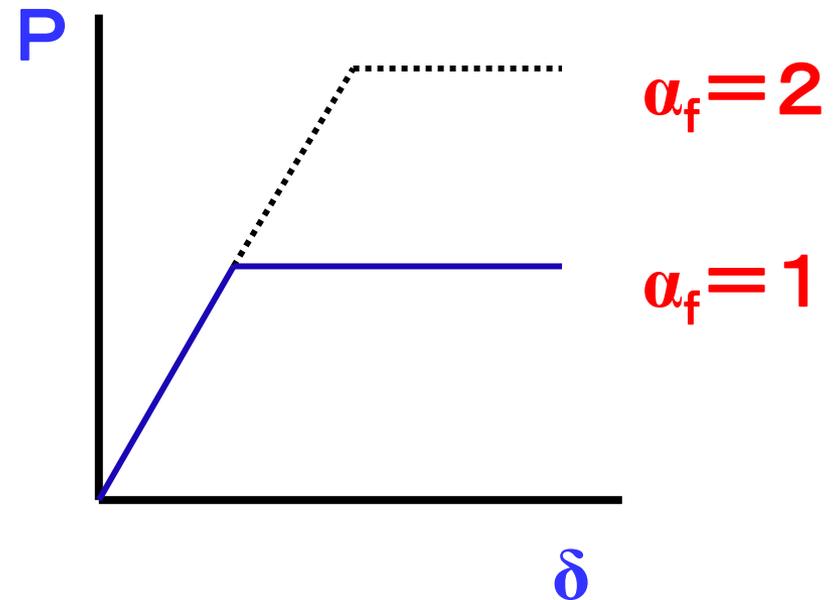
基礎の支持力係数 (α_f)

地盤の設計強度定数を補正

有効抵抗土圧および支持力に乗じてその値を補正する

補正方法

$\alpha_f=1$ を用いた静的非線形解析において基礎が先に降伏した場合、 $\alpha_f=2$ を用いて抵抗土圧等を大きくし、上部工の照査を行う



P : 有効抵抗土圧および鉛直支持力

新・旧耐震設計法の比較

2011年東北地方太平洋沖地震が生じた。1983年開業の高架橋には(新耐震設計法以前の設計)柱にせん断クラック等が生じたが、2006年使用開始の高架橋には目立った被害はなかった



おわりに

土木学会2年度功績賞受賞にお礼申し上げますとともに、話題提供の機会を与えて頂いたことに感謝いたします。

つたない経験談で申し訳ありませんでしたが、おわりに設計に携わって考えたことを述べます。これは講演内容に述べましたが、

- ・構造物の挙動を出来るだけ正確に考慮すること
 - ・解析は構造物の挙動を精度良く推定出来るものが必要であるが、設計は出来るだけシンプルであることがよいこと。
- 等であります。

構造物は人命を預かるものであり、安全が使命であることを忘れてはいけないと思います。

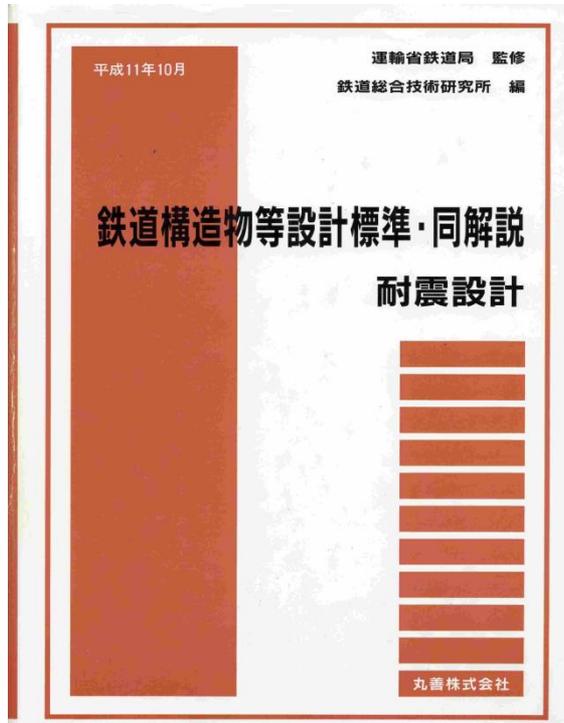
設計は難しくなったとの声を聞きます。より安全でわかりやすい設計法に改良されることを今後の研究者の方々に期待するものであります。

ご清聴ありがとうございました !!

Thank you for your attention.

(参考資料) 新しい耐震設計法

鉄道構造物等設計標準(耐震設計)



平成11年10月制定

特徴

- ① 構造物の耐震性能の設定とその値の算定
- ② 地震動は設計基盤で設定、地表面地震動を算定する
- ③ 構造物の応答動的解析によって求める
- ④ 耐震性能の評価は変形性能部材は損傷レベル基礎は安定レベル

鉄道で初めて設計標準としてまとめられた

耐震性能照査の流れ

① 目標とする耐震性能の設定

説明項目

② 地盤条件, 設計地震動等の設定

構造物の解析条件の設定(断面, 荷重等)

③ 構造物のモデル化

④ 耐震性能の把握

⑤ 応答値の算定

⑥ 耐震性能照査

終了

照査を満足しない場合

① 建造物の耐震性能

1) 建造物の耐震性能

- ・耐震性能は3つ(Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ)
- ・主として地震後の復旧の難易性に対する性能

