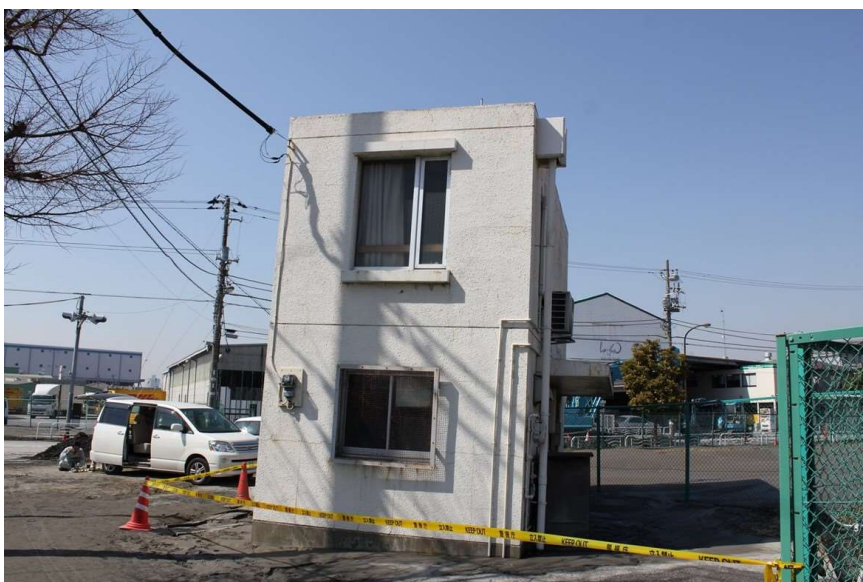


液状化抵抗の室内，原位置試験による 考え方と地盤情報の果たす役割

一般財団法人 GRI財団
三村 衛

本日の講演の内容

1. 室内試験による地盤の液状化抵抗値評価（あるべき姿？）
 - ・サンプリングから室内土質試験まで
 - ・自然堆積砂と再構成砂
2. 原位置試験による液状化抵抗値評価（指標による換算値）
 - ・RI-CPTの利活用～原位置密度値からの応力算定
 - ・SPTに基づく手法～道路橋示方書によるN値ベースの推定法
3. 弾塑性FEMによる有効応力解析
 - ・応力やひずみの情報が求められる・・・適材適所の使い方
4. 広域の液状化危険度評価～国、自治体の被害想定や防災計画
 - ・地盤情報の必要性・・・データベースの利活用
 - ・関西におけるいくつかの事例紹介



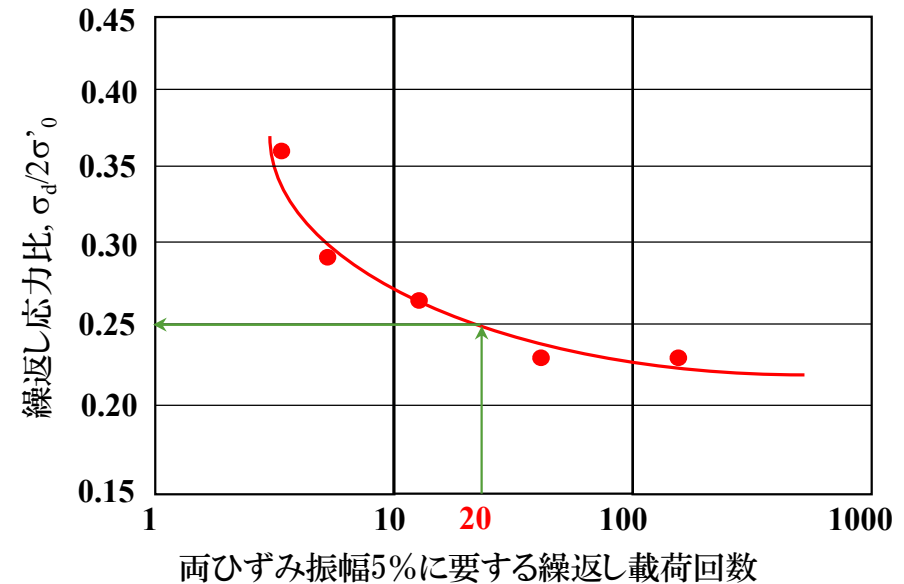
液状化評価を行う潜在的危険土層

- 深度20mまでの飽和土層（基本的には砂質土を対象）
- 地下水位が地表面から-10mより高い地盤の土層
- 細粒分含有率が35%以下、または35%以上であっても塑性指数 I_p が15以下の土
- $D_{50} < 10\text{mm}$ and $D_{10} < 1\text{mm}$

1. 室内試験による地盤の液状化抵抗値評価




- 土質力学が求めるあるべき姿
- 原位置の構造を保持した試料を如何に採取するか
- 液状化抵抗値の基準

液状化強度, R_L (室内試験法)



- 液状化強度曲線は非排水繰返し三軸試験によって求める
- 異なる応力振幅に対して両ひずみ振幅5%に要する繰返し载荷回数を実験によって求める。
- 複数の試験結果に対して回帰曲線を描く。
- 両ひずみ振幅5%に要する繰返し载荷回数20回に相当する応力比を求めてこれを R_{L20} として当該砂質土の液状化強度比と規定する。

室内試験によって R_L を求める際の課題

- 室内試験によって液状化強度を求める場合、試料の品質が制約条件として立ちはだかる。

- 必要な値は原位置に堆積している状態における土の液状化強度であるため、原位置で有している堆積構造を壊さずに採取し、室内に持ち込む必要がある。

- 乱れの少ない状態で採取するためには特殊な方法でコアリングしながら内管に試料を確保するようなサンプリングが求められる。→引き上げて水を抜いて凍結させ輸送する(間隙構造を変化させない)。

- 凍結状態で供試体に成形し、試験装置にセット、側圧をかけて融解させる。この時自由に吸水させて間隙構造を維持する→**本当に大丈夫か？**

地盤凍結による乱れの少ない試料採取

理想的には液状化対象層が存在する地盤を原位置で凍結させ、その後凍結した状態で試料採取を実施する。

- 凍結時に間隙水が凍る際に膨張するため、膨張分相当の水が非凍結部へ移動するのに十分遅い速度で凍結させる必要がある。
- 液体窒素車を週単位で稼働させることになり、非常に高価となるので、重要な構造物、大規模プロジェクトで予算規模が大きい場合でないと実施できない。



研究者人生の中で3回：東扇島(港湾空港研究所)、千葉検見川(大手ゼネコンのマンション建設現場)、全国4河川敷(国交省・阪神淡路大震災直後)

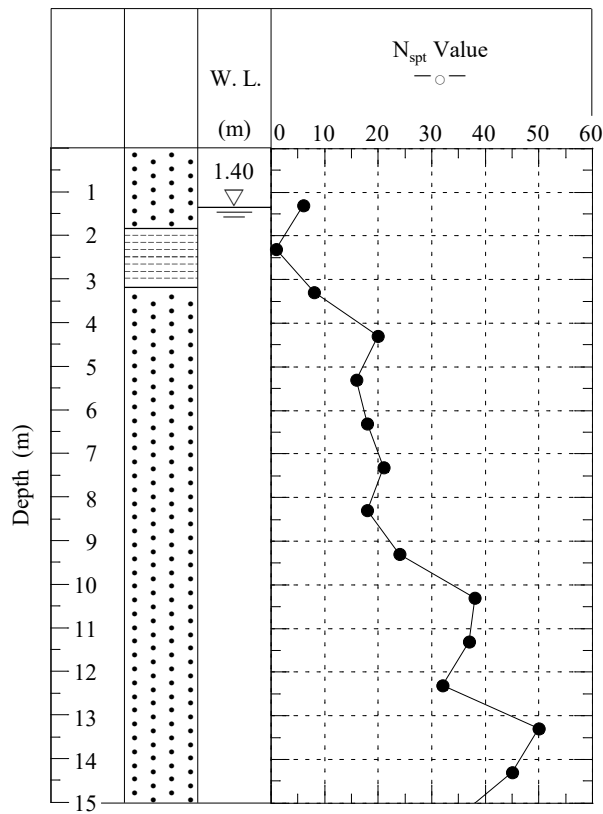
1996年国交省による液状化に関する地盤調査



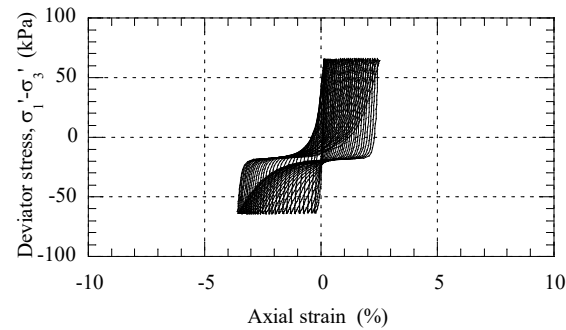
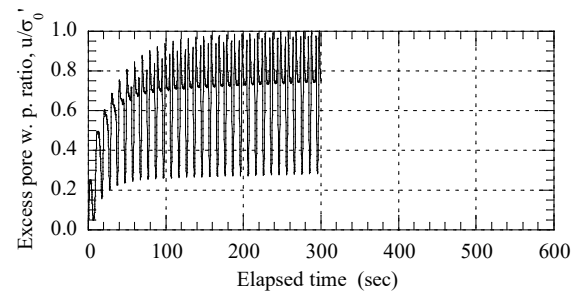
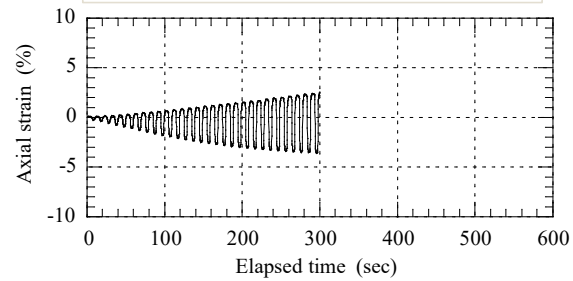
- 比較的N値の高い（20程度）自然堆積砂の液状化可能性についての調査
- 全国7河川・・・そのうち砂礫分の少ない4河川の砂質土を地盤凍結工法によって採取し、室内繰返し三軸試験で液状化強度曲線を求める。
- 同時にSPT, CPTなどのサウンディング試験を実施し、凍結砂試料による R_{L20} と原位置試験による R_{L20} との関係を求め、以後はサウンディングのみで原位置液状化強度を推定するスキームを確立する。

利根川砂の室内試験結果

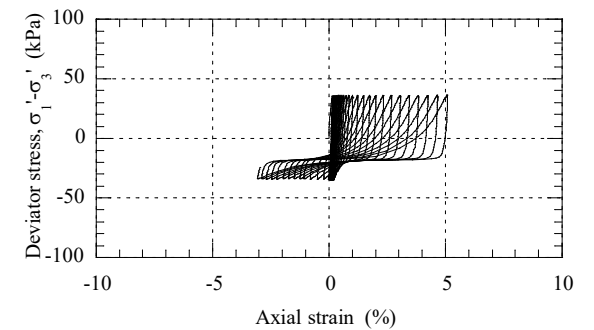
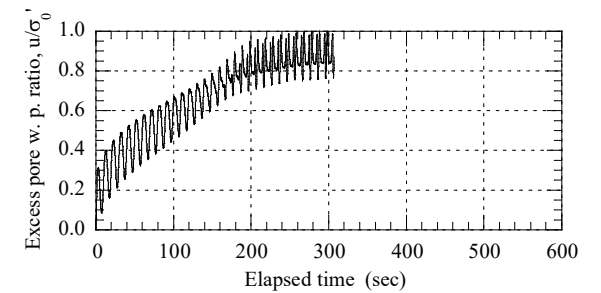
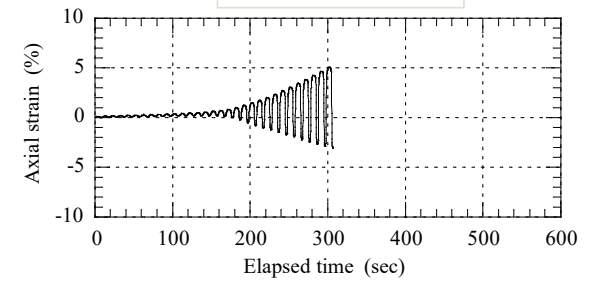
標準貫入試験結果



