



液状化地盤における橋梁基礎の 耐震性能評価方法と耐震対策 技術の開発(SIP)

構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)

七澤 利明

1. 背景・目的
2. 研究項目・体制
3. 研究状況
4. 今後の取組み等

1. 背景・目的

2. 研究項目・体制

3. 研究状況

4. 今後の取組み等

沿岸コンビナート地区がかかえる防災上の課題

- 沿岸の埋立地では、過去より地震時の液状化により甚大な被害が発生。
- 石油タンク本体など一部の主要施設については近年液状化対策が進められているものの、道路など周辺施設も含めた総合的な対策は不十分。近年の大地震でも被害が発生。

⇒ 首都直下地震等の大地震発生の際、施設の安全性確保だけでなく、震後の燃料供給機能等を確保するための早急な対策実施が必要。



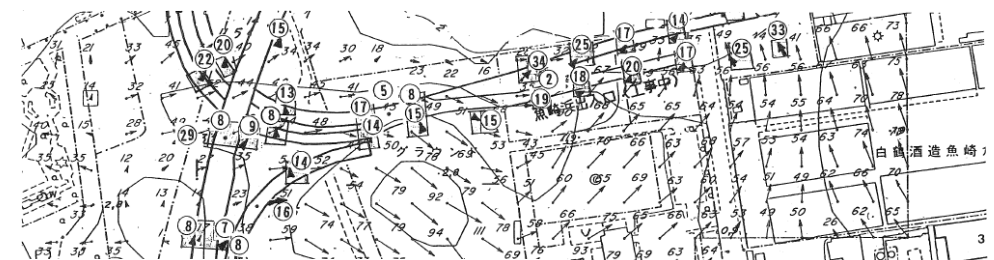
沿岸コンビナート地区の防災対策における 道路インフラの位置づけ



- 被害の最小化のためには、事前の耐震対策に加えて、被害が生じた場合にも速やかに消防・救急活動を行うためのシステム整備が不可欠。
 - 一方で、地区外からのアクセス路は事業者が直接対策を講じることが出来ないため、大地震時のアクセス路の健全性について懸念。
 - 震後の燃料供給機能もアクセス路が健全であることが前提。
 - 過去の大地震時には液状化被害により埋立地にアクセスする橋が長期通行止めに。
- ⇒ アクセス路等の健全性を早急に評価し、事前に対策を講じていくことが重要。



埋立地区における橋の側方移動の被害(兵庫県南部地震)



長期通行止めが生じた橋の損傷



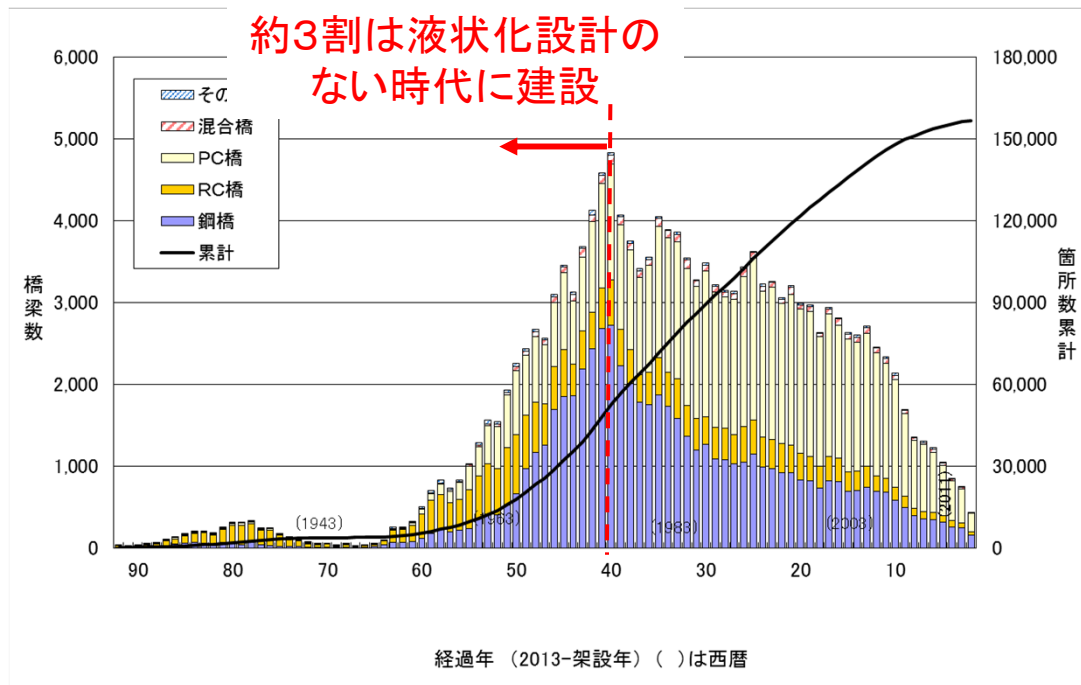
出典: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、平成7年12月

既設橋の液状化への対応



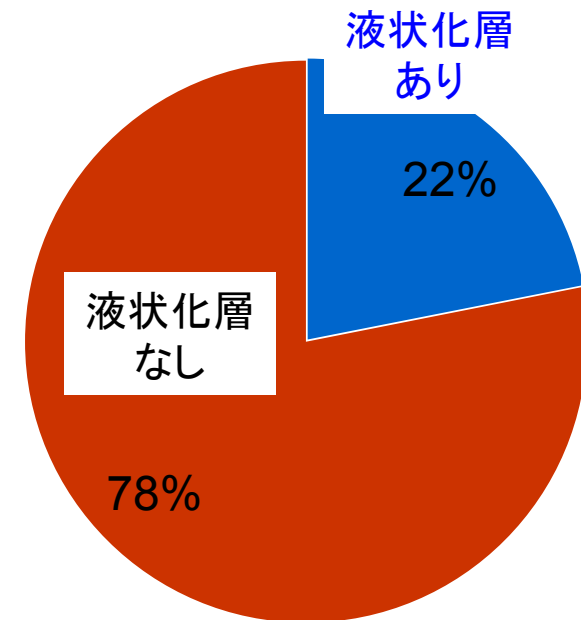
- 既設橋の約3割は、液状化に対する設計がない時代に建設。
 - 液状化地盤にある橋の割合を約22%と仮定すると、全国の既設橋(約70万橋)の約7%で地震時に液状化による被害等の影響が生じるおそれあり。
 - 一方で、過去の大地震で実際に甚大な被害が生じた橋はごく一部。
- ⇒ 既設橋の実力を適正に評価する精度のよい評価手法の開発が大きな課題。