2) 耐震性能の表現

- ・部材の損傷レベル
- ・基礎の安定レベル

構造物の耐震性能

耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない

耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる。

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない

部材の損傷

損傷レベル 1：無損傷

損傷レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷

損傷レベル 3：補修が必要な損傷

損傷レベル 4：補修が必要で、場合によっては、部材の取替が必要な損傷

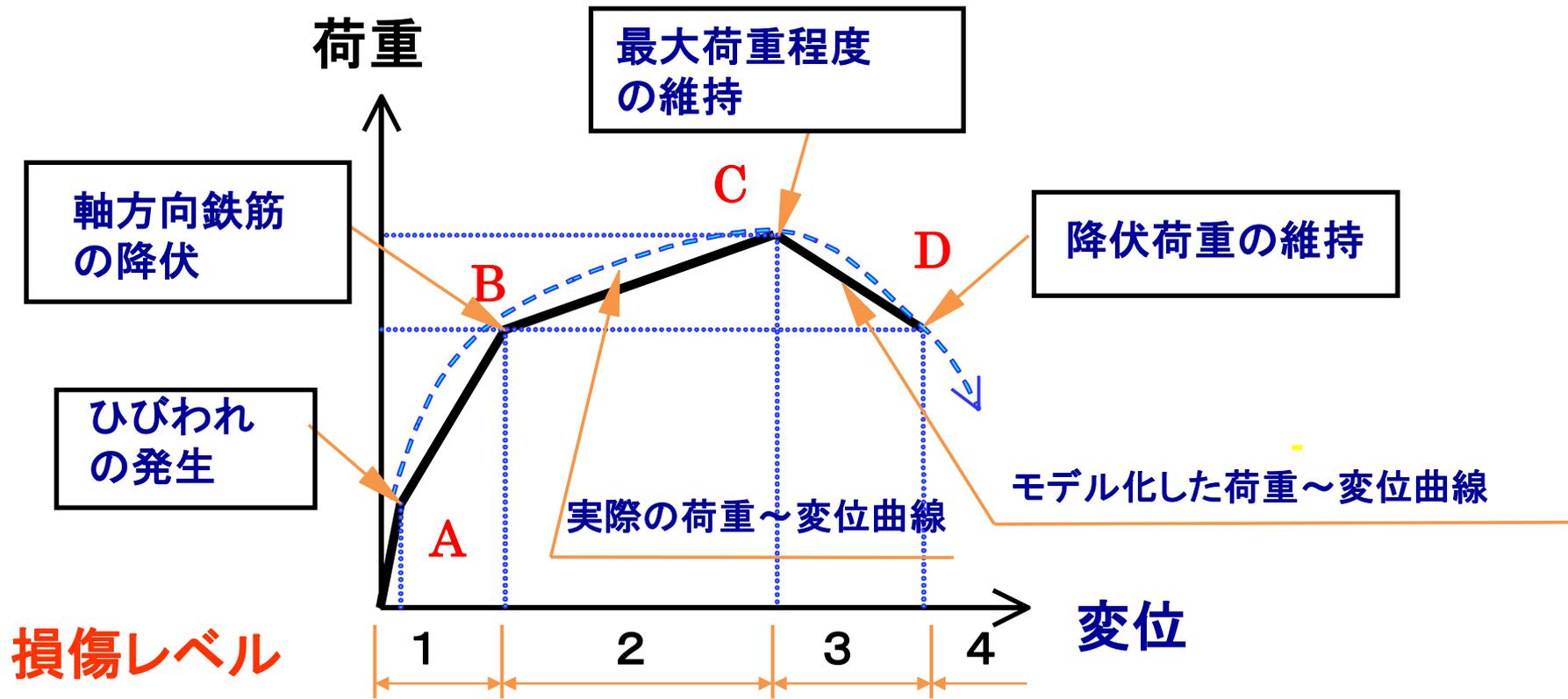
基礎の安定

安定レベル 1：無損傷（作用荷重が降伏支持力以下）

安定レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷

安定レベル 3：補修が必要で、場合によっては構造物の矯正等が必要な損傷

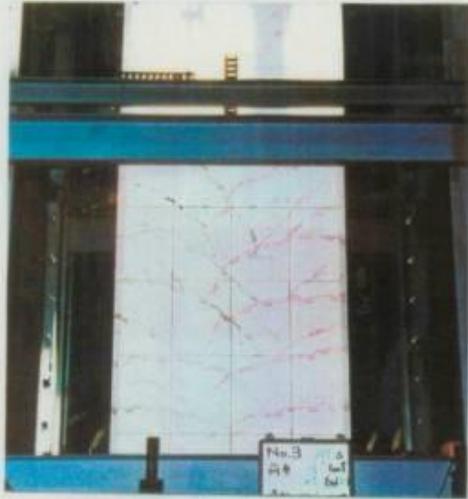
部材の損傷レベルの考え方



鉄筋コンクリート部材の荷重～変位曲線(低軸力下)

高架橋の柱における損傷レベルの状態

損傷度と変形性能の関係(1)



損傷レベル1

損傷度と変形性能の関係(2)



損傷レベル2

損傷度と変形性能の関係(3)