凍結サンプリング試料

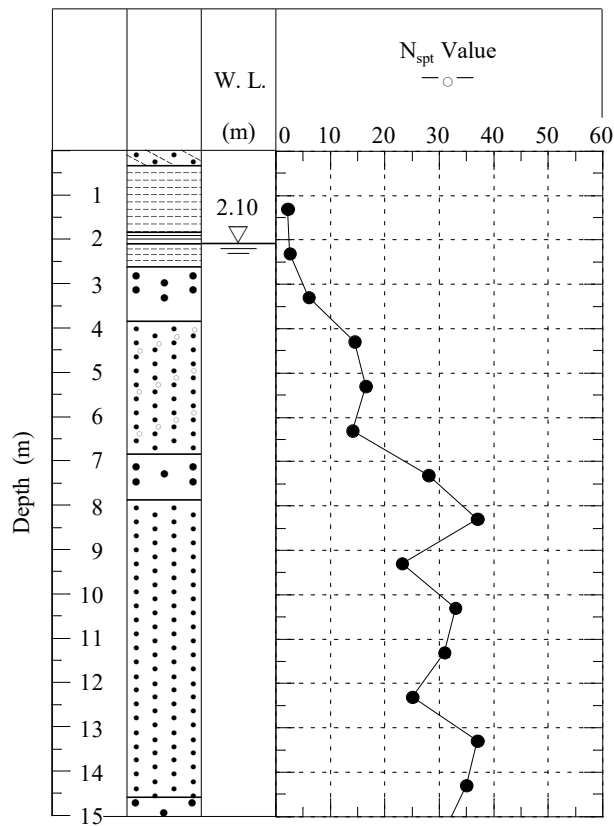


再構成試料

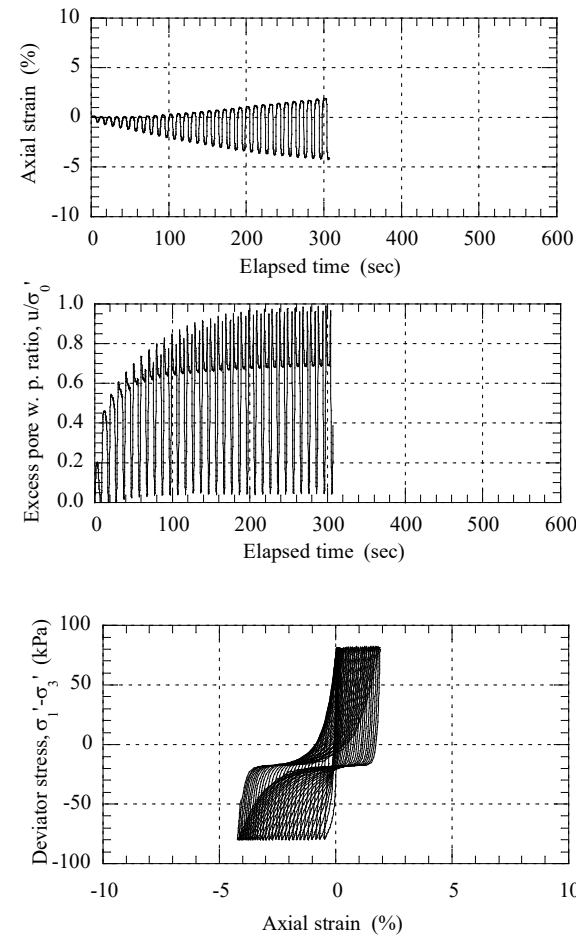


名取川砂の室内試験結果

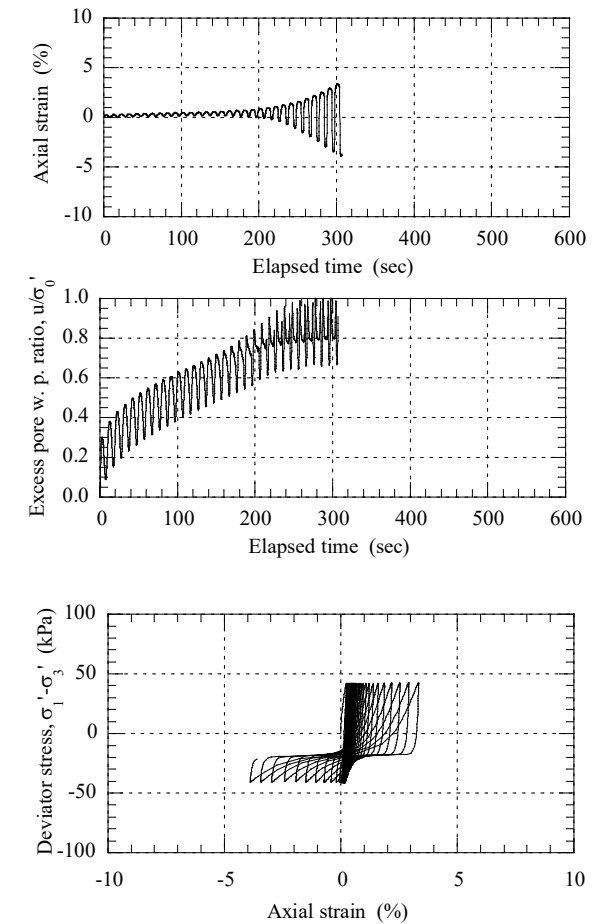
標準貫入試験結果



凍結サンプリング試料

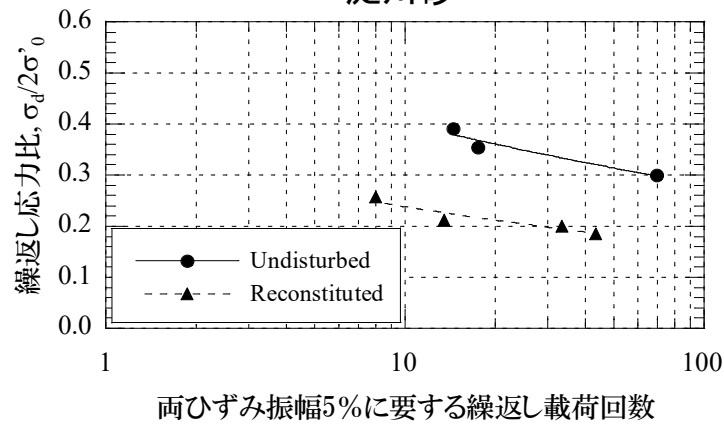


再構成試料

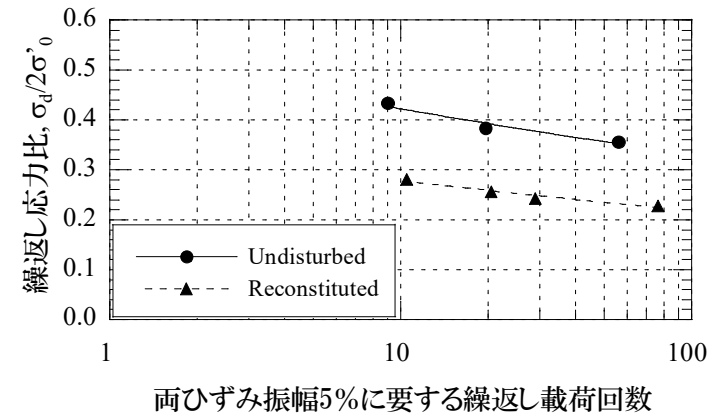


自然堆積砂と再構成砂の液状化強度曲線

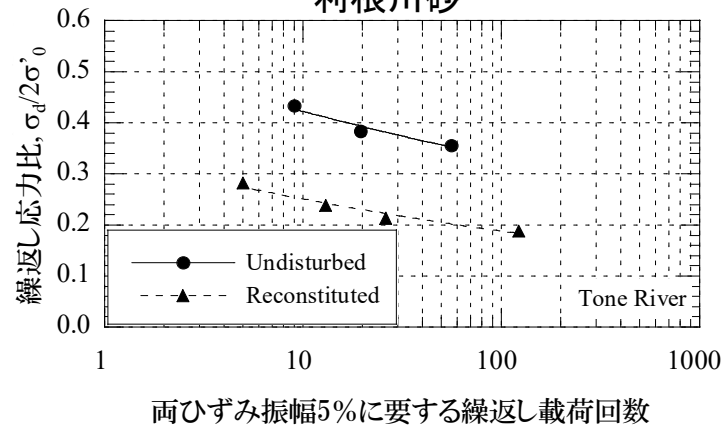
淀川砂



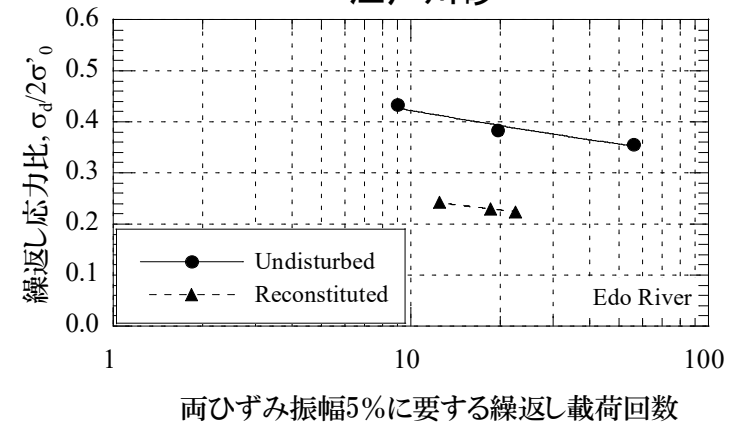
名取川砂



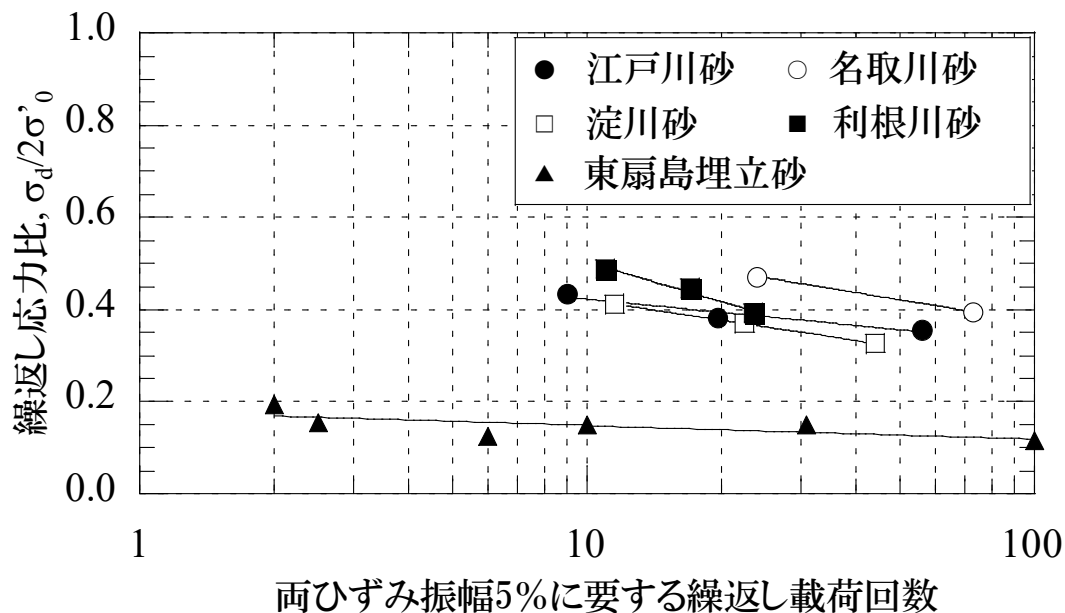
利根川砂



江戸川砂



自然堆積砂と埋立砂の液状化強度曲線



- N値20程度の自然堆積砂では R_{L20} は0.38～0.50の値をとり、かなり液状化抵抗は大きい。
- 東扇島埋立地から凍結サンプリングで採取した砂(N値5前後)では R_{L20} は0.15程度と非常に低い液状化抵抗値を示す。
- 原位置密度に調整した再構成砂では原位置液状化抵抗値の6割程度の R_{L20} となり、砂の構造による液状化抵抗値への影響が無視できない。

2. 原位置試験による液状化抵抗値評価

- 試料採取に比べて安価に、かつ原位置における地盤材料の液状化抵抗に関する情報を得ることができる。
- 得られる測定値は物性値ではなく指標 (INDEX) であり、物性値としての強度との関連付けをして換算値として求められる。……正確な強度値が必要となる。

2.1 実プロジェクトによる事例～RI-CPTの活用

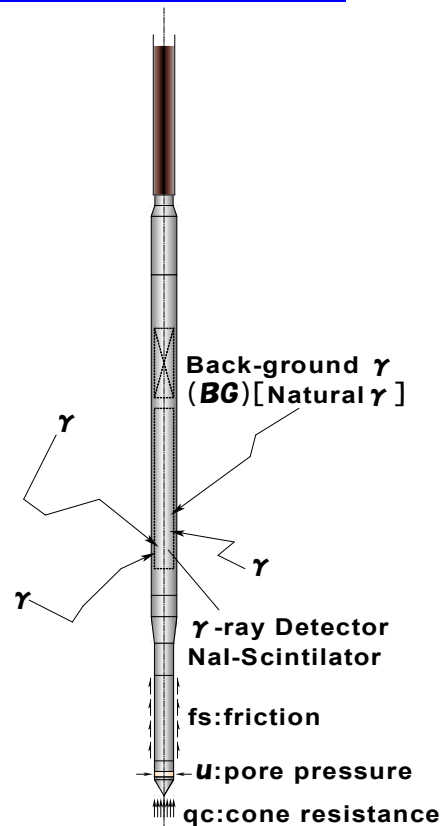
- 原位置試験にRI-CPTを利用→先端抵抗値、周面摩擦値、間隙水圧値、湿潤密度、含水比から土質、地盤内応力を求め、先端抵抗値から換算値としての液状化抵抗値を算定する手法を提示。
- 液状化抵抗値として、地盤凍結工法で採取した自然堆積砂の室内繰返し三軸試験による R_{L20} を利用する。
- 原位置相対密度をCPTから推定し、相対密度～液状化応力比関係を介して原位置液状化抵抗値を換算値として求める。

RIコーン貫入試験機とは？

- 電気式静的コーンに、ガンマ線源とNaI検出管を内蔵した密度コーン(Nuclear Density Cone Penetrometer; ND-CP)と中性子線源とヘリウム検出管を内蔵した水分コーン(Neutron Moisture Cone Penetrometer; NM-CP)を総称してRIコーン貫入試験機という。
- ND-CPは、ガンマ線を放射し、土中を通過する間に密度の高低によって検出管に戻ってくる量が異なる性質を利用して地盤密度を測定する。密度が深さ方向に連続して測定できるので、**任意の深さの鉛直応力が算定できる**利点を有する。
- NM-CPは高速中性子を発する線源を有し、これが水素イオンと反応して熱中性子となったものを検出管で測定する。土中での水素イオンは H_2O の形で存在するため、含水量を測定できる。
- 本試験機は京大とSRE(ソイルアンドロックエンジニアリング)が共同開発したものである。

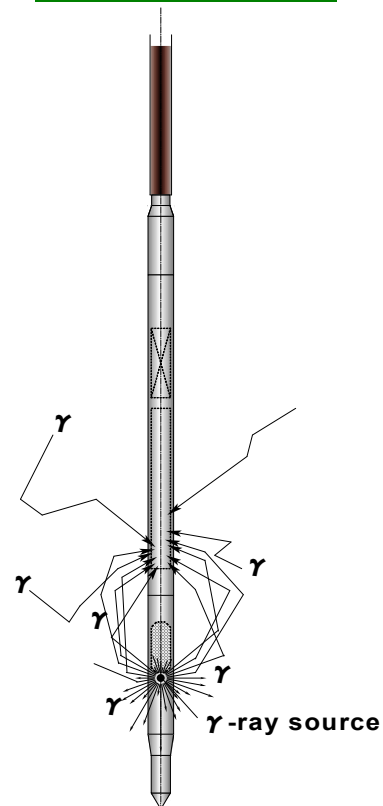
RIコーン貫入試験機（密度コーンと水分コーン）

1st. Penetration (CPTU + Natural γ)



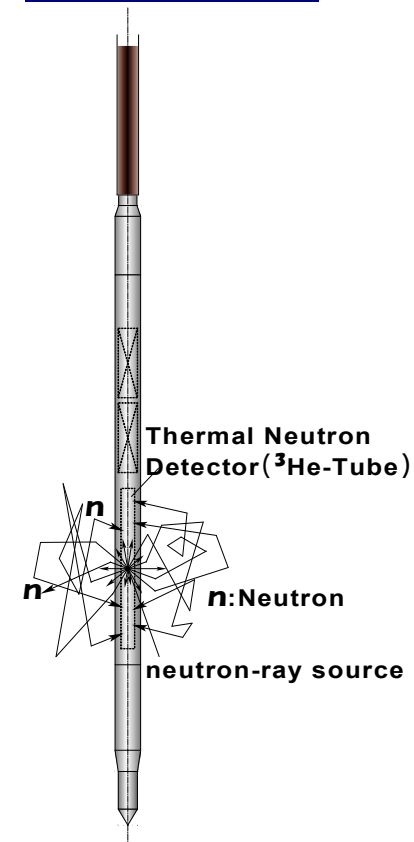
RI -Density gauge probe
+ CPTU

2nd. Penetration (γ - γ)



RI -Density gauge probe
+ γ -ray source

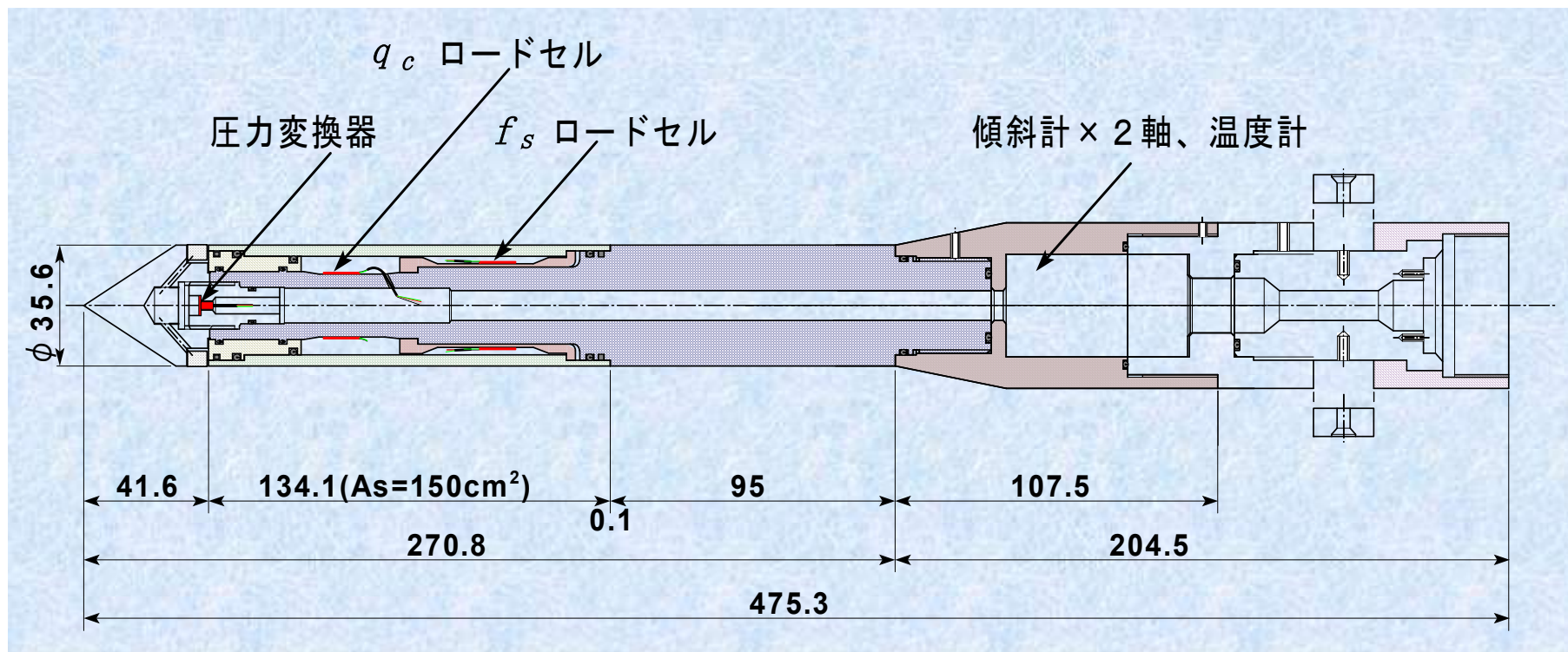
3rd. Penetration (Neutron)