既設橋建設後の経過年数



出典: 国総研資料第822号「平成25年度道路構造物に関する基本データ集」、平成27年1月

液状化層を有する基礎の割合



出典: 土研資料第4037号「橋梁基礎形式の選定手法調査」、平成19年2月

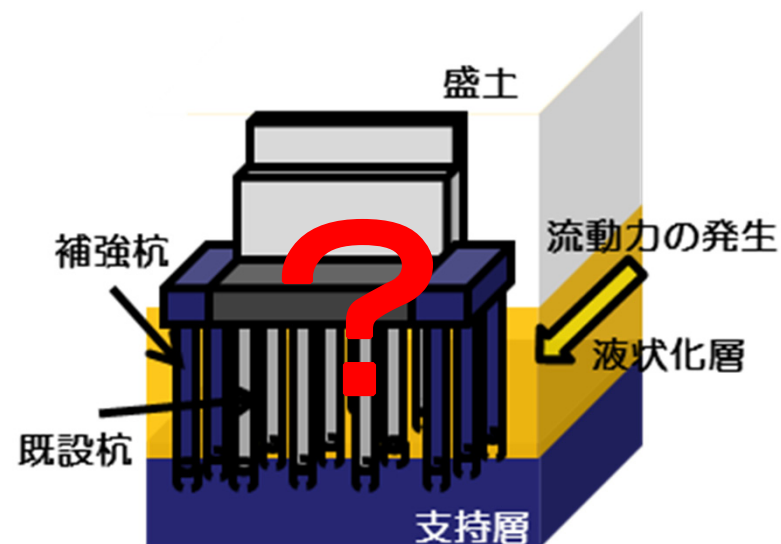
研究の目的



1. 地震時に液状化による影響を受ける既設橋の状態を精度よく評価する手法(解析方法等)を開発。
⇒ 沿岸埋立地のアクセス橋梁等について、大地震後に速やかな通行機能の確保が出来るか、評価に活用。
2. 液状化に伴う作用に対して効果的、かつ工事の際に既設橋の通行機能をできるだけ阻害しない補強方法を開発。
⇒ 1. で「要対策」と評価された既設橋を速やかに補強。



●のうち、液状化対策が必要な橋は・・・？



効果的かつ交通を阻害しない補強方法は？

1. 背景・目的

2. 研究項目・体制

3. 研究状況

4. 今後の取組み等

課題名、研究項目・内容



■ SIP課題名 : レジリエントな防災・減災機能の強化

■ 研究開発課題名 : 大規模実証実験等に基づく液状化対策技術の研究開発

■ 研究項目・内容

[港空研]

a. 港湾施設および埋立地の液状化対策(耐震)診断および対策技術の開発

- ① 地盤探査、液状化判定および液状化対策技術開発
- ② 耐震診断システムの構築
- ③ 統合的な防災性向上技術の開発
- ④ E-ディフェンスを活用した検証実験

[土研]

b. 液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能評価手法と耐震対策技術の開発

- ① 液状化地盤における基礎の地震時挙動の解明と橋の耐震性能評価技術に関する研究
- ② 液状化地盤における基礎の耐震対策技術の開発
- ③ E-ディフェンスを活用した検証実験

[消防研]

c. 石油タンク周辺施設の液状化損傷評価技術及び損傷被害防止技術の開発

研究の全体像(土研)



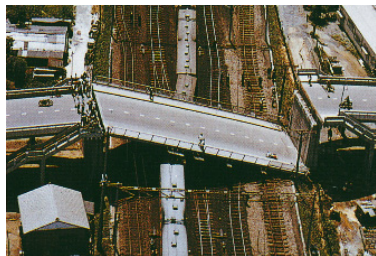
被災事例の分析



側方流動に伴って生じたと考えられる橋の被害



橋の機能として致命的な被害事例あり



液状化による下部構造の傾斜・沈下による橋の被害

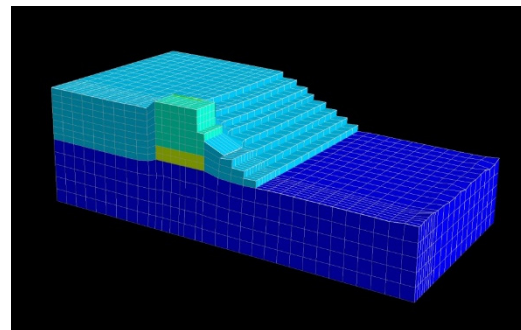


液状化による橋台背面土の沈下による橋の被害

振動実験等による地震時挙動の検証



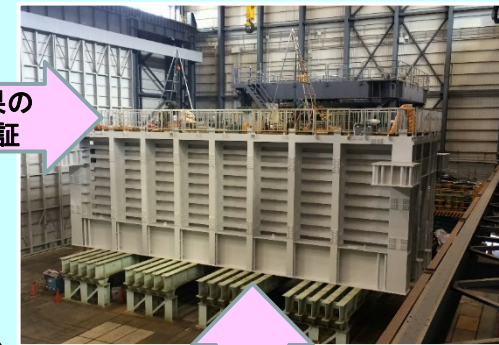
液状化地盤の基礎の解析技術



共同研究: 東工大高橋章浩教授

E-ディフェンスを活用した検証 (H29年度実施予定)

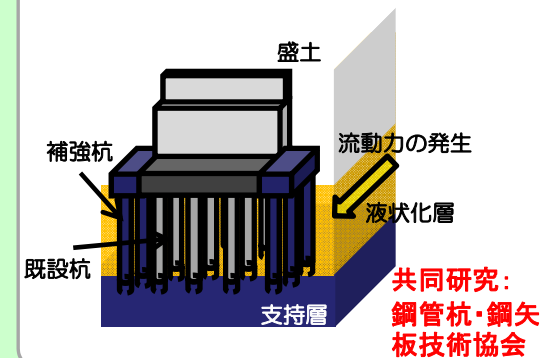
- ・橋梁基礎の地震時挙動の検証
- ・対策技術の効果の検証
- ・動的解析技術の検証