損傷レベル3

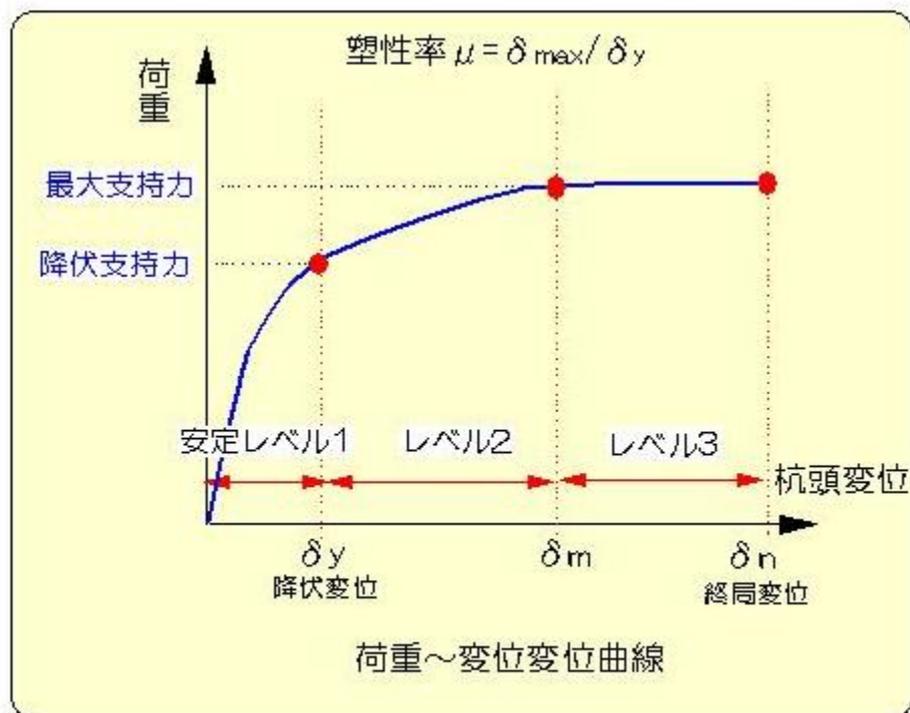
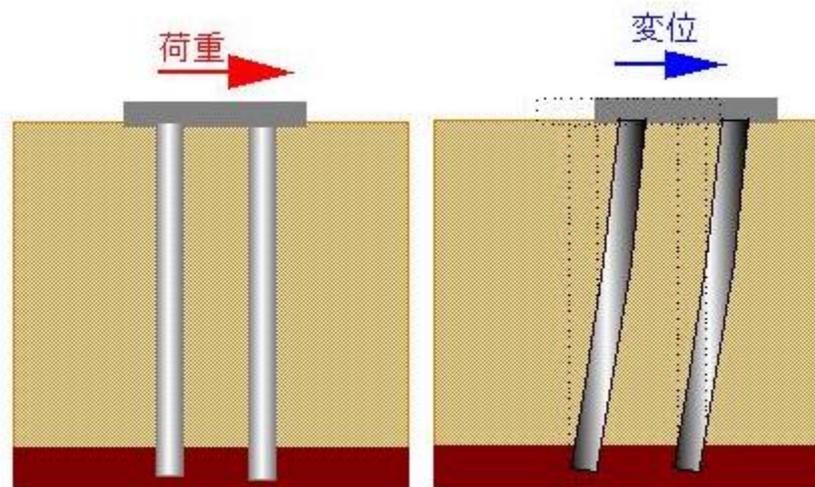
損傷度と変形性能の関係(4)



損傷レベル4

基礎の 安定レベル の考え方

基礎構造物の耐震性能には、地盤による支持（変形）と基礎を構成する部材の損傷を考える必要があり、それらを含めて安定レベルとした。



② 設計地震動の設定

1. 地震動の設定位置

- ・設計基盤面

2. 設計に考慮する地震動

- ・レベル1地震動
- ・レベル2地震動

3. 地震動設定の考え方

- ・振幅特性の設定
 - ・位相特性の設定
- 加速度応答スペクトル
群遅延時間

設計地震動の定義

◎ レベル1地震動(L1地震動)