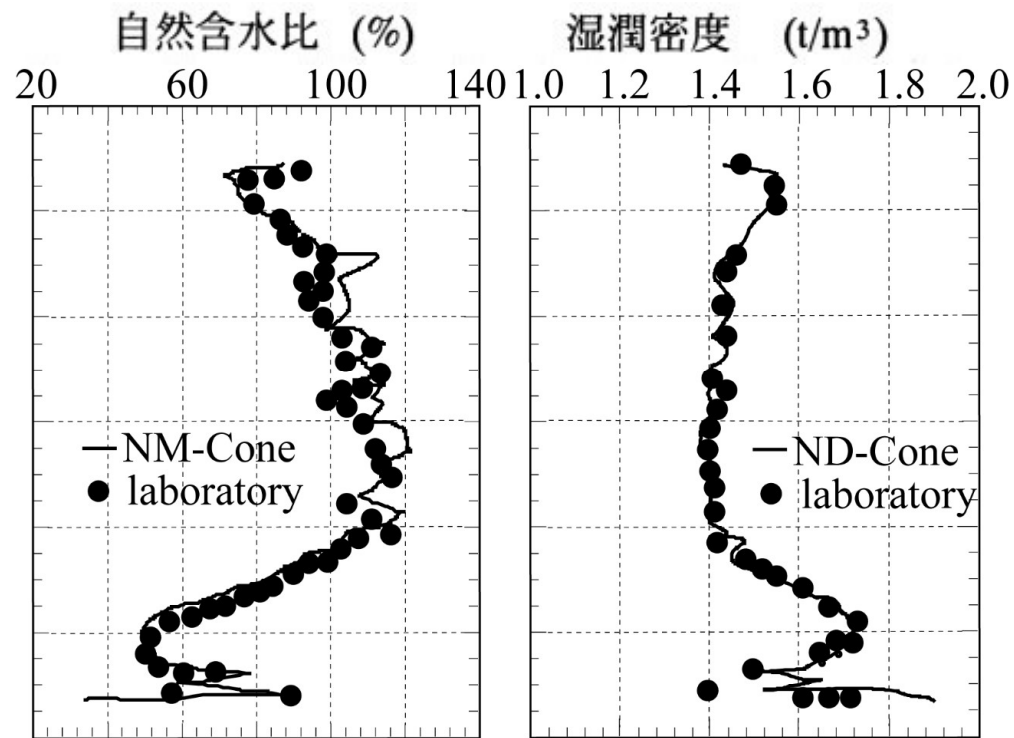
RI -Moisture probe

RIコーンの高精度化と世界標準への対応

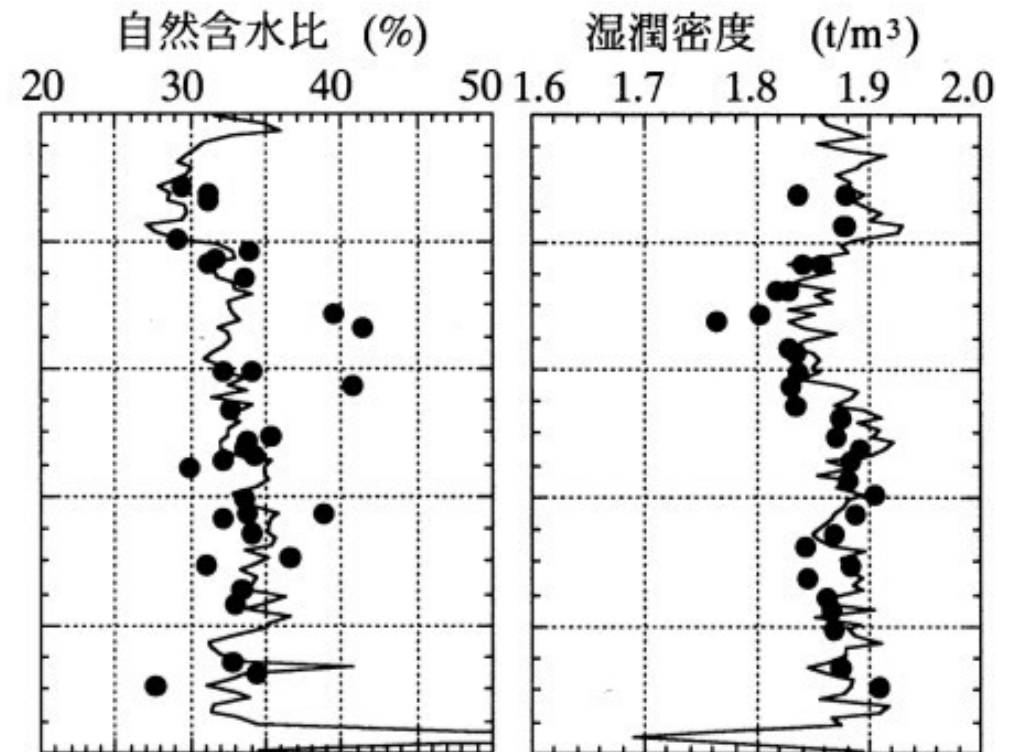
- コーン本体の堅牢化 (日本の砂礫優勢地盤への対応)・・・トラブル防止
- 傾斜計の内蔵・・・貫入の直線性, 偏心応力による不正確値測定防止
- 温度計の内蔵・・・金属部材の温度による伸縮を測定値から除去する



RIコーンの測定精度



錦海湾（粘土地盤の事例）



東扇島（砂地盤の事例）

RIコーンによる砂質地盤の液状化抵抗評価

CPTなどにより得られた原位置データ (q_c , ρ_t など)



Lancellottaの式

$$D_r = -98 + 66 \log (q_c / (\sigma_{v0}'))$$

原位置砂地盤の相対密度(D_r)を推定

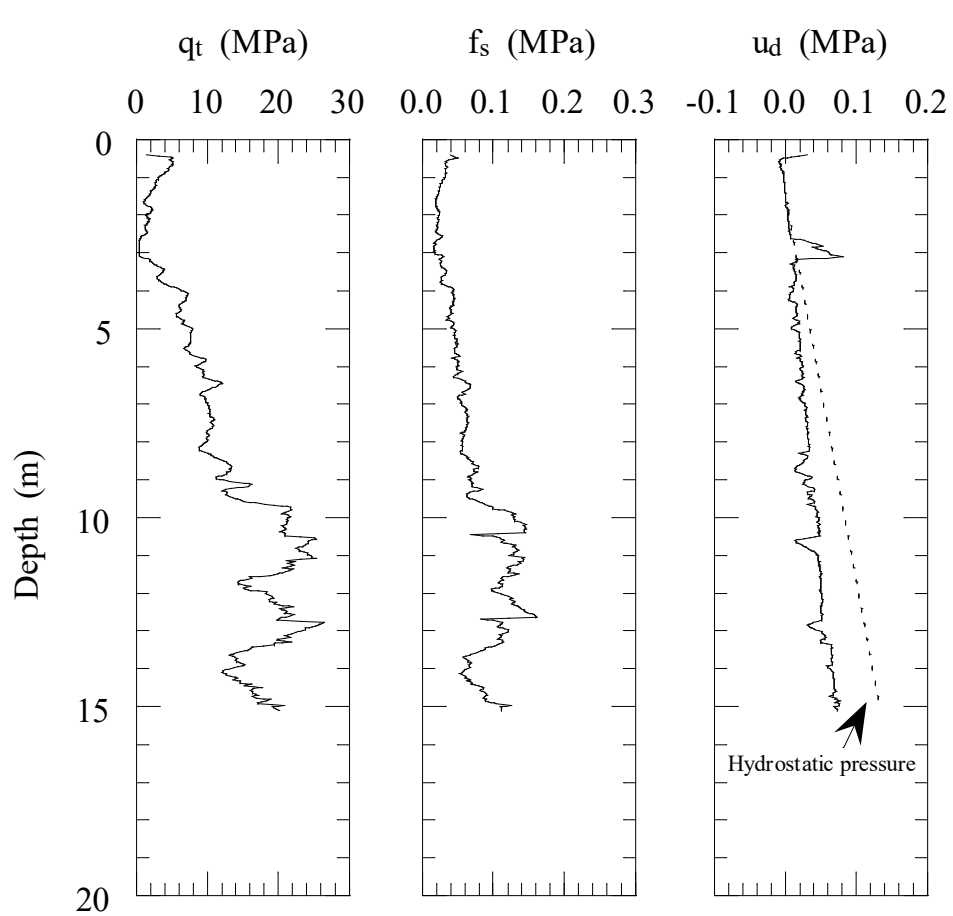


時松・吉見の式

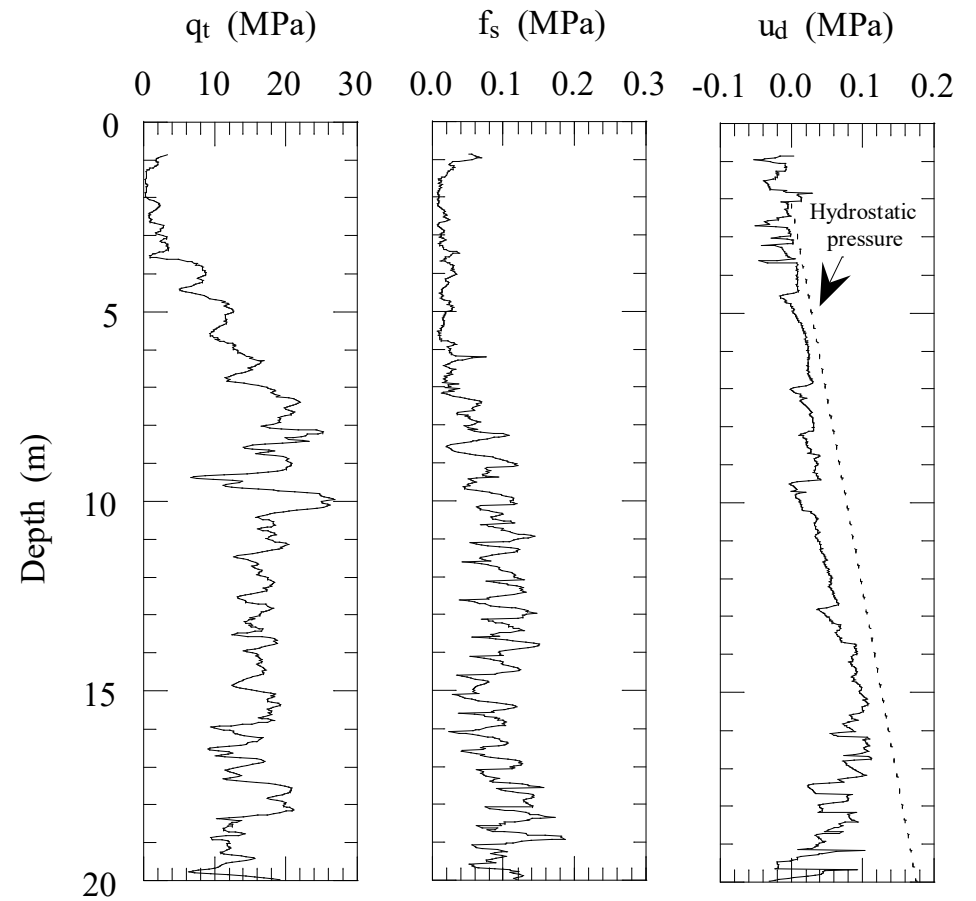
$$(\sigma_d / 2\sigma_{v0}')_{lab} = 1.05 \cdot 0.45(D_r / 100 + (D_r / 84)^{14})$$

原位置砂地盤の液状化強度($(\sigma_d / 2\sigma_{v0}')_{lab}$)の推定

RIコーン貫入試験結果 (1)

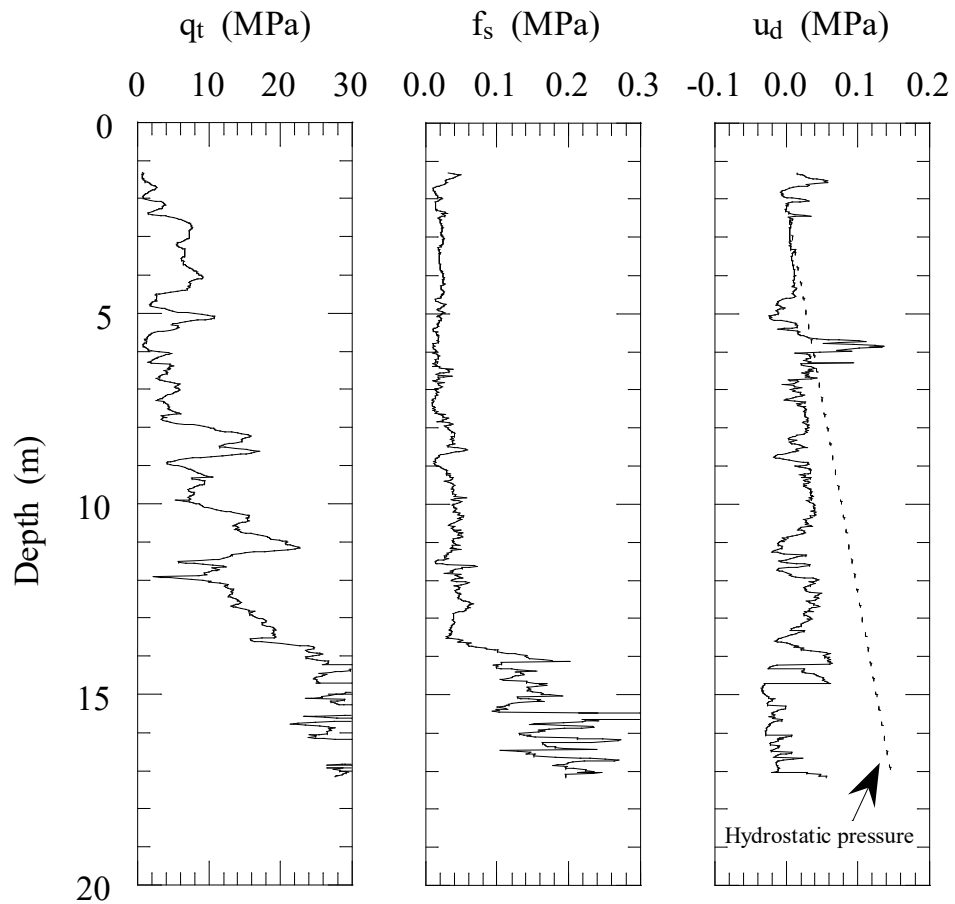


利根川

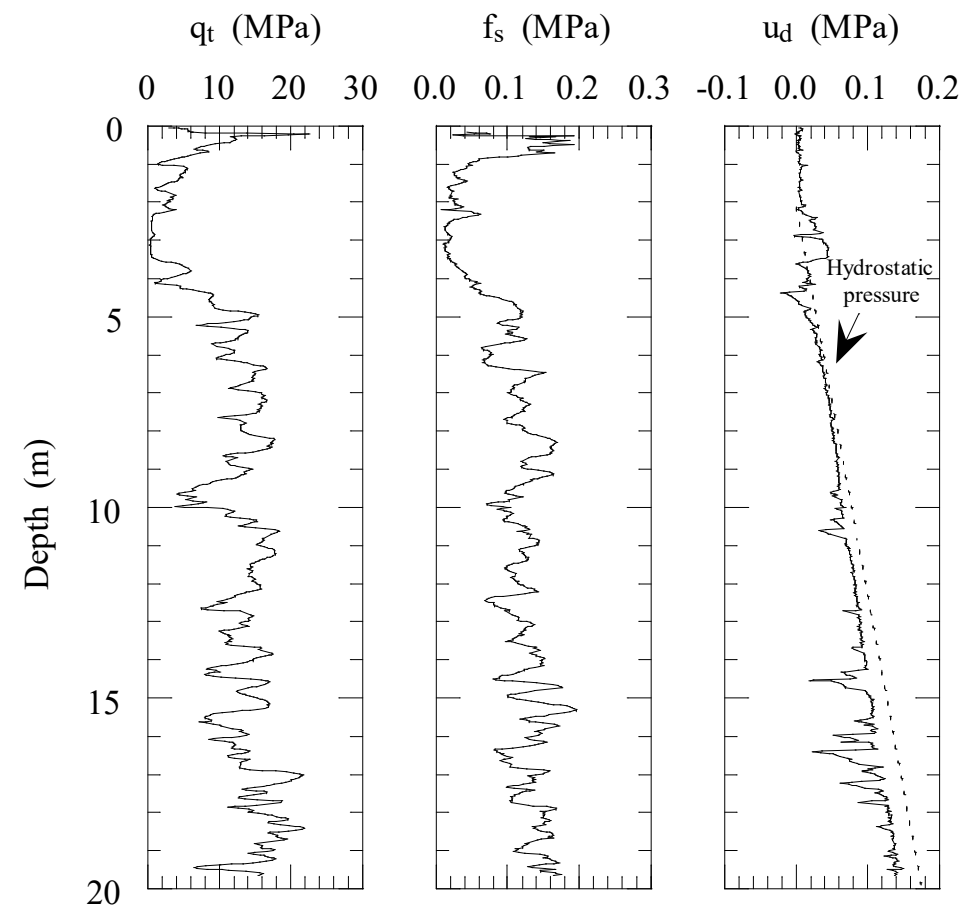


名取川

RIコーン貫入試験結果 (2)