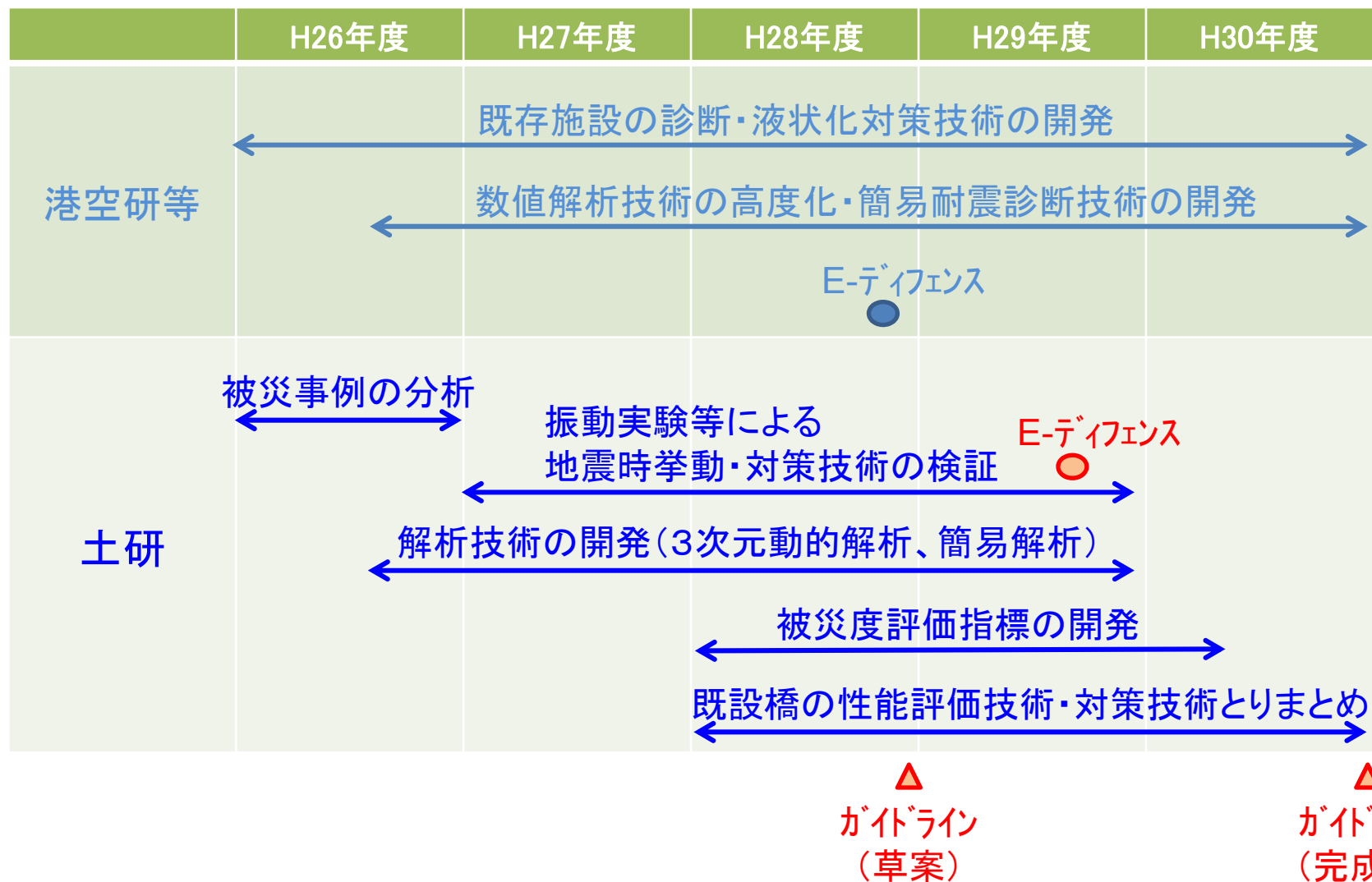
成果の検証

成果の検証

基礎の液状化対策技術



スケジュール

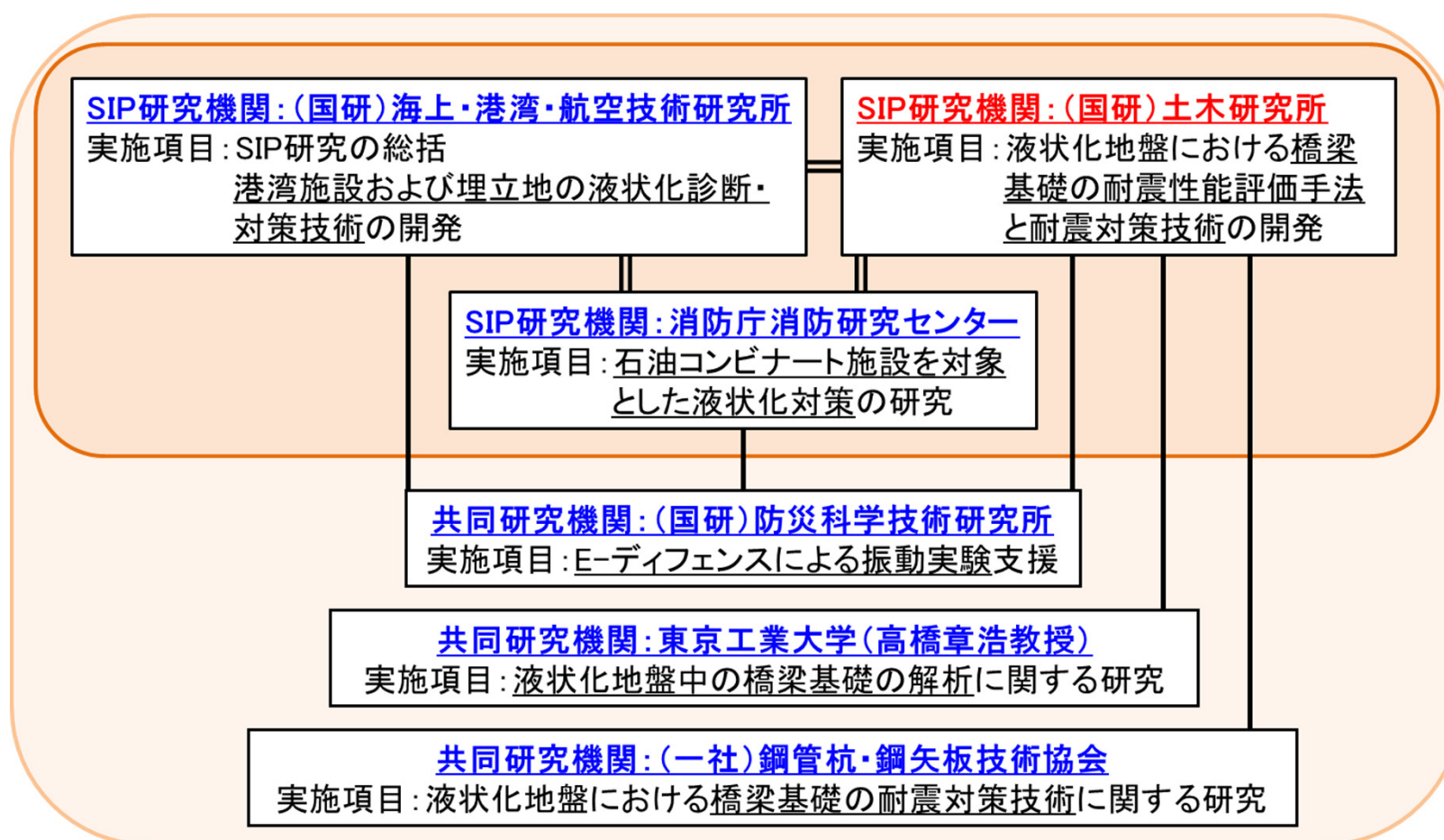


研究体制



➤ 液状化問題に取り組む各種研究機関、学識者、民間企業が連携・共同して研究開発を実施。

⇒ 「産・学・官」の関与により、開発技術を確実に社会に反映(基準類への反映、技術の実用化)。



1. 背景・目的

2. 研究項目・体制

3. 研究状況

4. 今後の取組み等

(1) 地震時挙動の解明と耐震性能評価技術の開発

- ・被災事例の分析(安全性、通行機能) →研究(1)①
- ・振動実験による検証 →研究(1)②
- ・解析技術の検討 →研究(1)③
- ・地盤調査法の検討(地盤評価の高度化) →研究(1)④、⑤