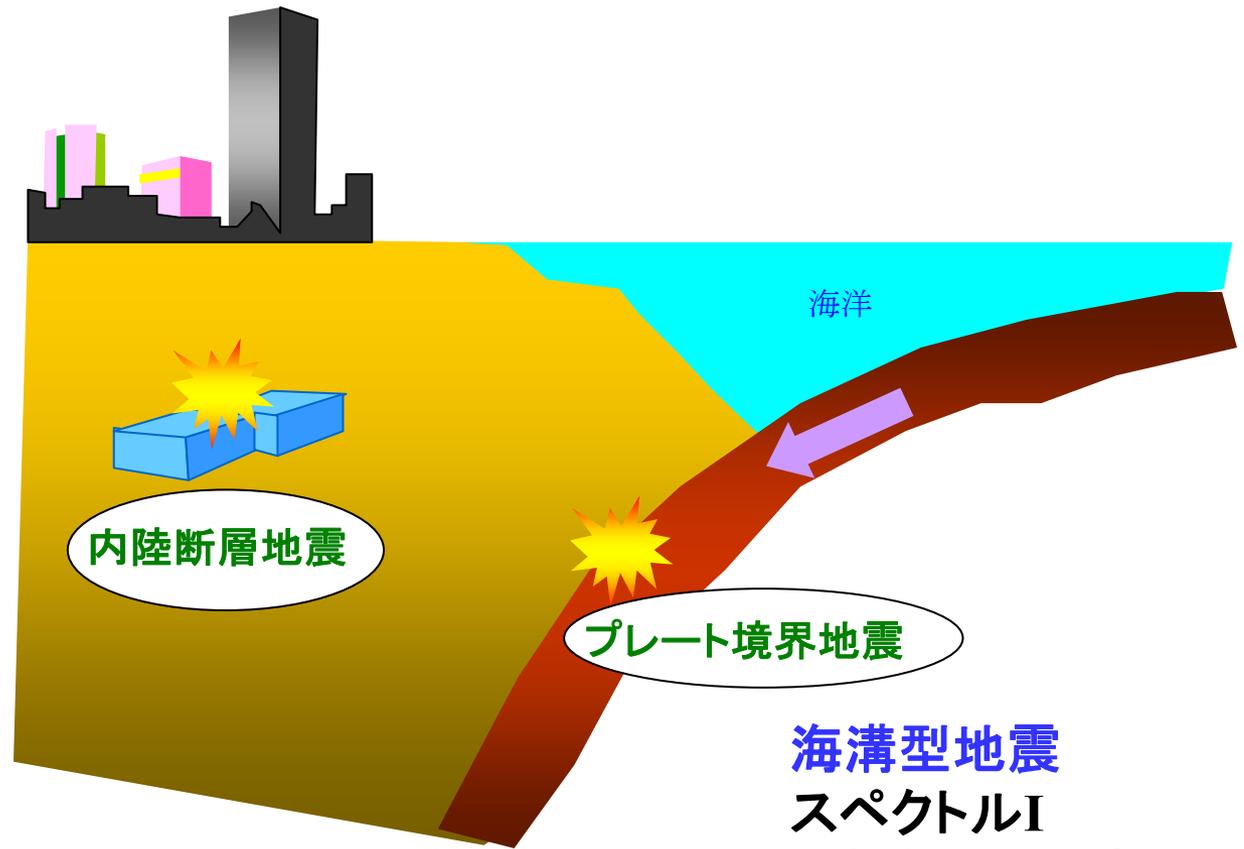
構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

◎ レベル2地震動(L2地震動)

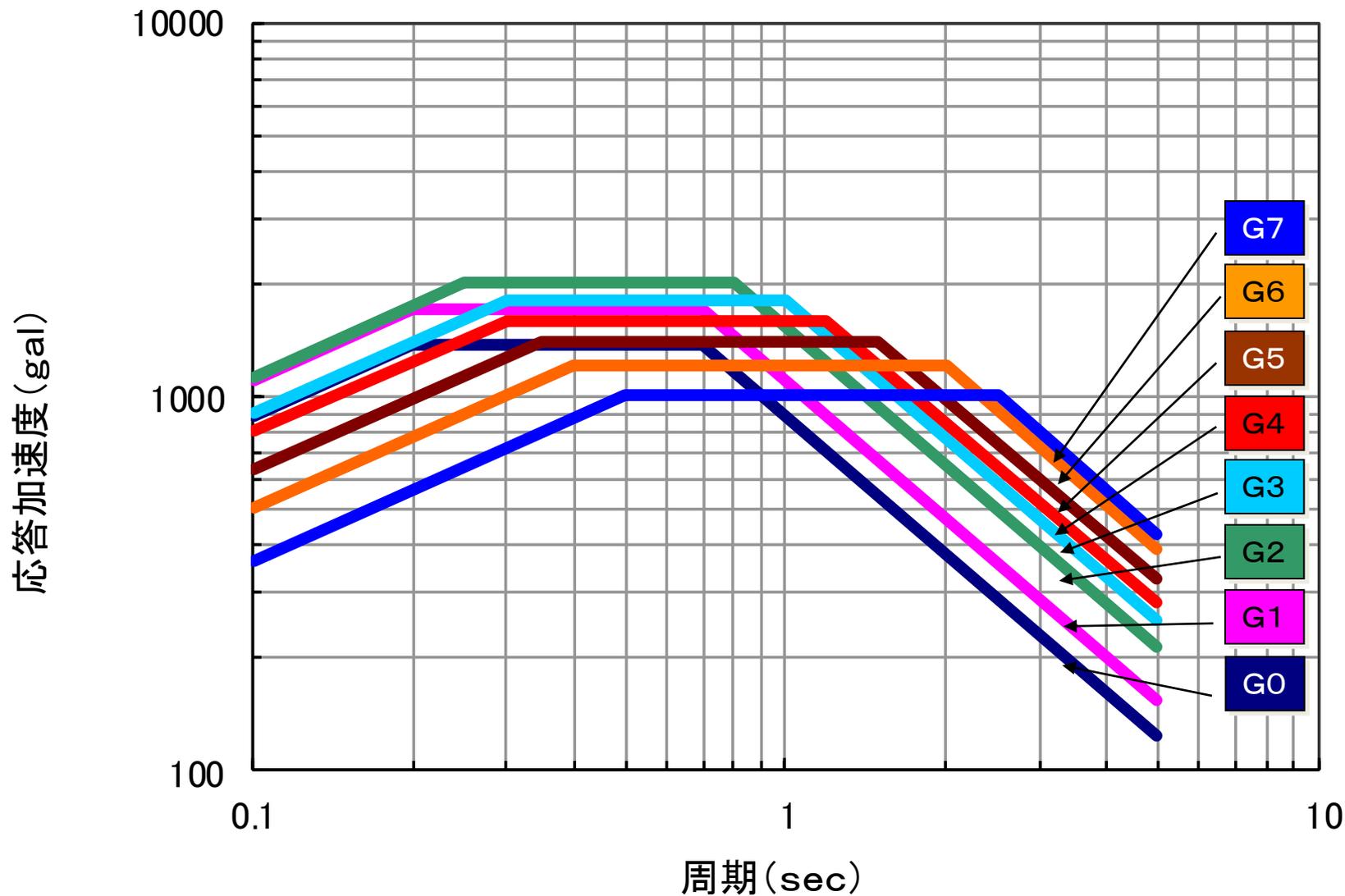
構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動