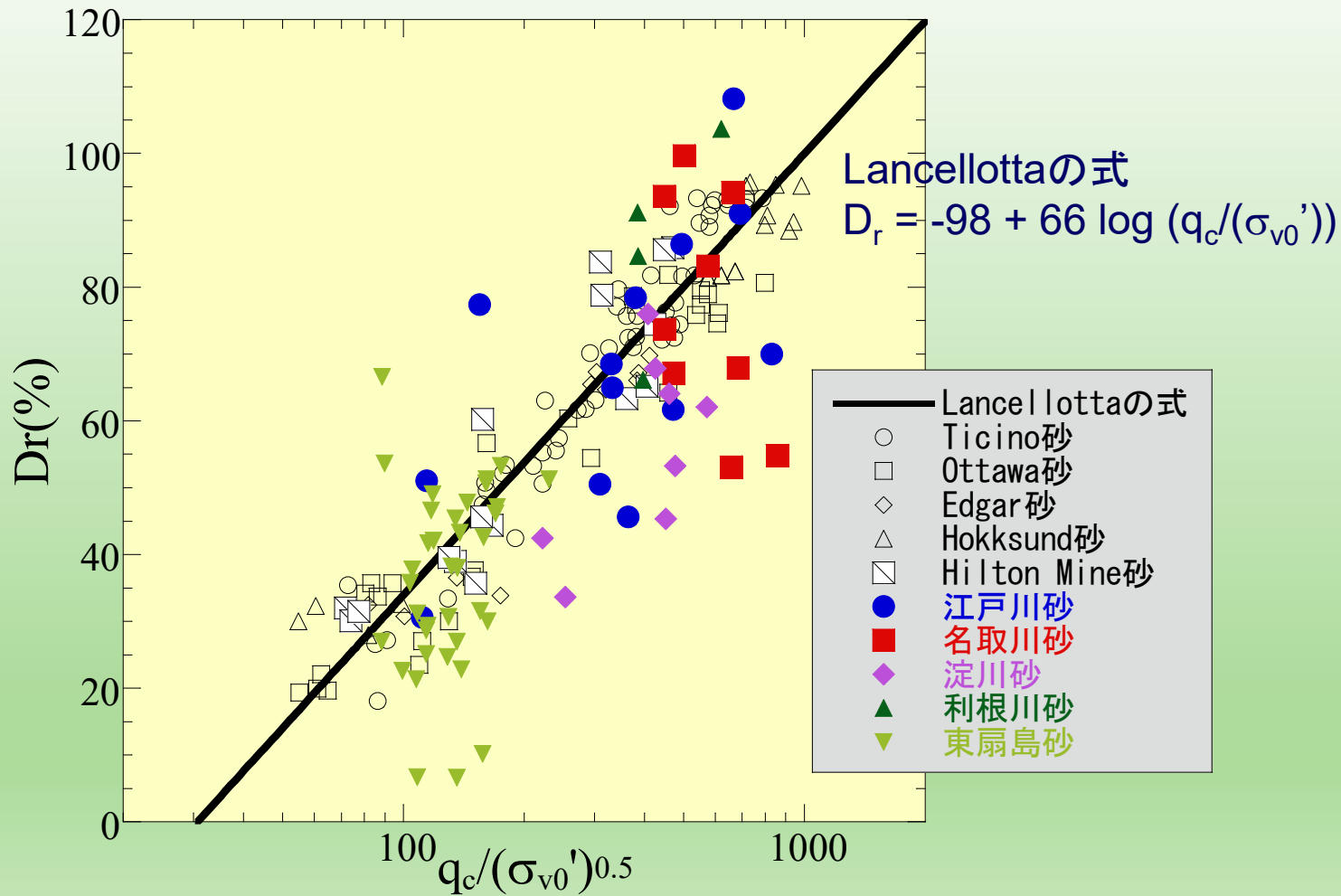


江戸川

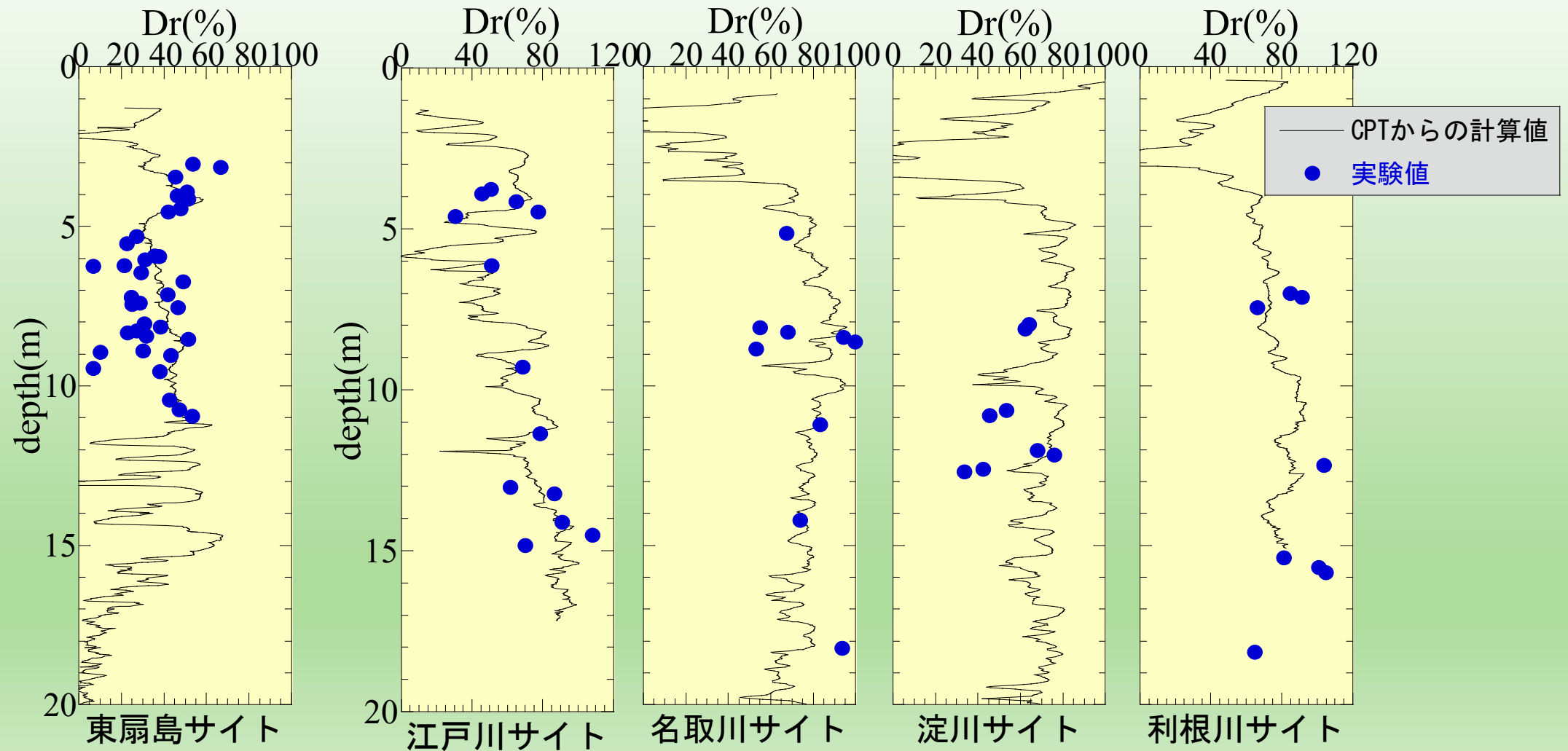


淀川

RIコーン測定値から得られる換算相対密度, D_r



換算相対密度, D_r の妥当性検証

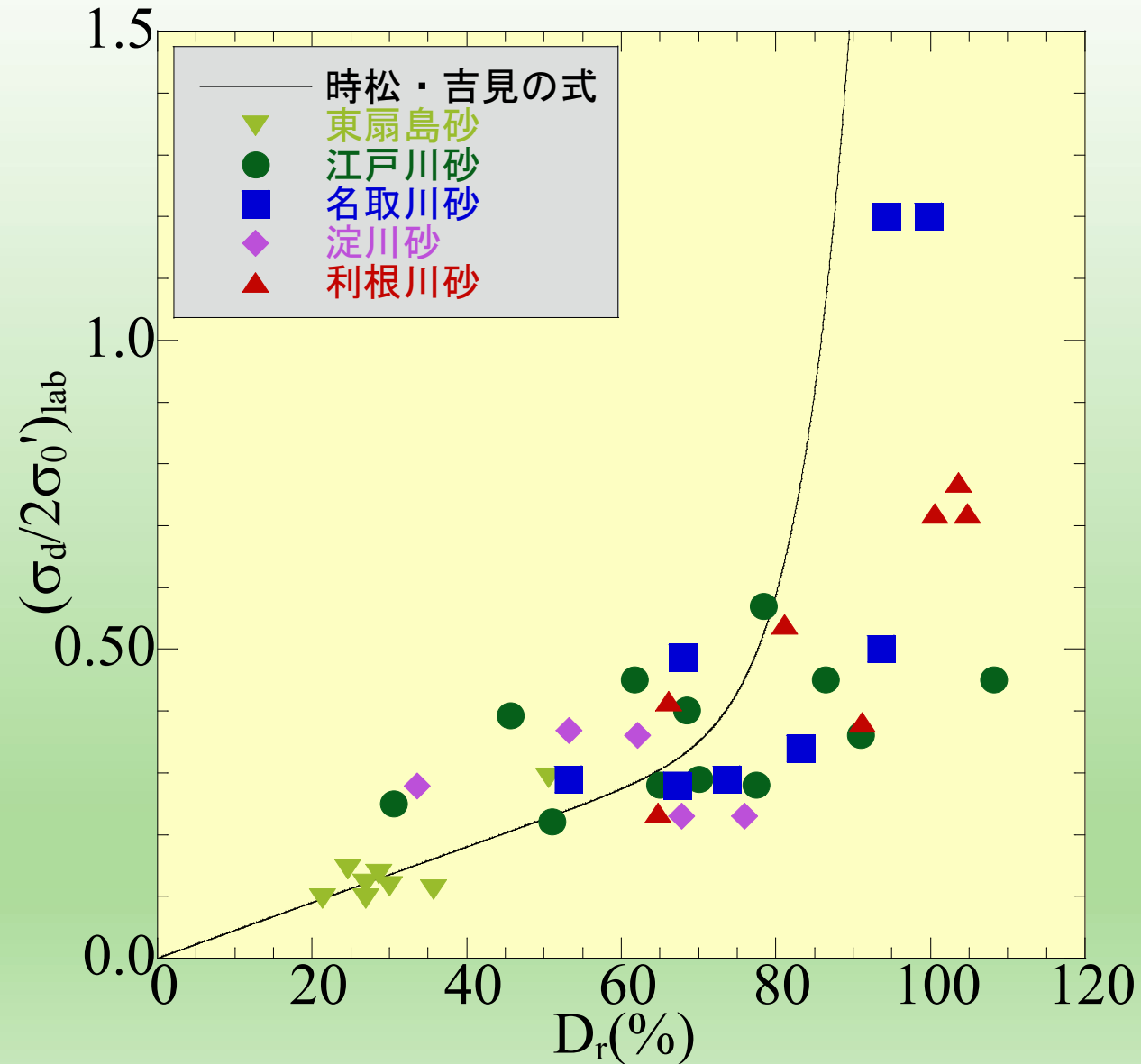


RIコーンによる液状化抵抗値の評価

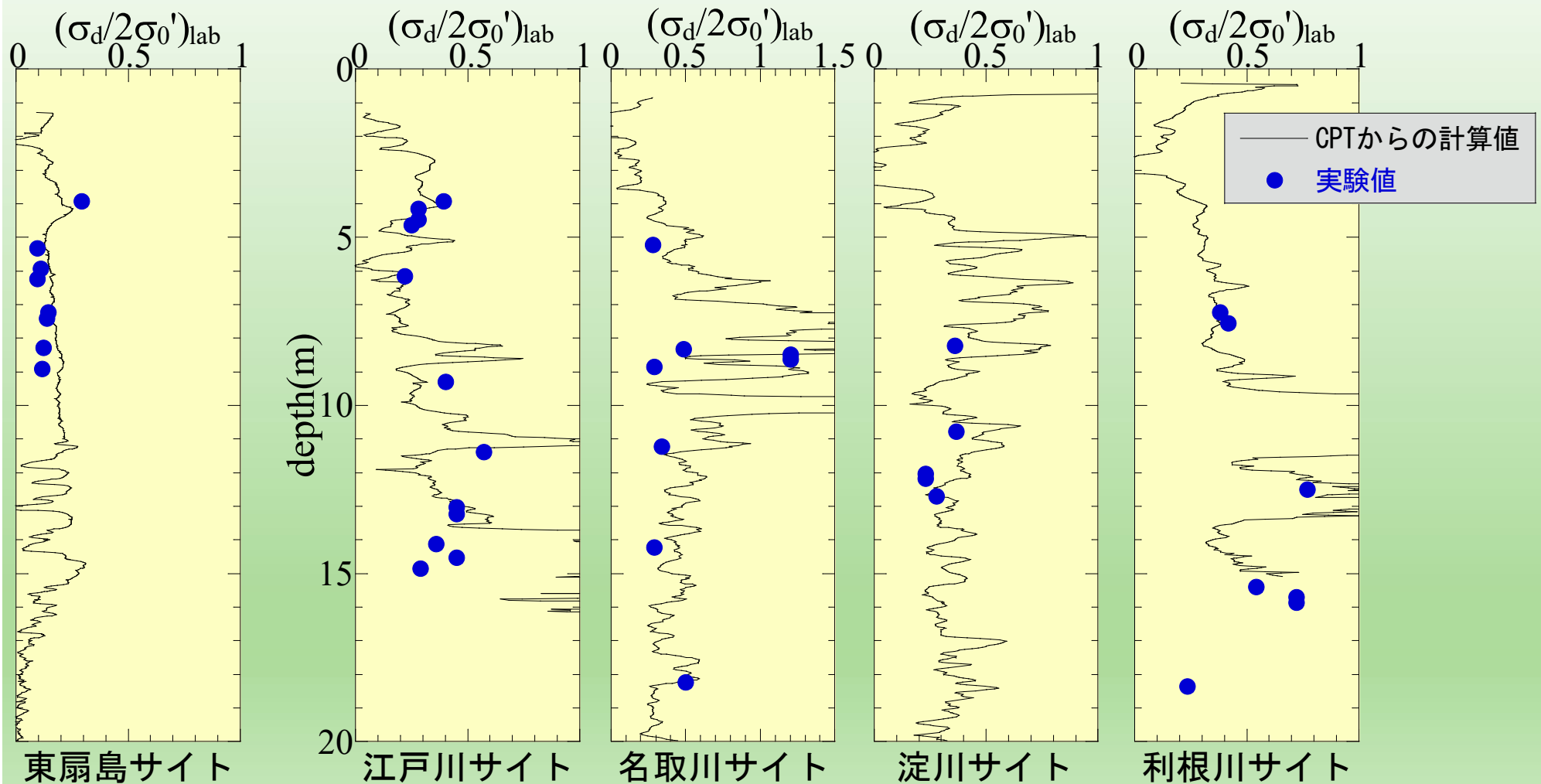
- 現場凍結工法で採取した乱れの少ない試料を用いて室内繰返し三軸試験によって求めた R_{L20} を原位置サウンディング(RI-CPT)による推定値と関係づけた。
- それなりの推定ができることを確認した。



- 現場凍結工法で試料採取を行わずとも原位置においてサウンディング試験を実施すれば液状化抵抗値の推定が可能である。



液状化強度比の原位置深度分布と実験値との比較



原位置試験による液状化強度評価法の試行 ～地盤凍結工法による高品質試料の活用～

- 地盤凍結工法によって採取された、乱れの少ない砂試料(原位置の状態を保持した構造を保持していると想定)に対する室内繰返し三軸試験によって液状化強度特性を把握する。……例外的
- 原位置と同密度で再構成した供試体の液状化強度は地盤凍結工法で採取した自然堆積砂試料に比べてかなり低いものとなる。
- 埋立に用いられる砂の液状化強度は低く、自然堆積砂とは挙動特性がかなり異なる。
- 地盤凍結工法で採取した高品質の砂試料から得られる液状化強度を、原位置試験(サウンディング)による換算値と関係づけた。これにより、常に高価な地盤凍結工法を適用することなく、原位置試験による指標を測定することによって砂質地盤の液状化強度を推定するスキームを提示した。

2.2 標準貫入試験を用いる一般的手法

- 日本で最も一般的に行われる標準貫入試験のN値を活用する液状化抵抗値推定手法で、地盤調査ボーリングの数だけデータが揃っている。
- 道路橋示方書の基準がオーソライズされており、多くの実績データの蓄積がある。
- 液状化被害発生の有無を数値で評価できるため、判定に使いやすい。

標準貫入試験による液状化抵抗値の評価 (1)

- 我が国で一般的に行われているN値に基づく手法(例えば道路橋示方書による)

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

$$N_a = \begin{cases} c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.4 & (N_a < 14) \\ \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} \cdot N_1 & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma'_v + 70)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