(2) 耐震対策技術の開発

- ・基礎の補強方法の提案(供用性、施工制約) →研究(2)①
- ・振動実験による検証 →研究(2)②

(3) E-ディフェンスを活用した検証

- ・E-ディフェンス土槽での模型地盤作成試験(港空研等と連携)
→研究(1)④

研究(1)①: 被災事例の分析

➤ 液状化による被災事例(38事例)を分析し、被災形態を3つに分類。

①液状化に伴う側方流動による橋脚・橋台の損傷

②液状化による橋脚等の沈下・傾斜

③液状化による橋台背面の沈下

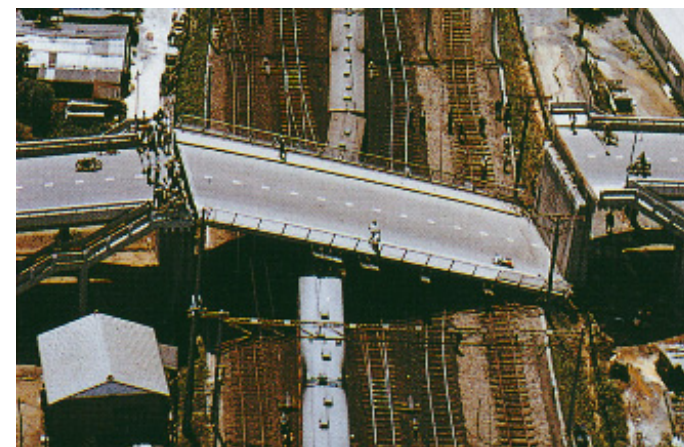
⇒ 長期間の供用停止といった社会的影響の大きい被災形態である、側方流動による橋台の損傷等を対象に実験・解析等を実施。



液状化に伴う側方流動による
橋脚・橋台の損傷



液状化による橋脚等の
沈下・傾斜



研究(1)②: 振動実験による検証

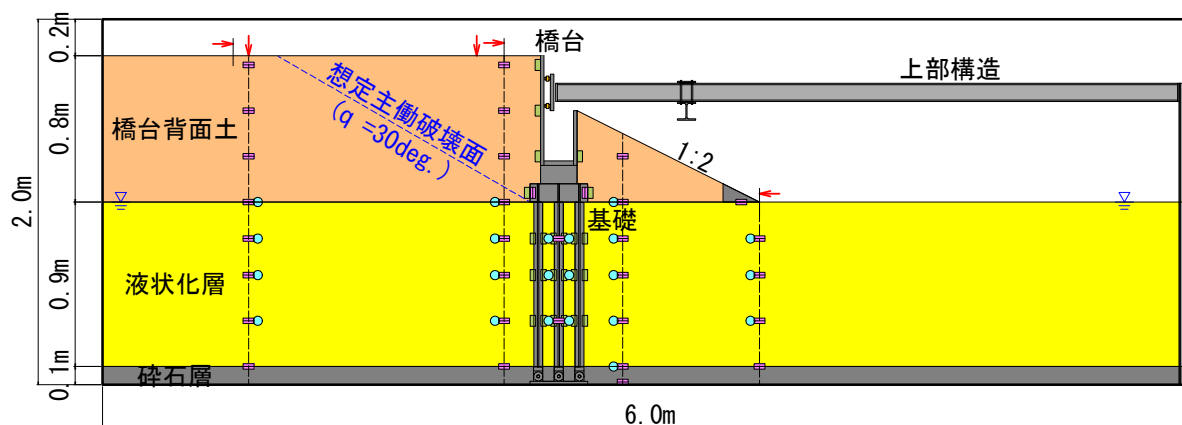


- 大型振動台による橋台基礎(1/10縮尺)の振動実験を実施。
- ⇒ 液状化時の地盤流動、古い基礎の地震時挙動等を検証。

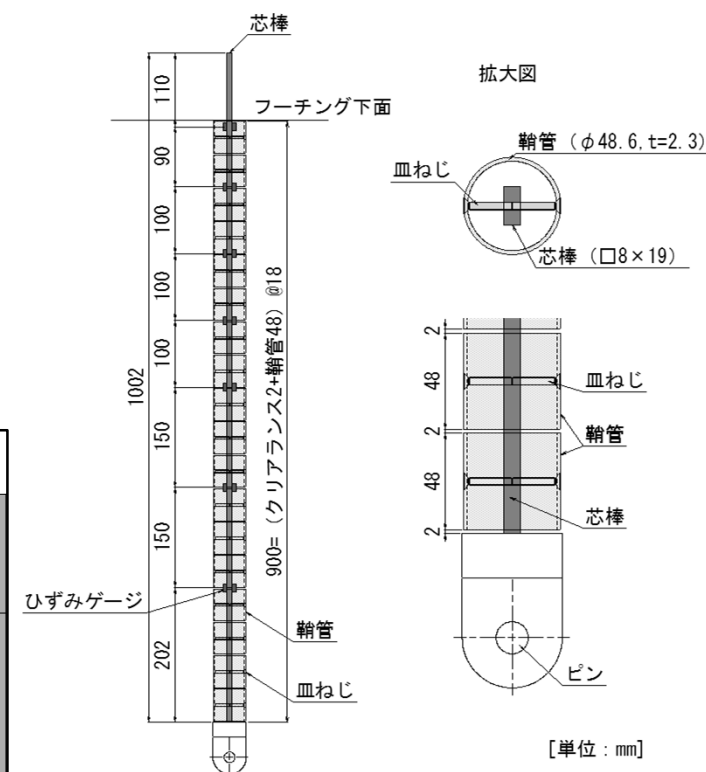
実験ケース

	杭基礎の設計	背面盛土形状
Case1	旧基準	河川堤防タイプ
Case2	旧基準	道路盛土タイプ
Case3	現行基準	河川堤防タイプ

側面図



杭模型 (Case1)