耐震設計で対象とするL2地震動

内陸断層地震
スペクトルII
(統計的に作成)



海溝型地震
スペクトルI
(統計的に作成)



弾性加速度応答スペクトル(スペクトルII)

注) G:地盤種別 G0 は岩盤 G7 は軟弱地盤

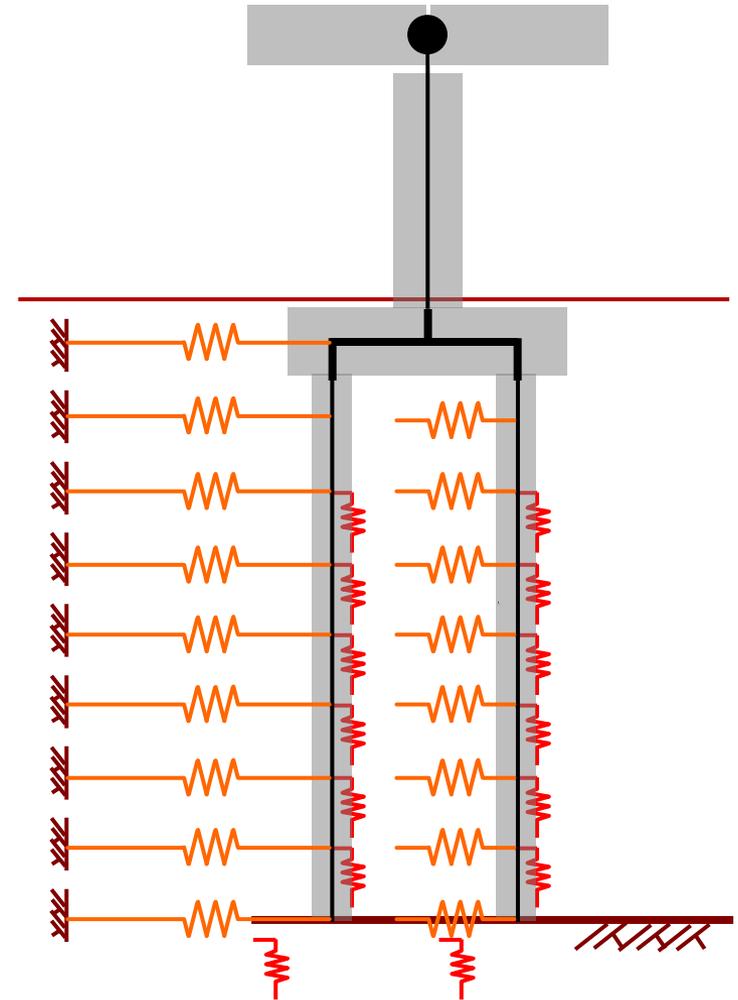
地震動と構造物の耐震性能の関係

地震動	地震動レベル	L1地震動	L2地震動	
			スペクトルⅠ	スペクトルⅡ
構造物	重要構造物	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	
	一般構造物		耐震性能Ⅲ	