標準貫入試験による液状化抵抗値の評価 (2)

$$R = c_W \cdot R_L \quad c_W: \text{地震動特性による補正係数}$$

レベル1地震、レベル2・タイプ1地震に対し

$$c_W = 1.0$$

レベル2・タイプ2地震に対し

$$c_W = \begin{array}{l} 1.0 \quad (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 \quad (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 \quad (R_L > 0.4) \end{array}$$

F_L 法に基づく任意深さにおける液状化抵抗率評価

液状化に対する抵抗率 $F_L = R / L$

地震時せん断応力比 $L : (1 - 0.015z) \cdot k_{hGL} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v}$

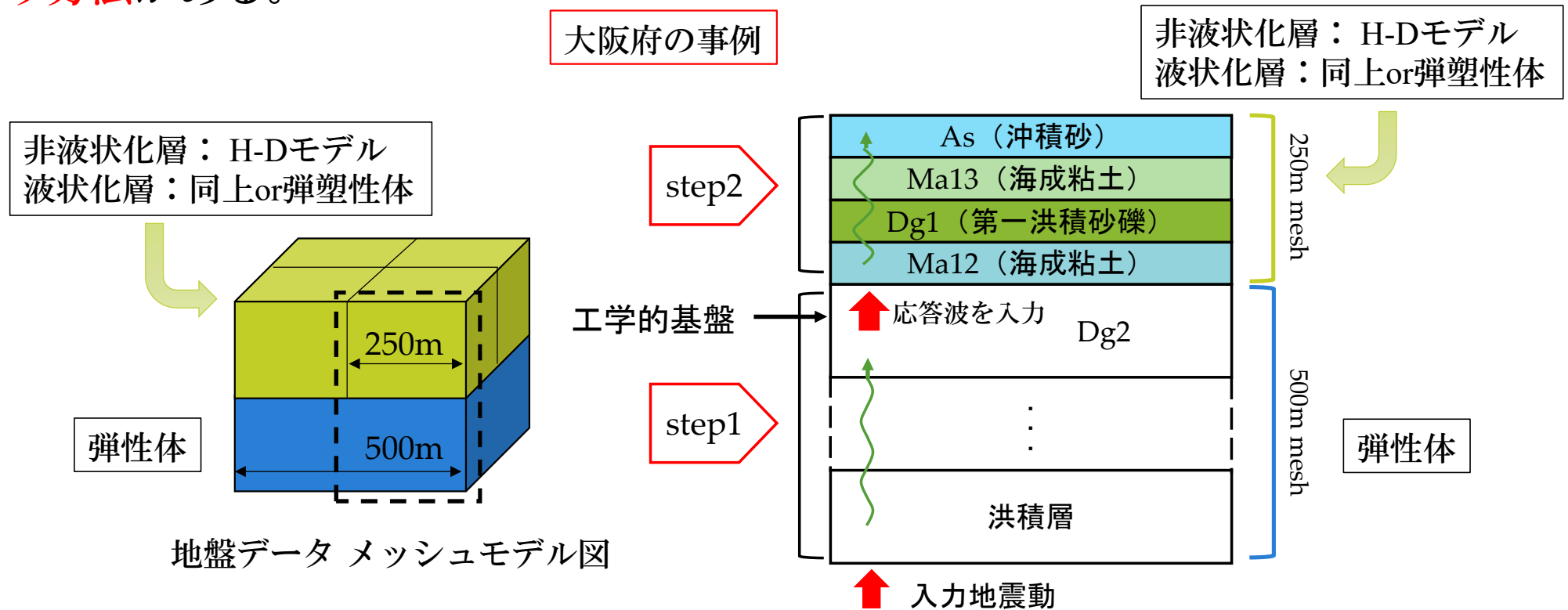
地盤面の設計水平震度 $k_{hGL} = c_z \cdot k_{hGL0}$ c_z : 地域別補正係数

地盤面の設計水平震度の標準値, k_{hGL0}

| | レベル1地震動 | レベル2地震動 (タイプⅠ) | レベル2地震動 (タイプⅡ) |
|------|---------|-------------------|-------------------|
| Ⅰ種地盤 | 0.12 | 0.50 | 0.80 |
| Ⅱ種地盤 | 0.15 | 0.45 | 0.70 |
| Ⅲ種地盤 | 0.18 | 0.40 | 0.60 |

地震時に地盤内に動員されるせん断応力

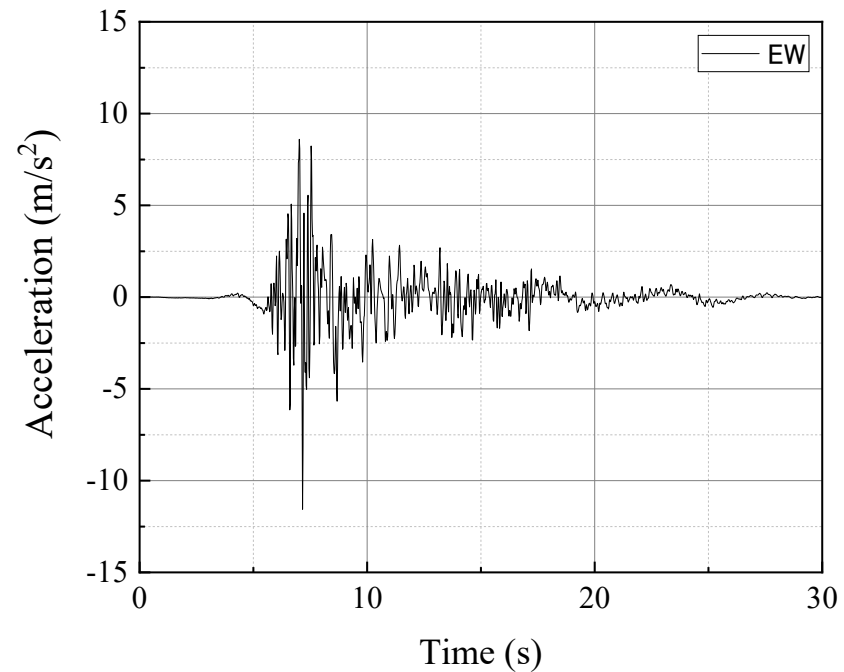
- 簡易法 (F_L 法) では地域の特徴と地震動の種別からimplicitに与えられる。
- もう一つの考え方として地震応答解析を行って表層における地震波を計算するという方法がある。



入力地震動

上町断層帯地震（UMT；直下型）

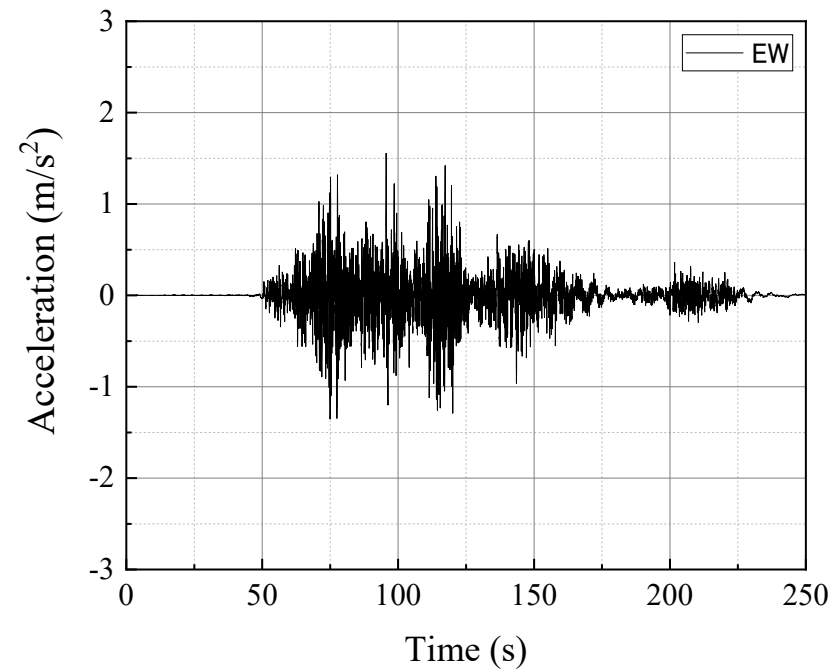
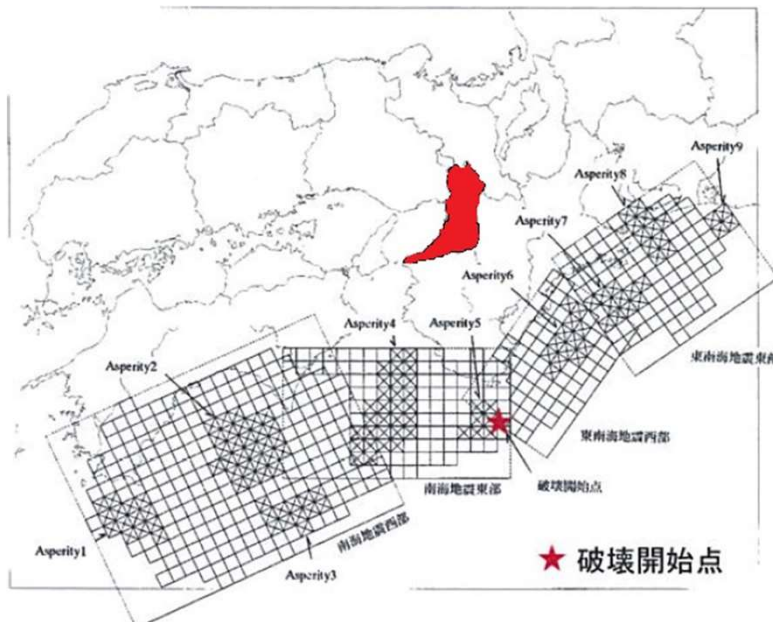
- 500mメッシュごとに波形を作成（大阪府）
- 入力最大加速度： $2.9\text{m/s}^2 \sim 13.2\text{m/s}^2$
- 短い震動継続時間



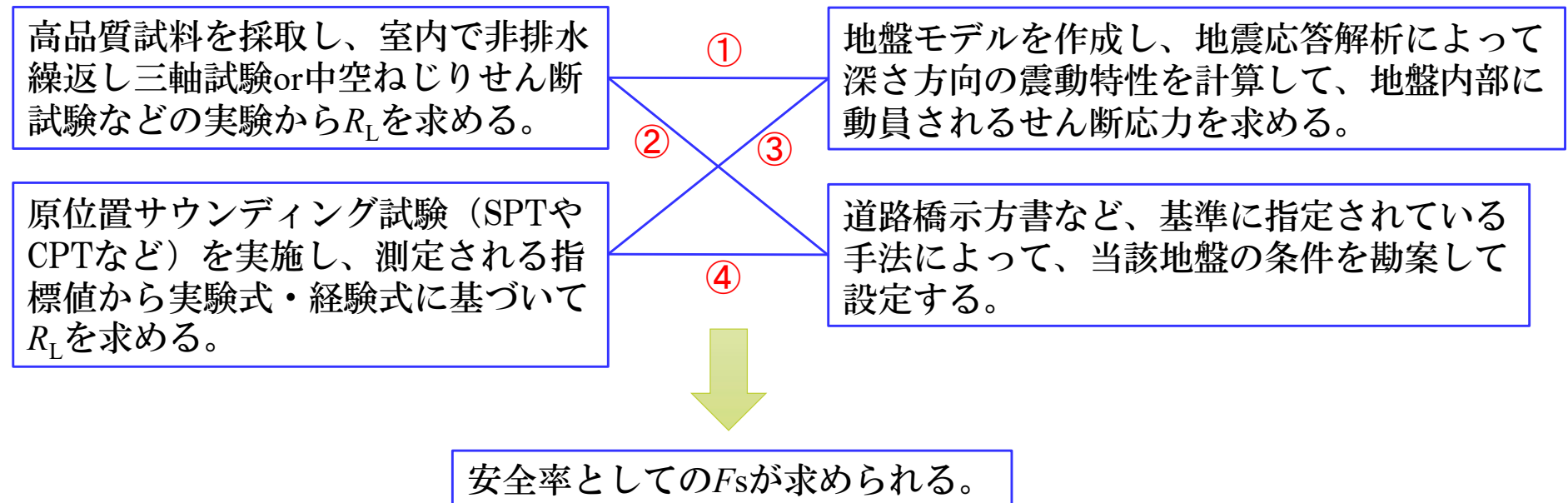
入力地震動

南海トラフ地震（TNN；海溝型）

- 500mメッシュごとに波形を作成（大阪府）
- 入力最大加速度： $1.2\text{m/s}^2 \sim 3.5\text{m/s}^2$
- 長い震動継続時間



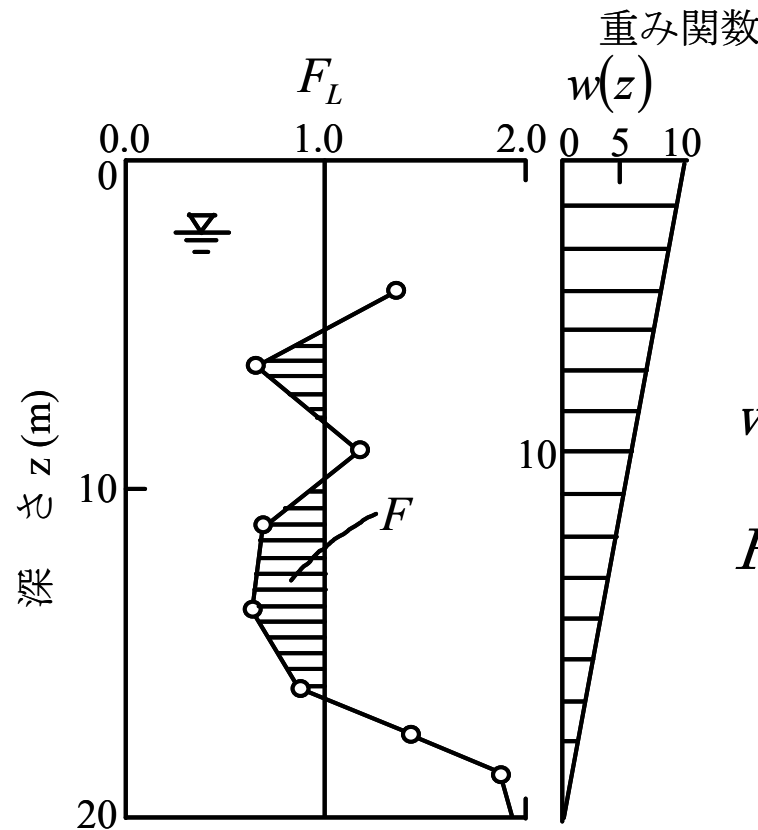
液状化危険度評価



- ①は理想的であるが、試料採取、実験、解析とフルスペックの知識と技術が要求される。
- ④は一般的な簡易法として実務的に広く実施されている組み合わせである。
- ②、③は得られる情報のバランス（技術的にも経済的にも）に注意が必要。

地盤としての液状化程度の激しさを表す指標、 P_L

- 地盤として液状化による被害が生じるかどうかを判断する指標。
- 地震被害想定や実務目的では災害と関連付けられるので広く用いられる。



$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz$$

$w(z)$: 深さ z に対する重み関数

$$F : \begin{cases} F_L < 1.0 \text{ の時} & 1 - F_L \\ F_L \geq 1.0 \text{ の時} & 0 \end{cases}$$