振動台と実験土槽（土研）

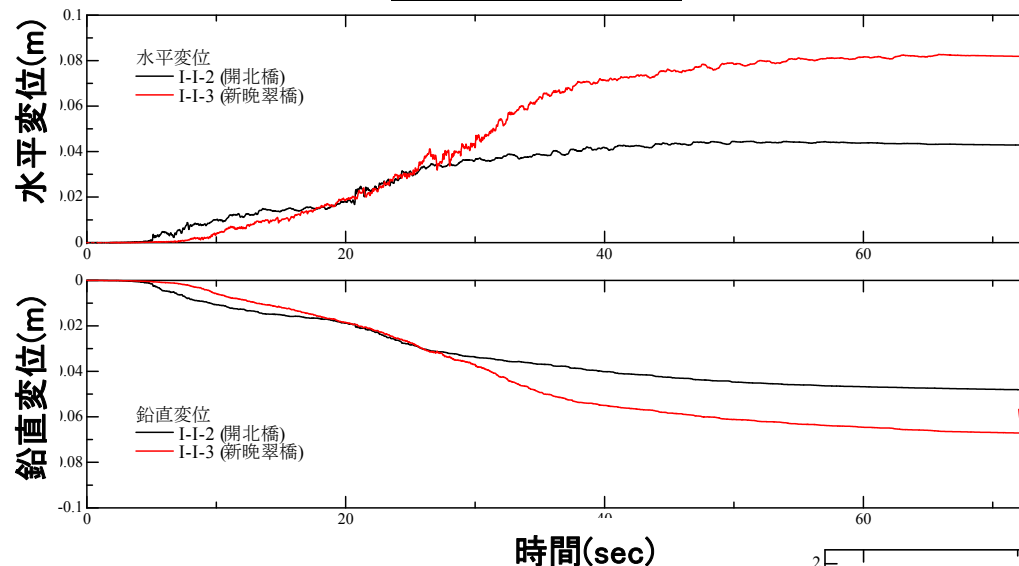


研究(1) ②: 振動実験による検証



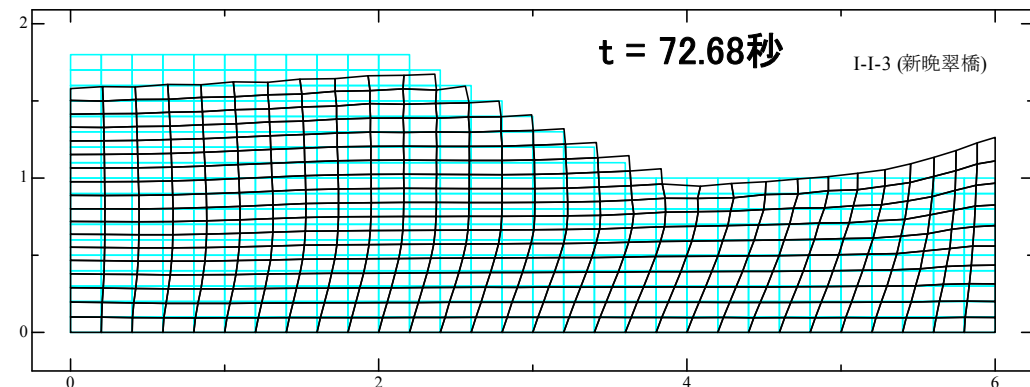
- 実験Case1の事前解析(東工大高橋教授:2次元土／水連成動的解析)
結果から、道路橋の動的解析に用いる設計用地震動のうち、最も大きな変状が生じる地震動(I-I-3:新晩翠橋)を実験で適用。

法肩での変位

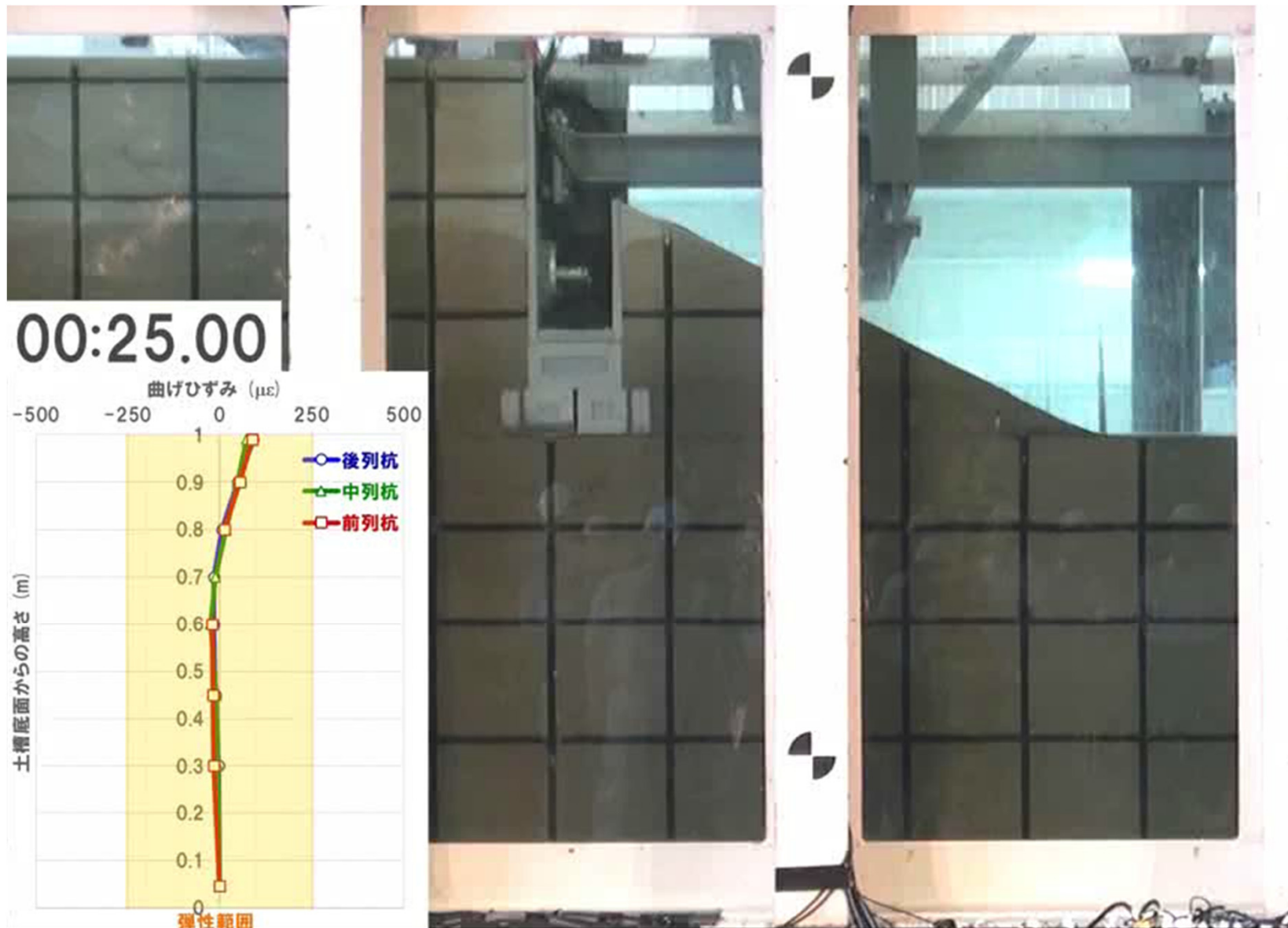


I - I -3 (新晩翠橋)