③ 構造物の解析モデル

モデルの特徴

- ① 上部構造物と基礎構造物を**一体としてモデル化する**
- ② 構造部材および地盤のばねに非線形性を考慮する

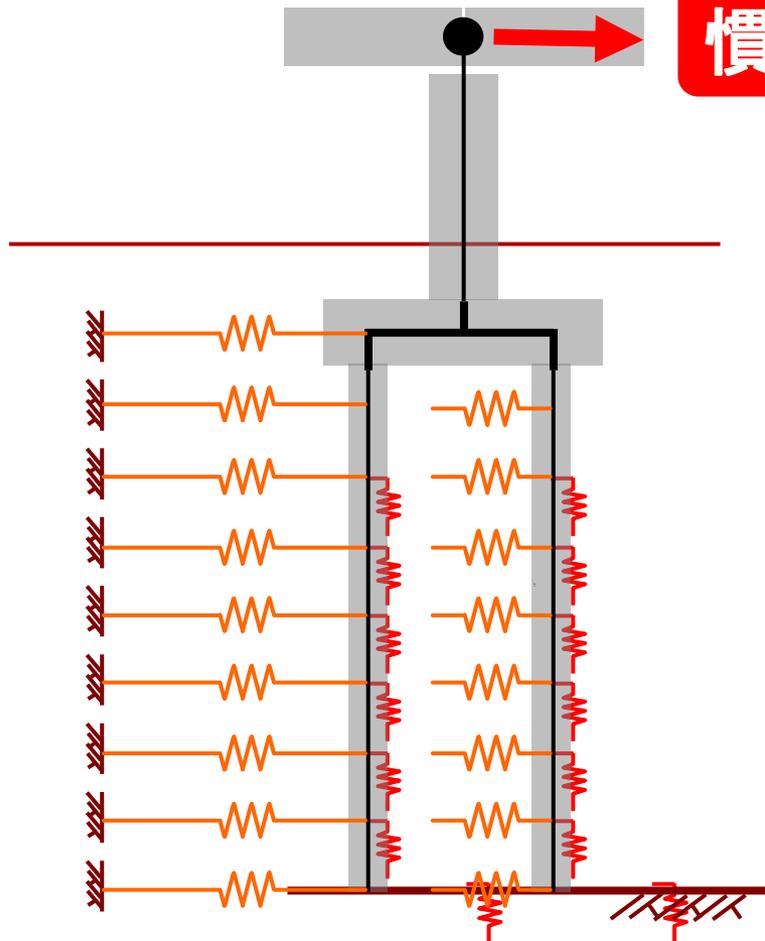


モデルの概念

④ 耐震性能の把握

静的解析法(プッシュオーバーアナリシス)による

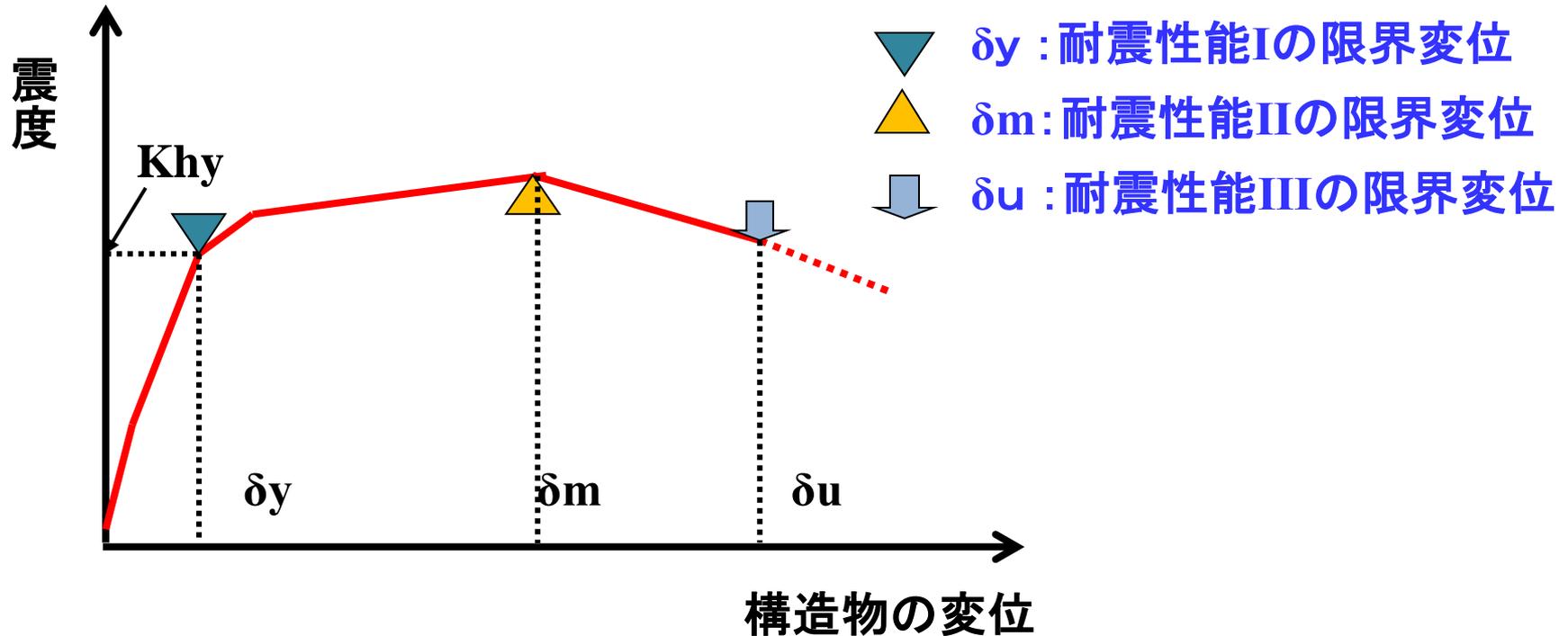
慣性力(自重×震度)



耐震性能の把握は、解析法自体は簡便で結果の解釈も比較的容易な静的解析法による

静的解析法は、慣性力を静的荷重とし、その値を**漸増**させて、構造物の**荷重～変位関係**を算定し、**損傷過程**を把握する。

静的非線形解析の結果(耐震性能)



Khy : 降伏震度

δy : 降伏変位 (損傷レベル1または安定レベル1に達する変位)