3. 有効応力解析(弾塑性FEM)による評価

液状化強度曲線（室内実験結果）を表現できる弾塑性モデルのパラメータを設定

動的変形特性（室内実験結果）を表現できる弾塑性モデルのパラメータを設定

入力地震動から工学的基盤に地震動を上げ、工学的基盤における応答波を地盤モデルに入力する。

地盤モデルの要素の応力状態（有効応力など）が得られる。

有効応力解析(弾塑性FEM)を用いた検討

有効応力減少比を用いて、
沖積砂層要素の液状化判定を行う。

$$ESDR = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$$

ESDR: 有効応力減少比 effective stress-decreasing ratio

σ'_m : 有効応力 σ'_{m0} : 初期有効応力

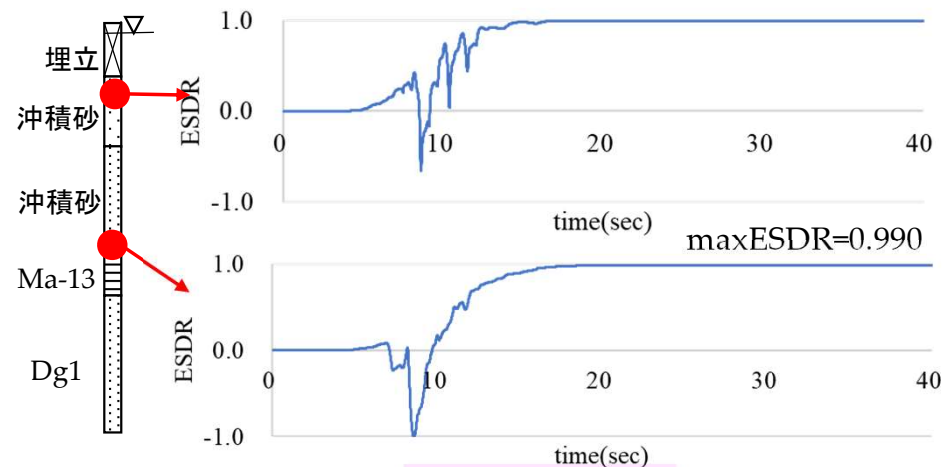
さらに要素毎のESDRに
深さ方向に重みづけし、
液状化危険度指数LRIを算出。

$$LRI = \int_0^{20} ESDR \cdot (1 - 0.05z) dz$$

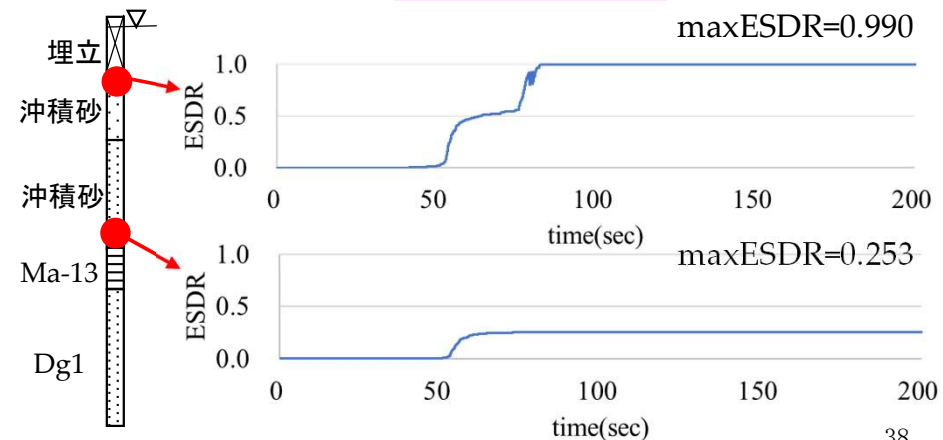
LRI: liquefaction risk index
z: 深度(m)

(Oka et al 2016)

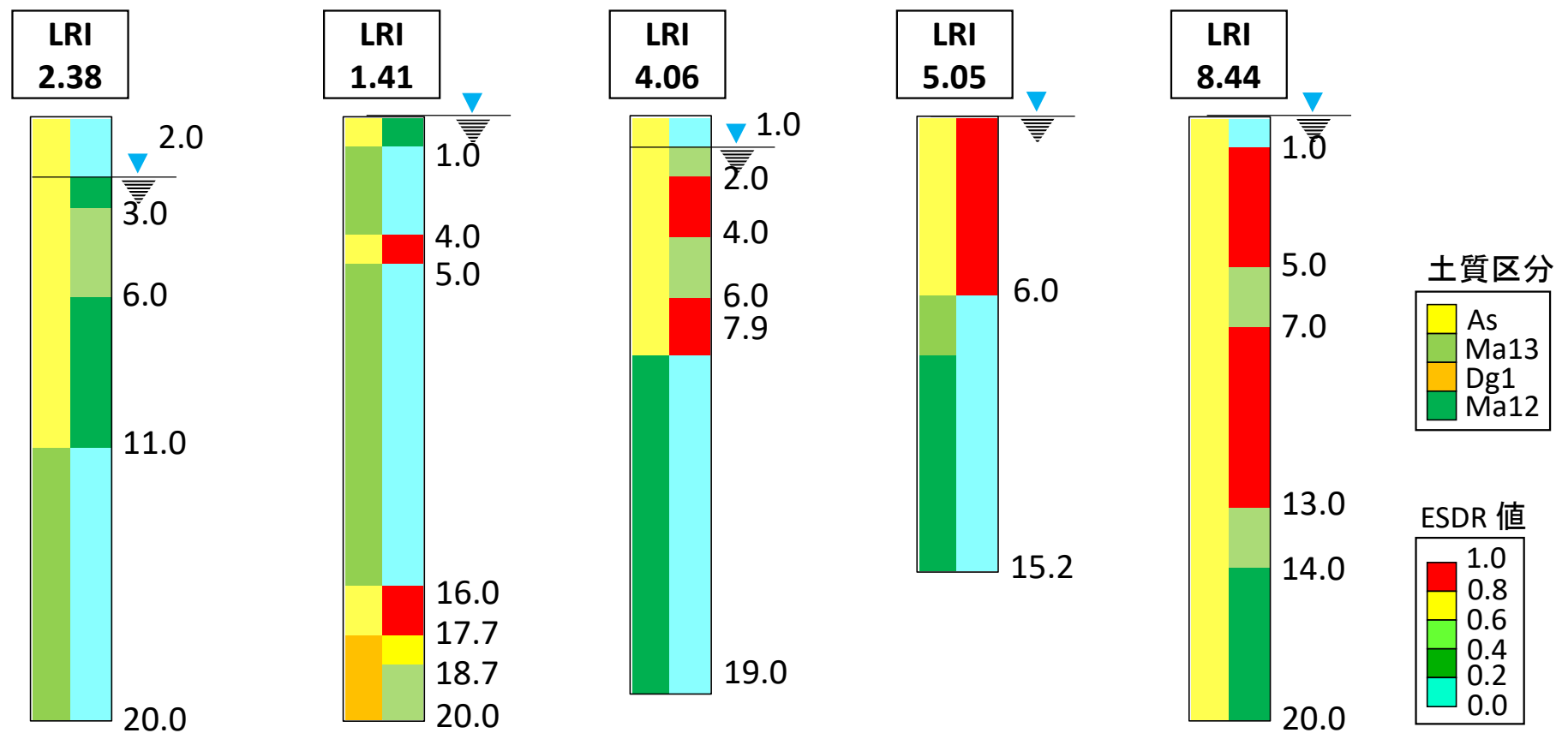
直下型地震入力時 $LRI = 6.92$



海溝型地震入力時 $LRI = 3.12$

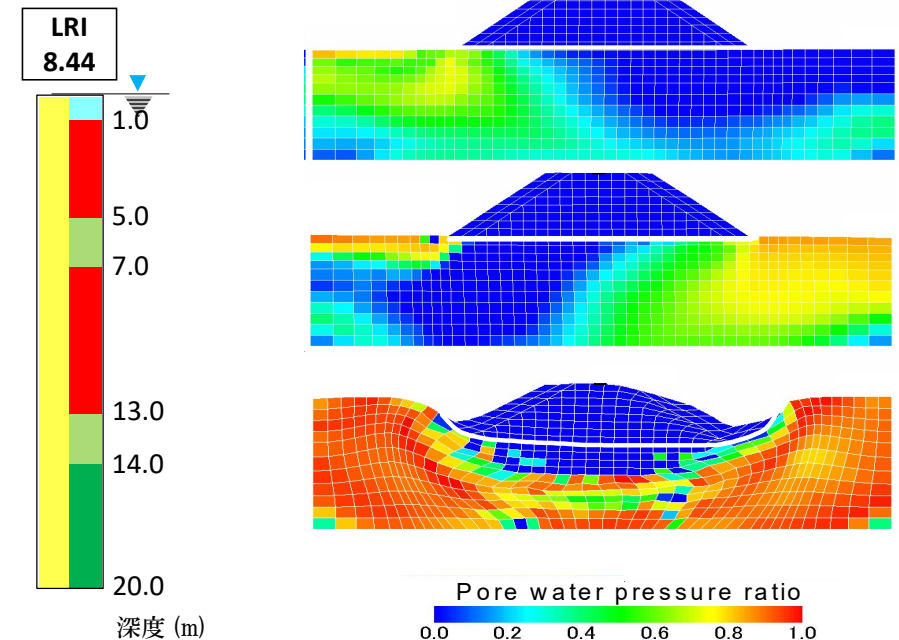


弾塑性FEMによる有効応力減少比分布



有効応力解析の活用に関する議論

- 砂の弾塑性構成モデルを組み込んだ有限要素法による有効応力解析は、簡易液状化推定法に比べて物理的意味の明確さや、土の力学特性を取り込んだ優れた手法といえる。
- 一方でボーリング地点における一次元解析では、有効応力減少比や液状化リスク指標といった値と液状化被害との関連付けが明確ではない。広域的アプローチとして簡易法との優劣は不明。
- 多次元の有限要素解析については、対象構造物ごとに実施されることが主であり、国や自治体の被害想定への適用性については議論の余地が大いにある。



4. 広域の液状化危険度評価 ～国、自治体の地震被害想定～

- 地盤性状と地震の地域特性の把握
～どのような地盤なのか、どのような地震が想定されるのか。
- 特定の一地点ではなく、かなり広域の危険度評価が求められる
～点情報から面情報へ

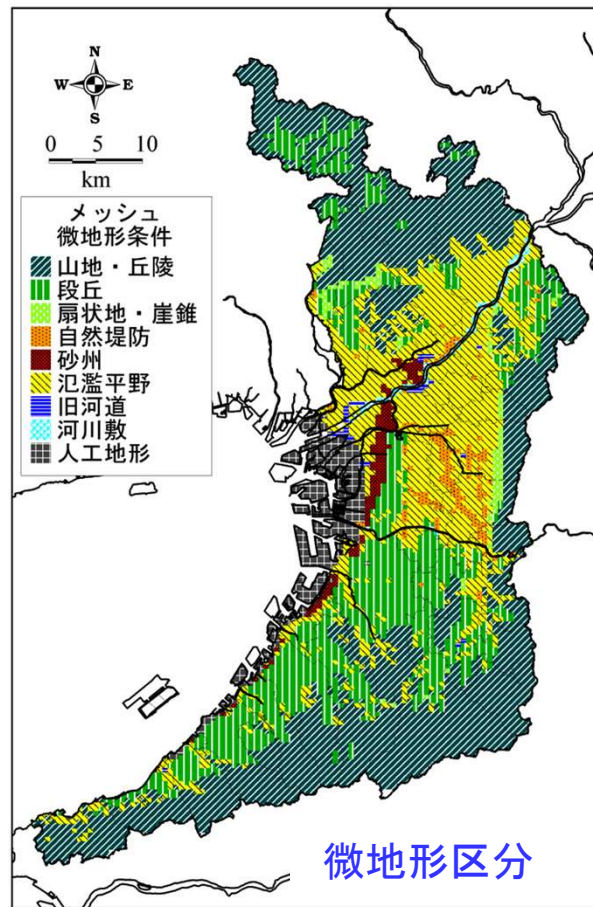


- **地盤情報データベースの利活用：**
ボーリングデータの電子化と集積、PC上でのデータ管理とオペレーション
- 地盤モデルと地震動モデルによるシナリオ化→地域防災計画の基礎情報に！

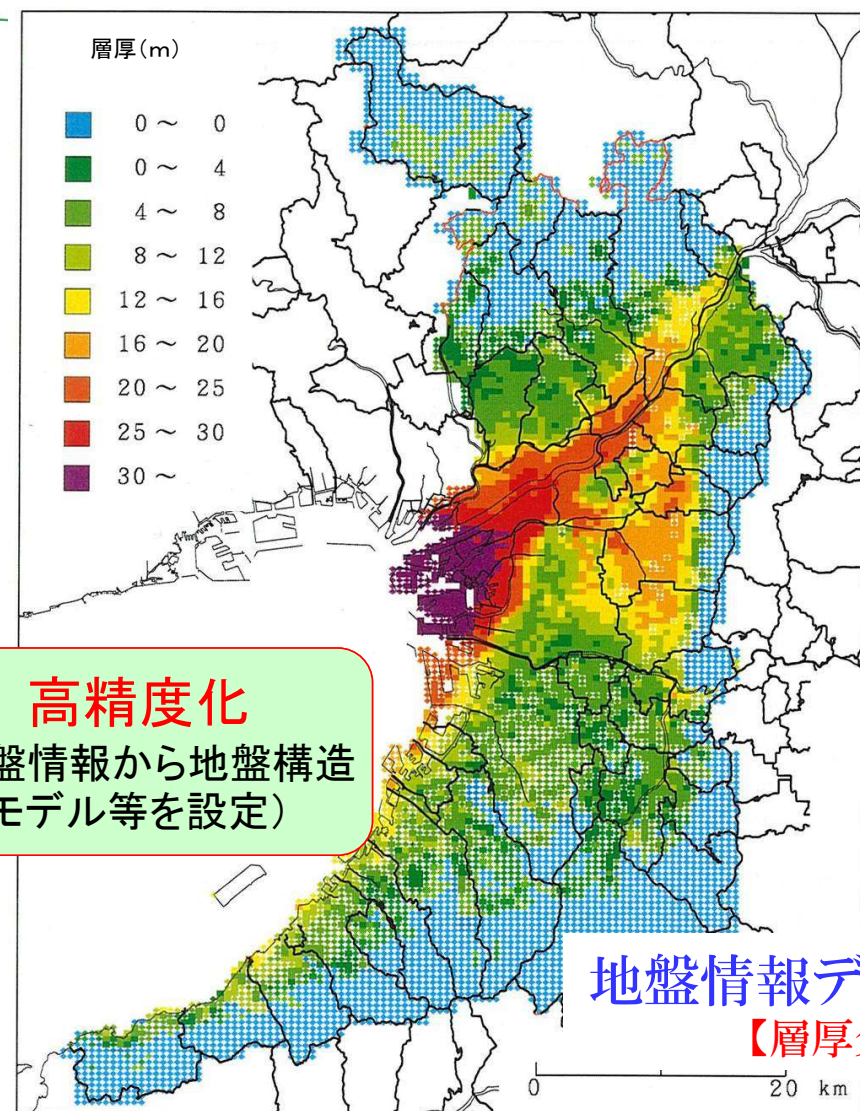
地盤情報データベースから取り出す必要なデータ

- ボーリングデータの位置(緯度・経度、孔口標高)
- 土質区分の深度方向分布(地表面から20mをデフォルト)
調査時の記事も見ておく方がよい。
- 土質試験データから粒度、細粒分含有率、液塑性限界
完全に砂質土ならOK。シルト系になるとFCと I_p で液状化対象か否かを判定。
- 地下水位(試験時の孔内水位しか得られないケースが多い)
地下水位観測網の整備が必要・・・液状化検討だけが目的ではない！
- 標準貫入試験のN値の深度分布・・・ボーリング調査にはデフォルトでついてくるはず。