主要動後の地盤変形



Case1 実験状況 (25-40sec)

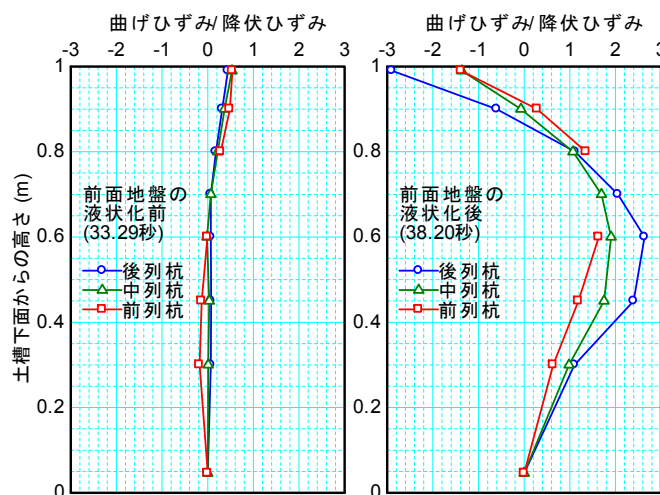


研究(1)②: 振動実験による検証

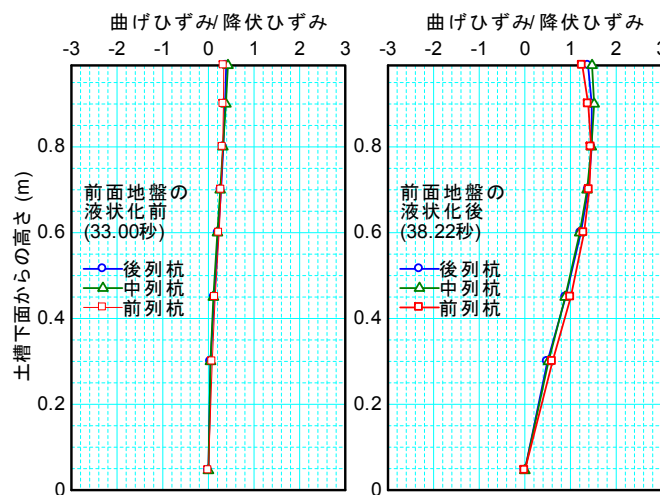
- 液状化の発生前後で
曲げひずみが急変。
- 旧基準の基礎では著しく塑性化する一方、
現行基準では塑性化程度は限定的。
- 遊間の違いも塑性化
の程度や分布に影響
することを確認。