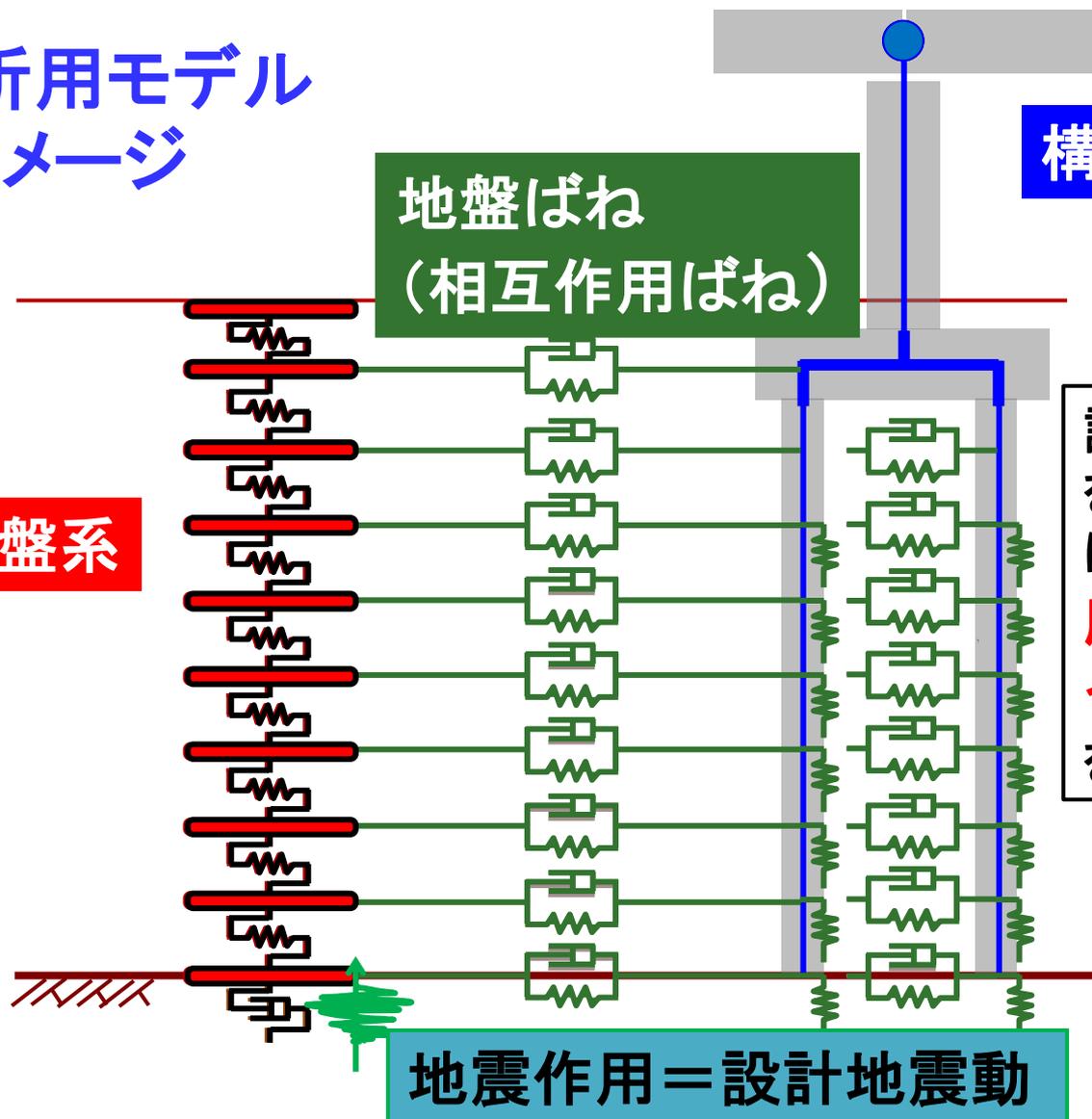
δm : 損傷レベル2~3 または 安定レベル2に達する変位

δu : 損傷レベル3~4 または 安定レベル3に達する変位

⑤ 橋梁・高架橋の応答値の算定

動的解析用モデル
のイメージ

自由地盤系



構造物系

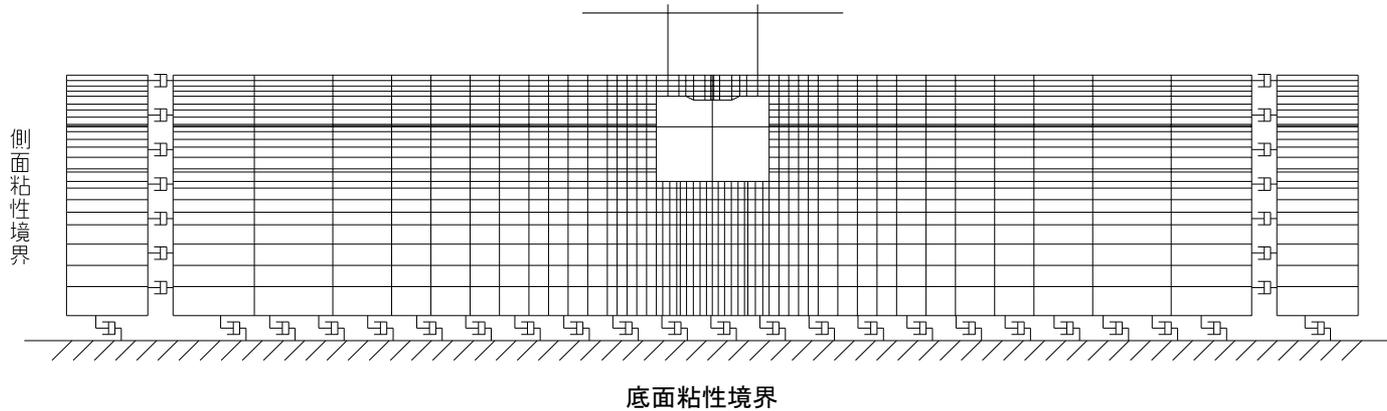
地盤ばね
(相互作用ばね)