地盤モデルの高精度化

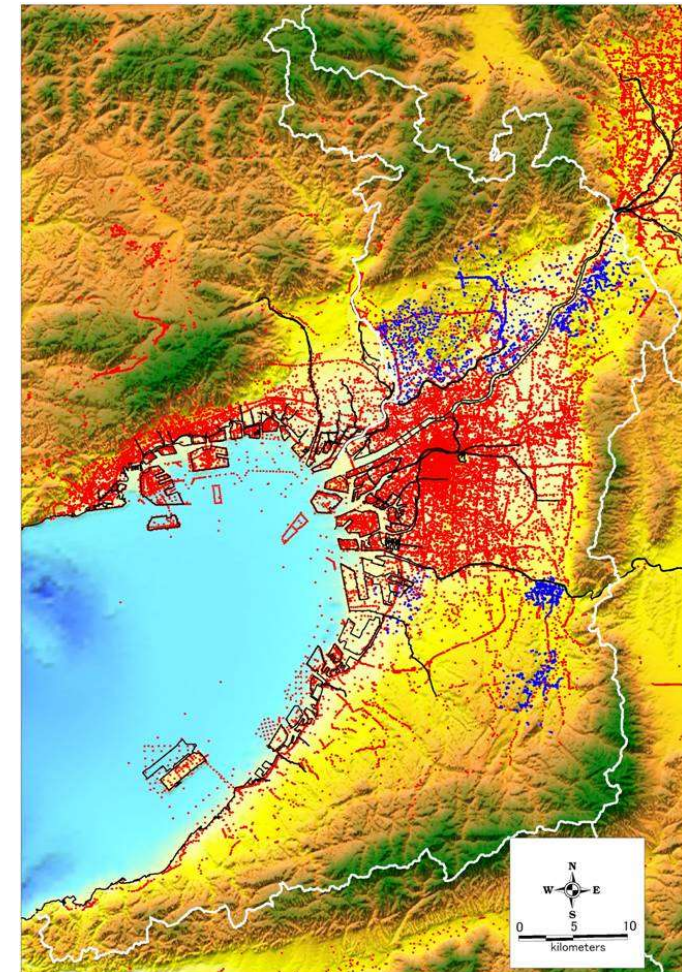
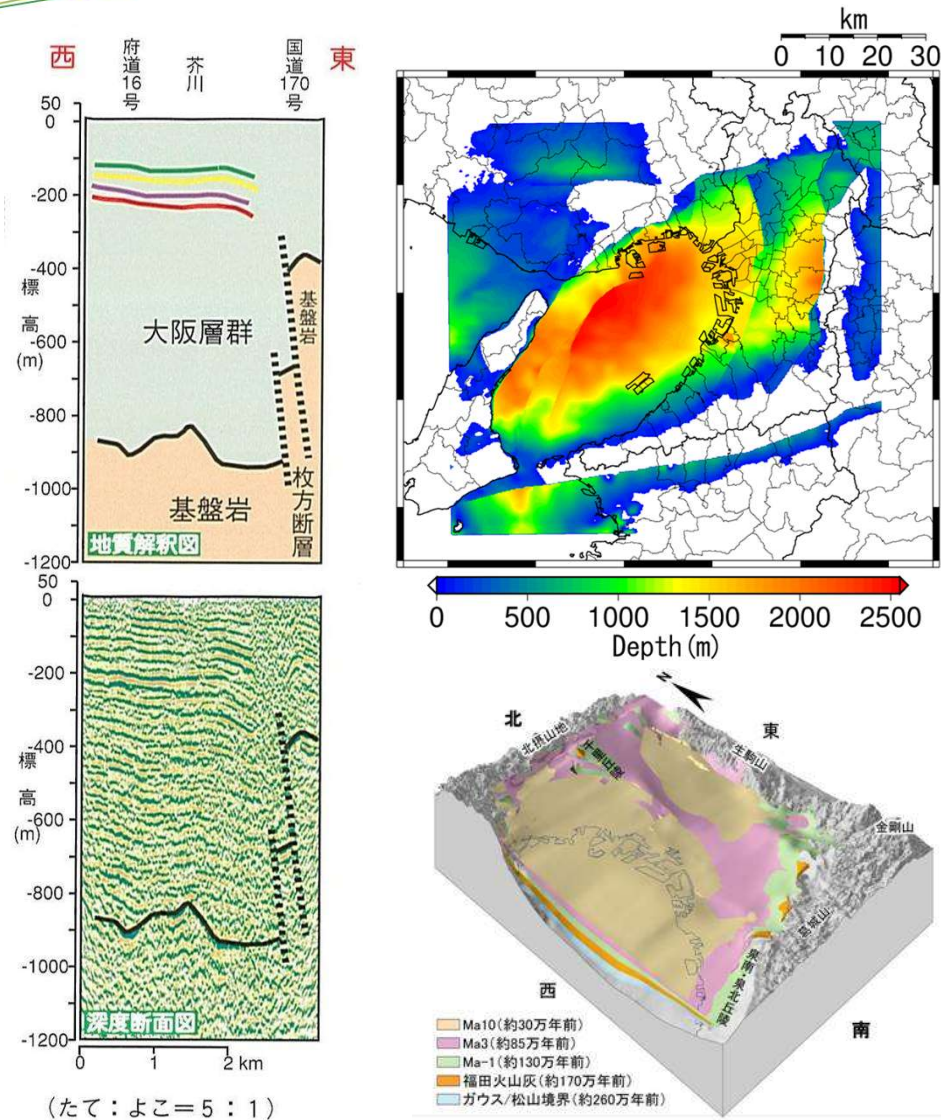


高精度化
(地盤情報から地盤構造
モデル等を設定)



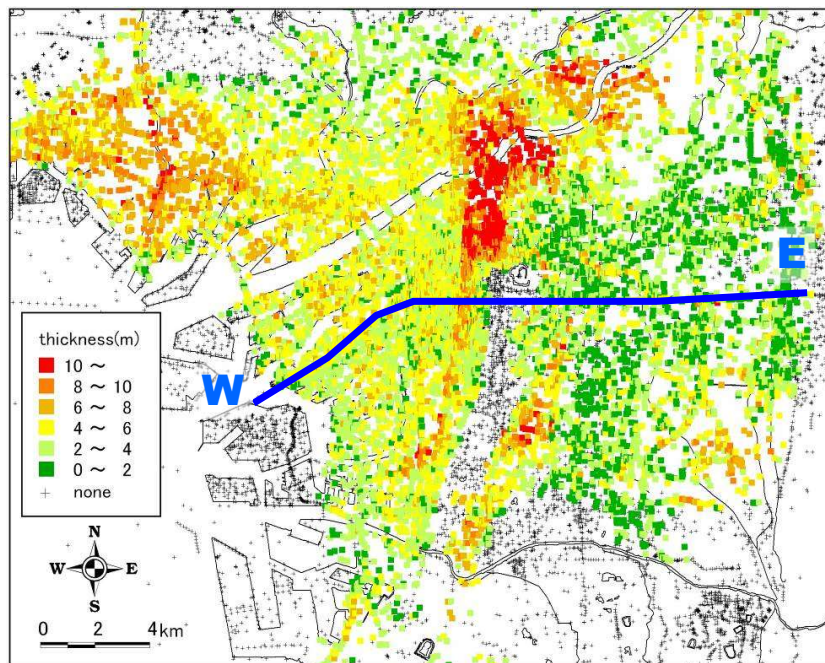
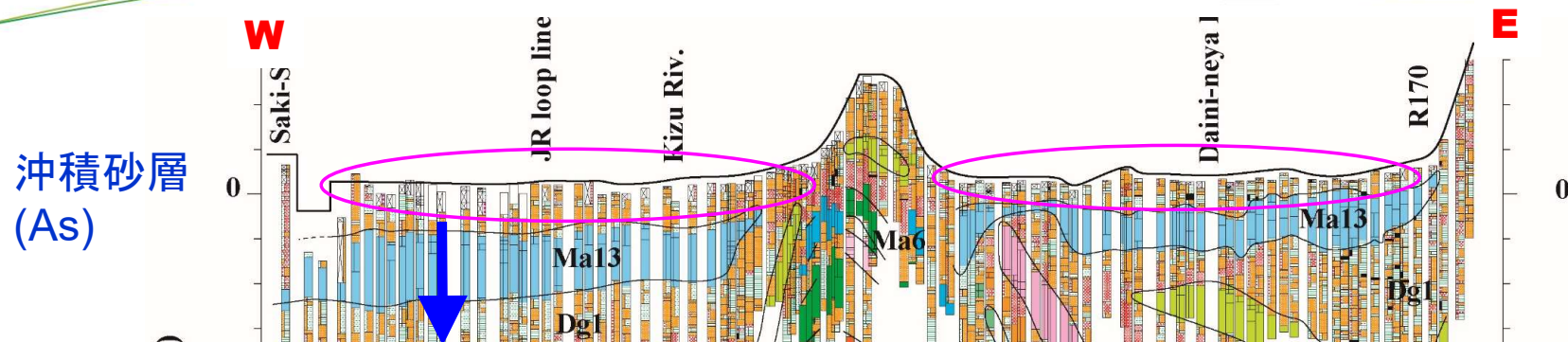
地盤情報データベース
【層厚分布】

深部～浅部の地下地盤情報の把握

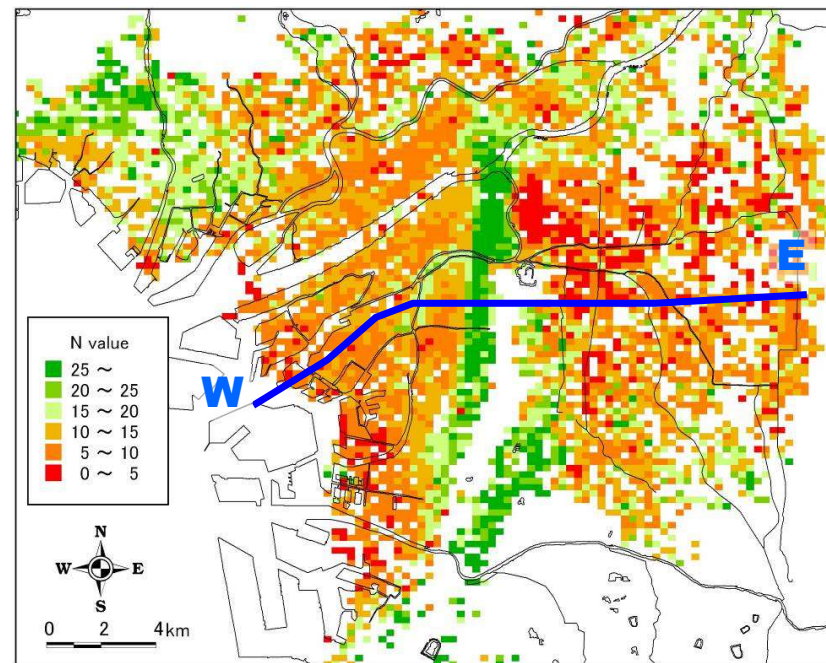


ボーリングデータ: 関西圏地盤DBほか

液状化対象層としての沖積砂層の同定（大阪府）

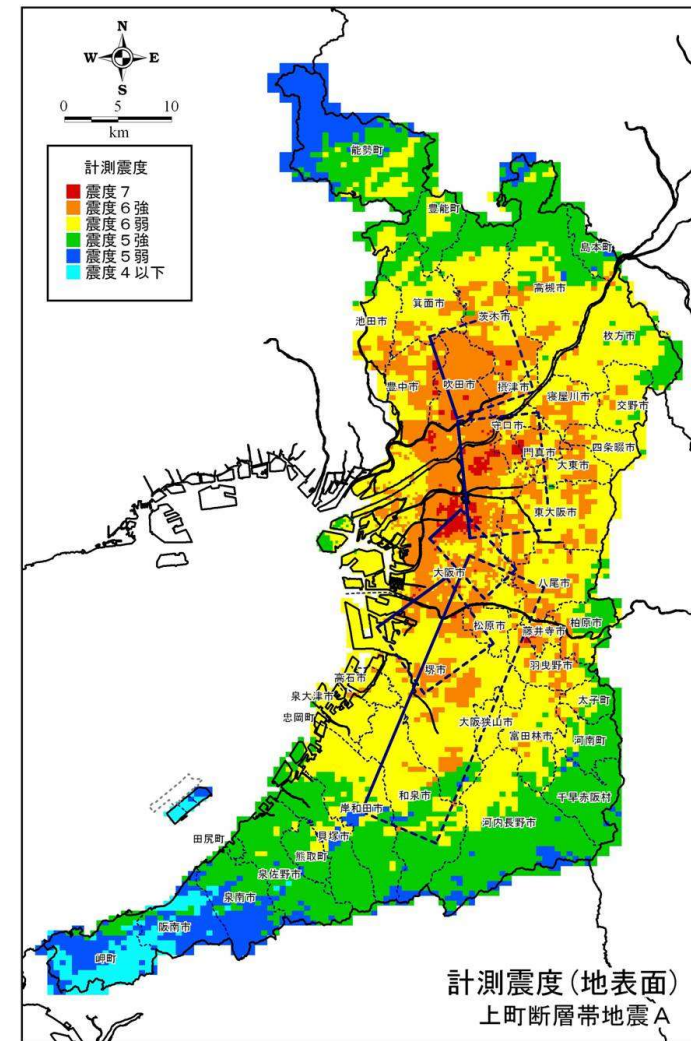
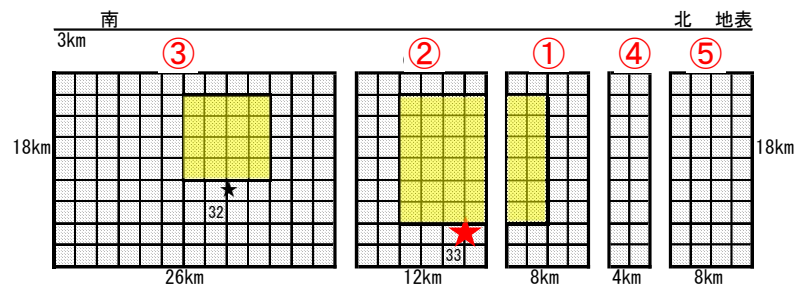
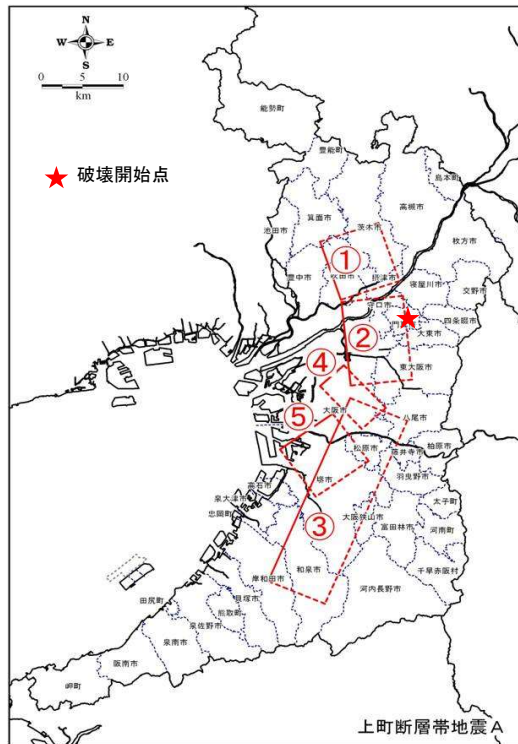


As層の層厚分布(ボーリングデータ)

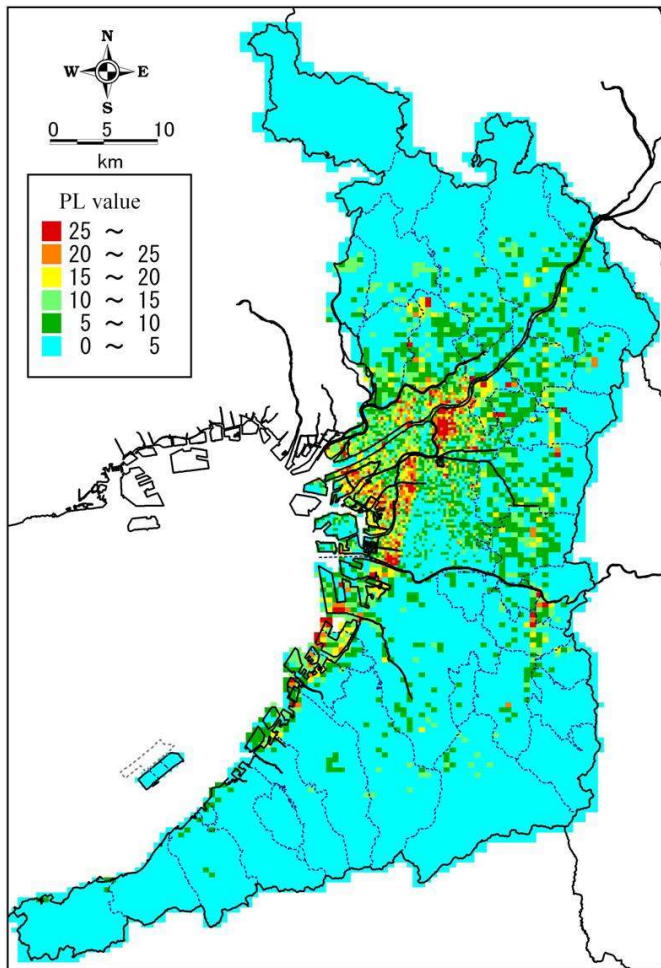


As層の平均N値分布(メッシュ)