⇒ 基礎の補強に際し
て、遊間の影響を
考慮する必要があることが判明。

杭の曲げひずみ

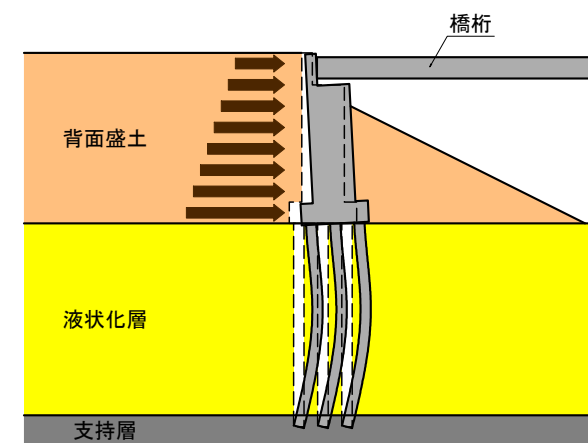


(a) Case1

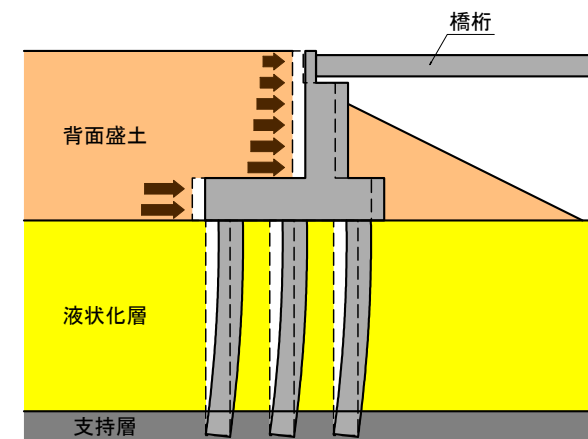


(b) Case3

橋台の変位と背面土圧



(a) Case1



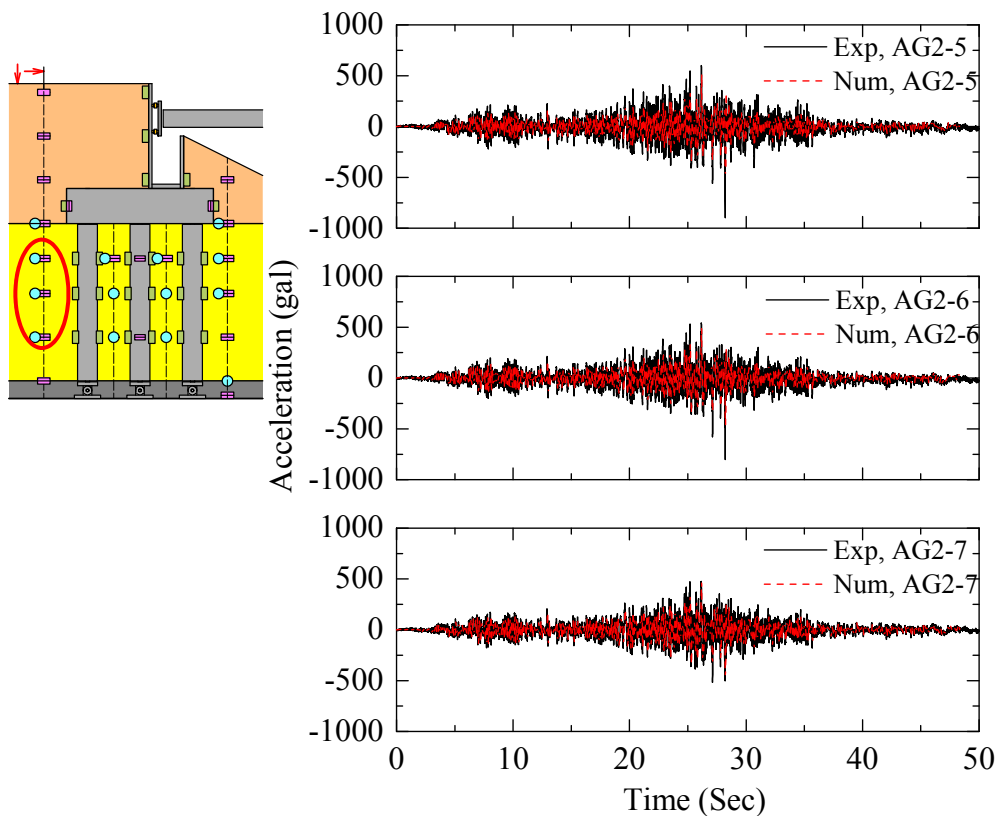
(b) Case3

研究(1)③: 解析技術の検討

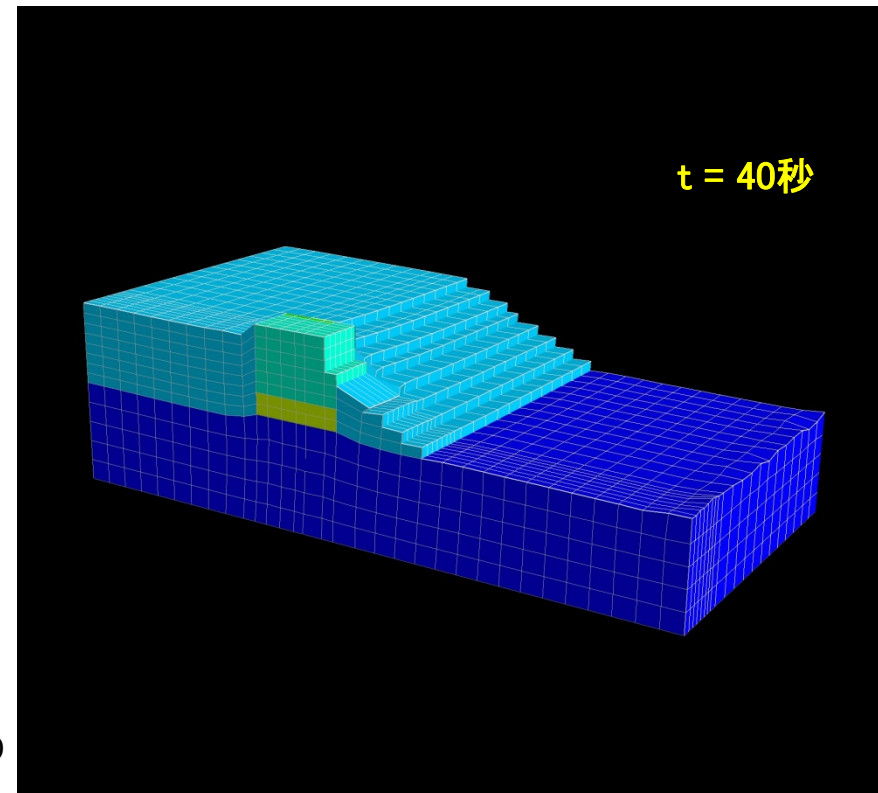
➤ 3次元動的有限要素モデル(地盤をソリッド要素、杭をはり要素としてモデル化)による動的解析手法を検討(東工大高橋章浩教授)。

⇒ 実験結果等に対する検証を経て、精度の高い評価技術として確立していく。

地盤の加速度 (Case3)



地盤および橋台の変位 (Case3)



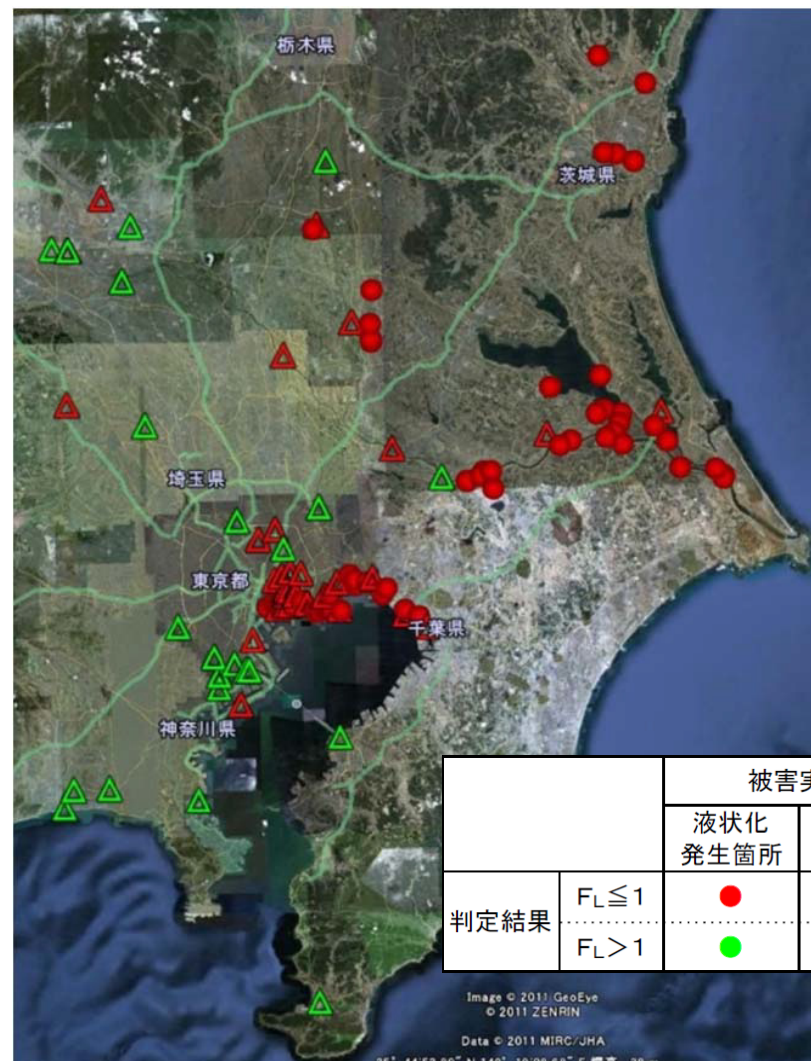
研究(1)④: 地盤調査法の検討～振動式コーン貫入試験



- 現行基準の液状化判定法は安全側の評価(液状化と判定されても、現実に液状化が生じない場合あり)。
- 既設橋を精度よく評価するためには、液状化判定法の高精度化も必要。
- このため土研では、研究課題「液状化判定法の高精度化」において、新たな液状化地盤調査法『振動式コーン貫入試験』の試作機を開発。

⇒ E-ディフェンス土槽で製作した模型地盤に対し、振動貫入試験を試行的に実施。

液状化の被害実態と判定結果 (平成23年東北地方太平洋沖地震)