設定した地震動
をモデルの基部
に入力して
応答値(変位
や応力等)
を求める

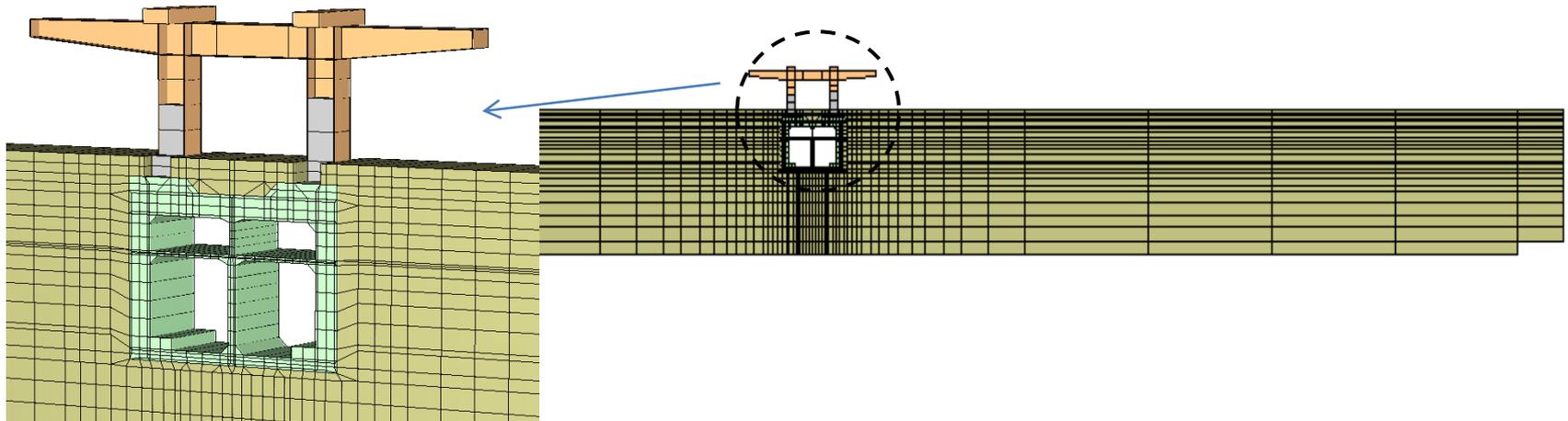
地震作用 = 設計地震動

その他のモデル(FEMモデル)

■地盤に平面ひずみ要素を用いたモデル



■部材にも平面ひずみ要素を用いたモデル



⑥ 橋梁・高架橋の耐震性能照査

1. 照査法

地震時の応答値(変位等)が構造物の有する耐震性能より小さいことを確認

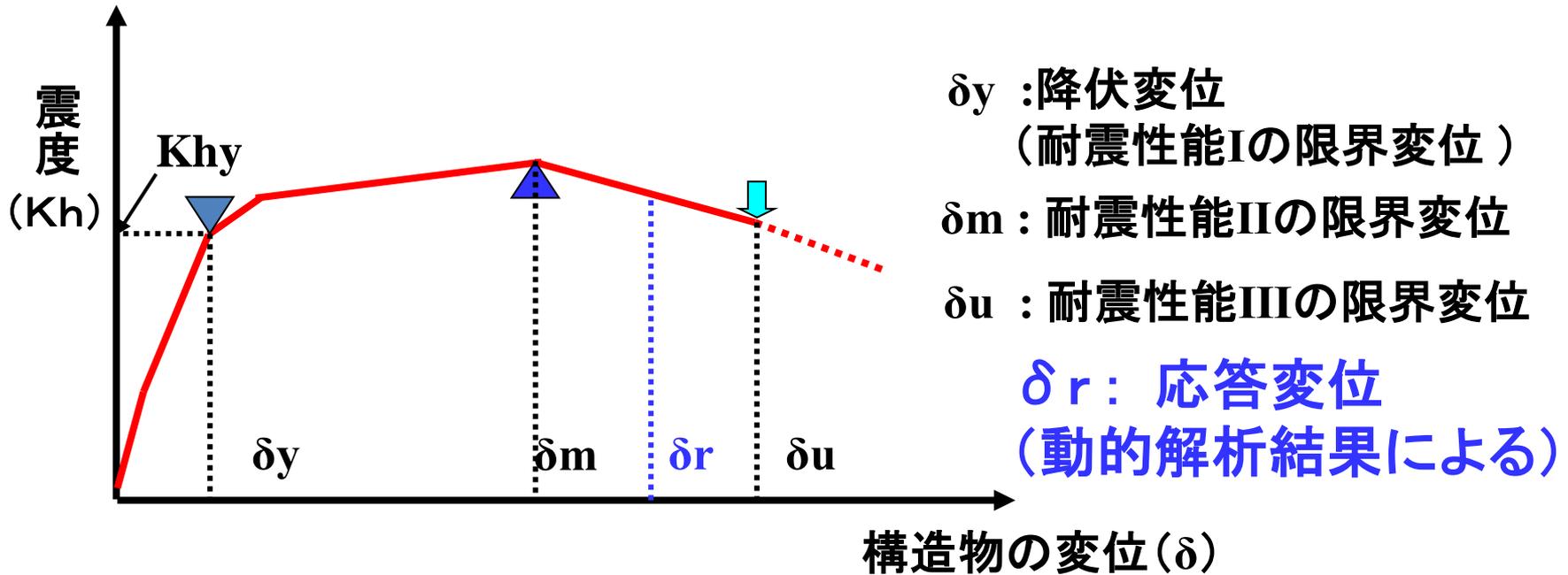
$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$$

Sd: 設計応答値 Rd: 設計耐震性能 γ_i : 構造物係数(1.1)

2. 耐震性能の照査項目

- ・部材の損傷レベル
- ・基礎の安定レベル
- ・全体系の変位の検討

構造物の耐震性能照査結果



動的解析結果 :	$\delta m < \delta r < \delta u$
	\vdots \downarrow \vdots
目標耐震性能 :	P II
	\vdots \downarrow \vdots
	再設計
	\vdots \downarrow \vdots
	安全