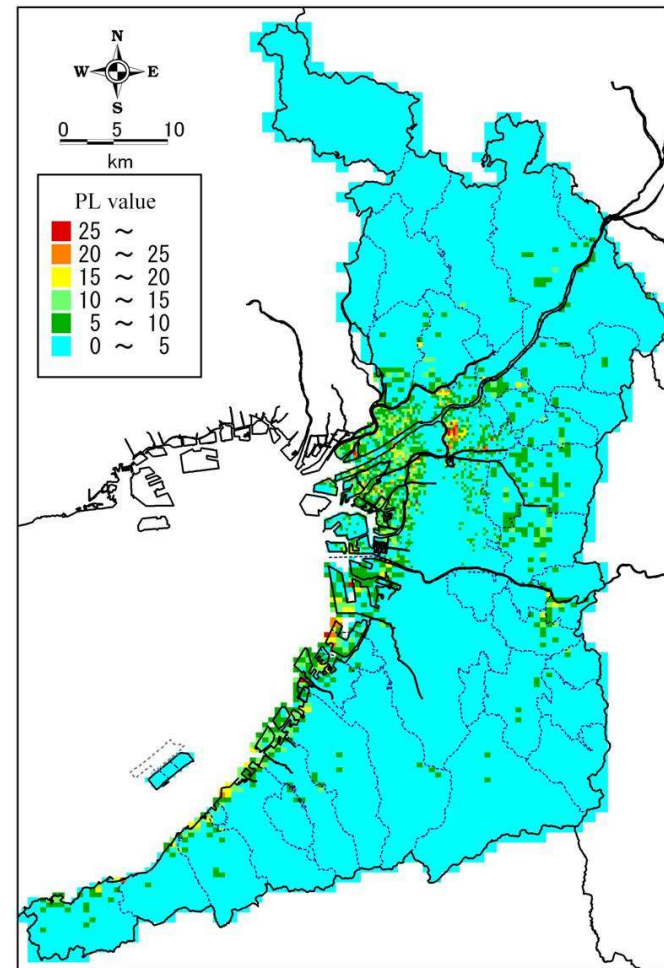
上町断層地震の大阪府代表シナリオ



P_L 値による液状化危険度評価の一例（大阪府）

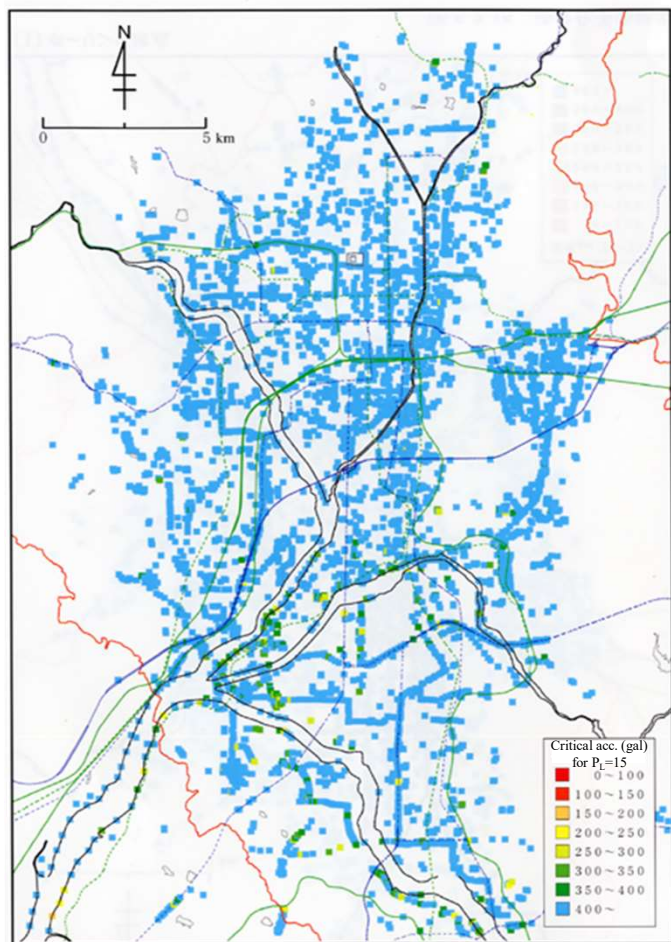


上町断層シナリオ地震



南海東南海シナリオ地震

液状化被害発生に要する地震加速度による地盤脆弱性の表現 ～京都盆地の事例～



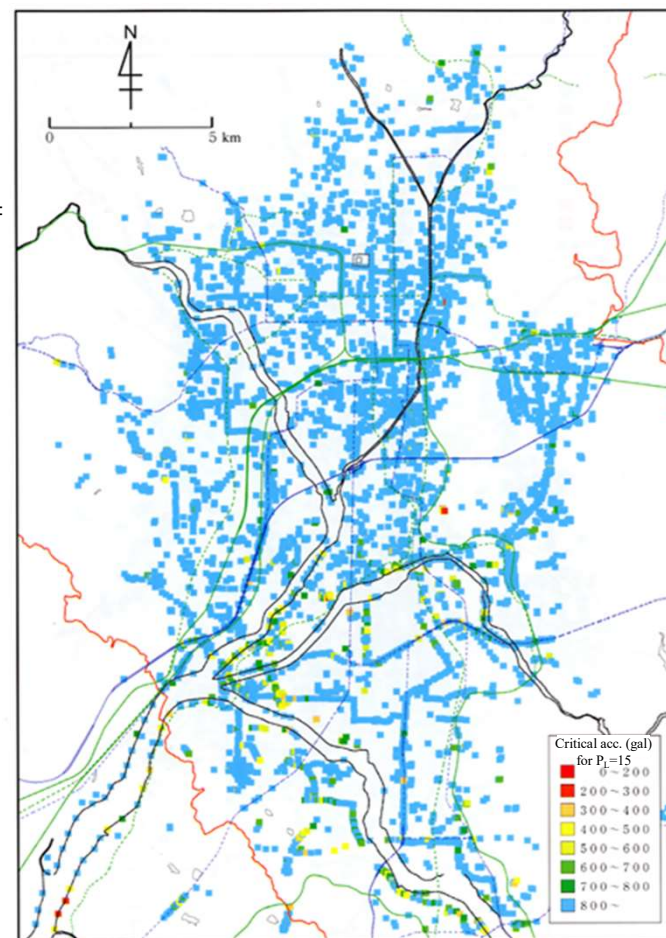
プレート境界地震（タイプⅠ）

液状化被害発生の P_L 値の
閾値として15が一般的

ボーリング地点ごとに $P_L=$
15に要する地表面加速度
を計算する。

最大加速度表示が当該地
点の液状化脆弱性を表現
することになる。

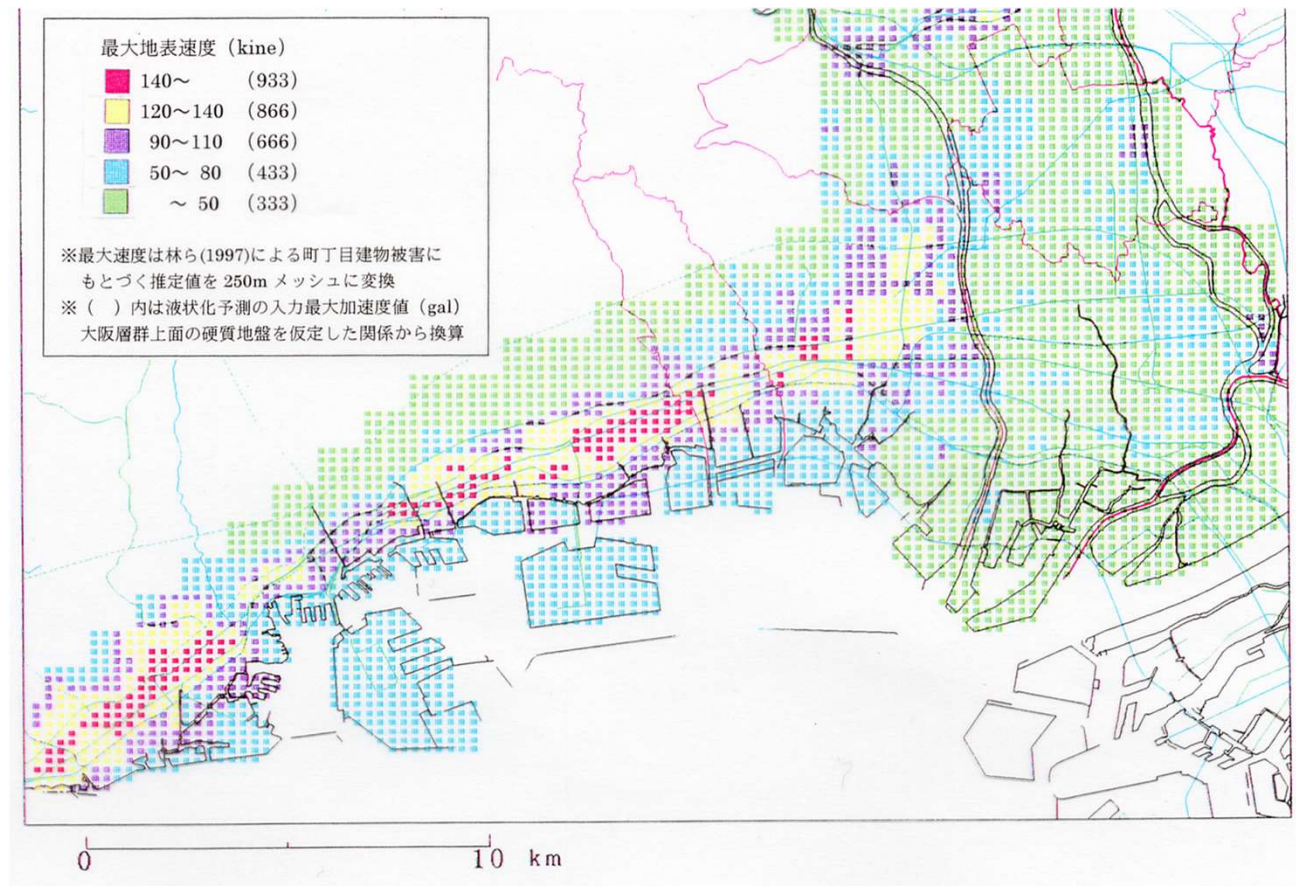
京都盆地は南東部の木津
川からの砂質土砂供給の
多い地域では液状化危険
度が比較的高いが、全体
としては地震時のメイン
の災害ではない。



断層直下型地震（タイプⅡ）

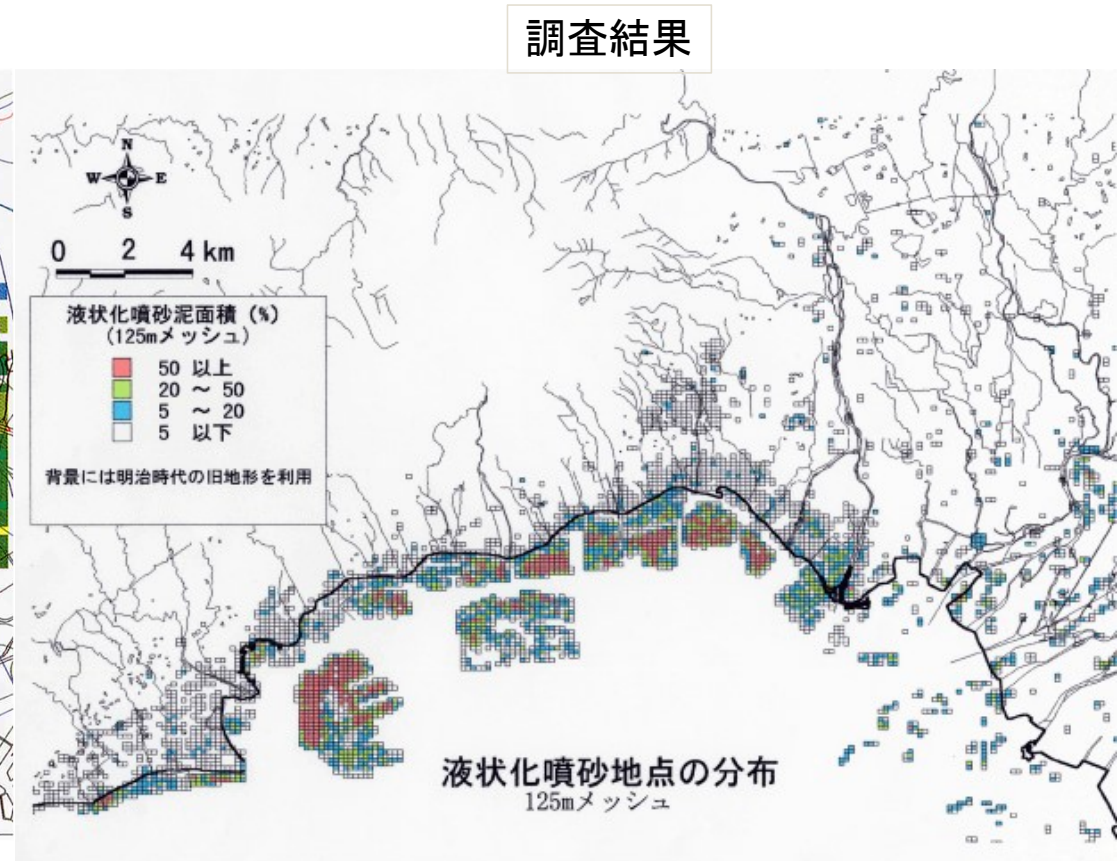
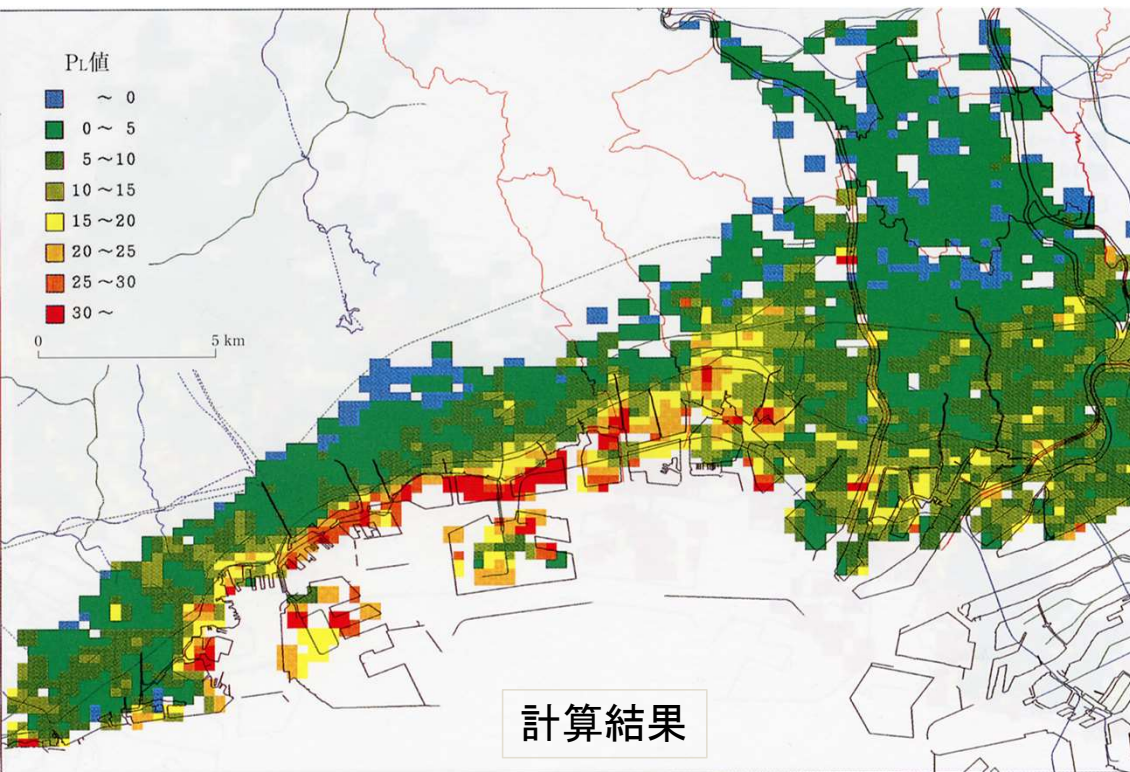
阪神淡路大震災時の液状化危険度評価 ～事後の逆解析～

- 実地震による液状化危険度推定手法の事後評価として、右の建物被害から推定された最大速度を加速度値に変換して250mメッシュごとに入力として計算を実施した。
- 250mメッシュの地盤モデルは地盤情報データベースに基づいて作成した。
- 道路橋示方書の手法（当時の版）に基づき、 R_L は標準貫入試験のN値から算定、設計震度の α_{\max} に右図の換算値を適用してメッシュごとに P_L 値を計算した。



震災後の調査結果との比較（阪神淡路大震災）

- 事後計算では、阪神間の沿岸部、埋立地を中心に P_L 値が高く、内陸から丘陵に向かって低くなる。
- 被害調査結果では埋立地を中心に噴泥面積がメッシュの50%以上が広がっており、定性的には簡易液状化推定法によって求めた結果と調和的といえる。



講演のまとめ

- 液状化対象となる砂質土の液状化抵抗は、理想的には乱れの少ない試料を採取し、室内試験によって求めるべきである。一方でインフラ構造物の構築にあたって実施される原位置試験の活用が実務的には有利であるので、N値や q_c 値からの換算値を用いる方法が一般的である。
- 地震によって地盤内に動員されるせん断応力については、震源モデルに基づいて入力地震動を作製し、工学的基盤まで上げて堆積層に入力し、応答解析によって求めるべきである。一方でこれをデフォルトにするのは技術的・経済的ハードルが高いこともあり、道路橋示方書などで基準化された手法で求める方法が一般的である。

講演のまとめ（続き）

- 液状化の検討にあたっては、個別の構造物に対しては有限要素法などいわゆる有効応力解析によって地盤の動的応答、応力とひずみの時刻歴などから変形と安定性を評価すべきであるが、国や自治体の被害想定にあたっては広域面的なアセスメントが求められることから、高精度なものを目指すのであれば、地盤情報データベースによる適切な地盤モデルを作成する必要がある。評価手法として簡易法であればかなりの自治体で実施可能で、そのような形で被害想定を行い地域防災計画に反映させている。重要構造物が密集する大都市部では、想定される地震による入力地震動を作製して地震応答解析を行って、より現実的な解を得ておく必要がある。
- 地域の地盤の特徴、各土層の物性と動的応答特性の把握など、地盤工学の専門家の果たす役割は大きい。