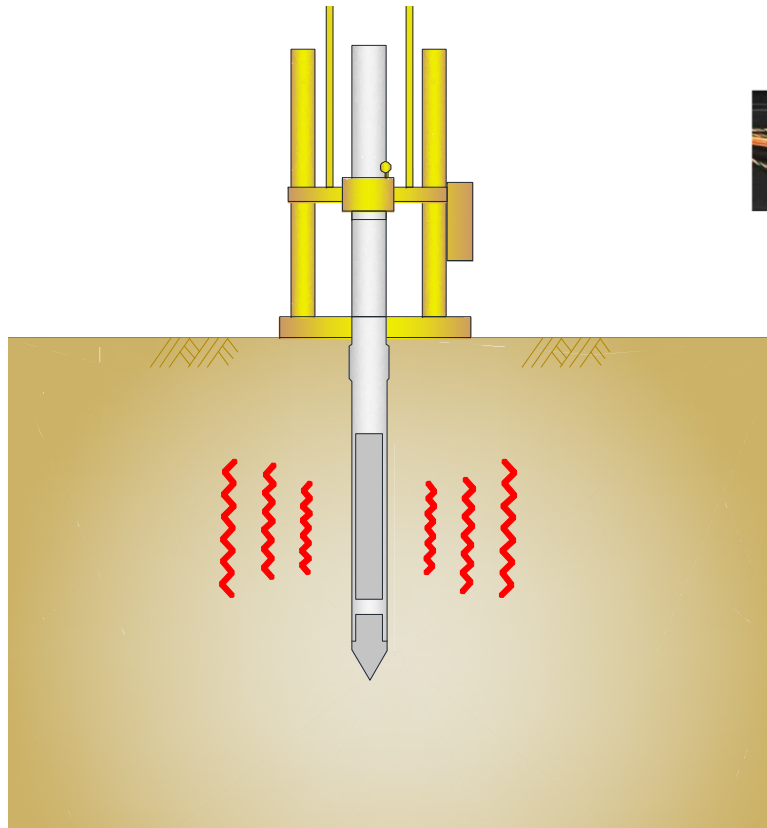


出典: 土木研究所「東北地方太平洋沖地震における液状化の発生を踏まえた液状化判定法の検証」、平成23年9月

振動式コーン貫入試験機の概要

- バイブレータを搭載したCPT先端プローブを用いて、①静的貫入（振動なし）、②振動貫入を2孔で実施し、先端抵抗の低下率から原位置での液状化強度を推定。
- 測定項目：①先端抵抗、②間隙水圧、③加振加速度

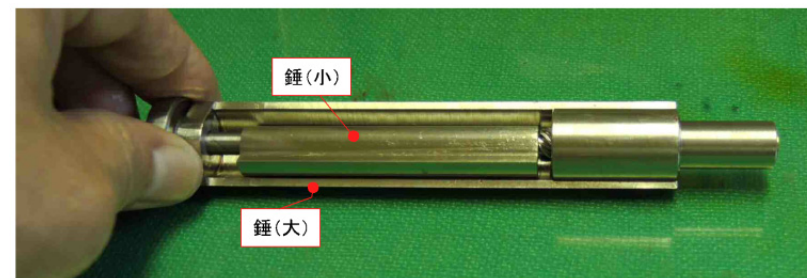
振動式コーン貫入試験機による 原位置試験（イメージ）



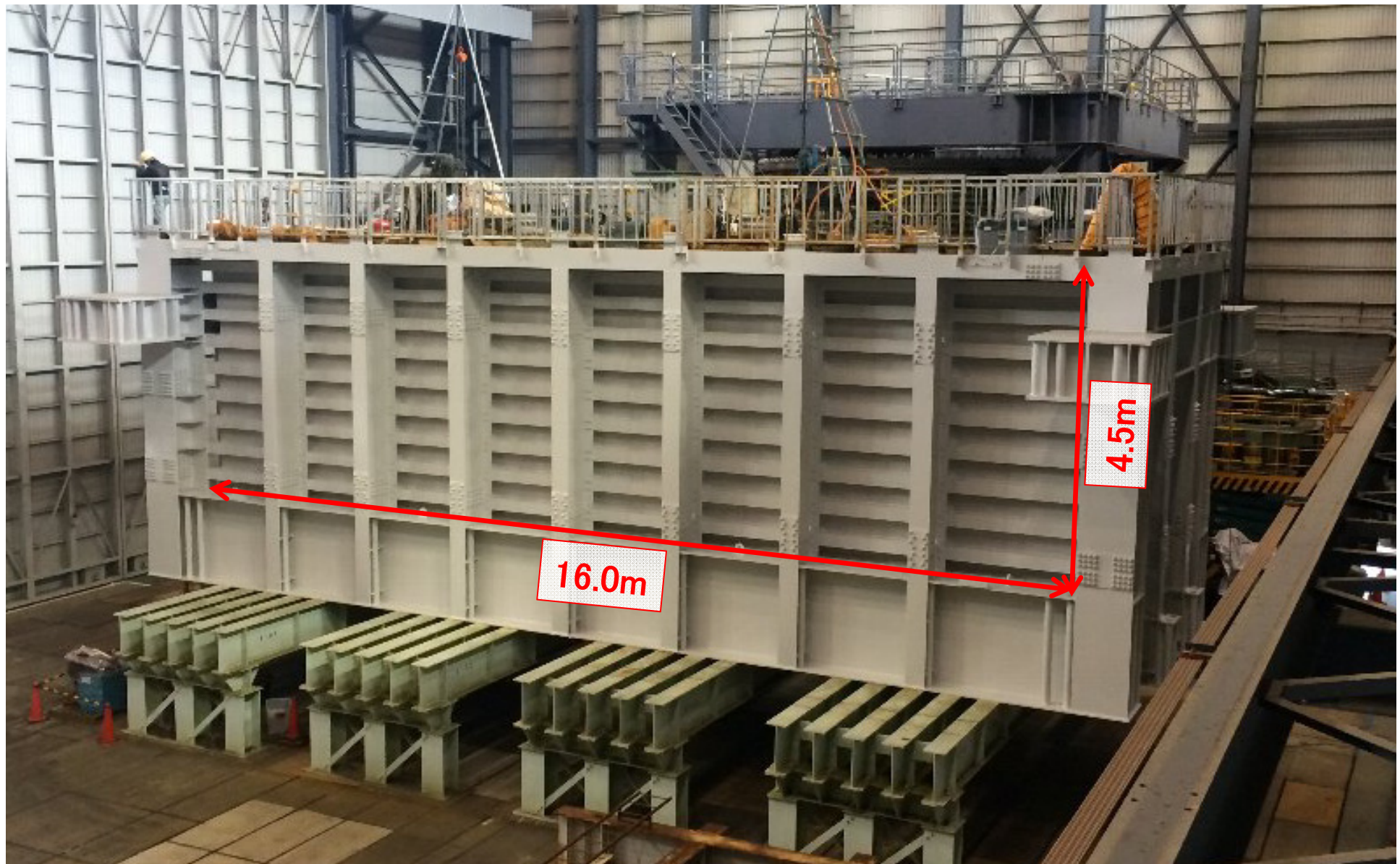
振動コーン内部



可変式の偏心ウェイト



実験土槽 (E-ディフェンス)



研究(1)④: 地盤調査法の検討～振動式コーン貫入試験

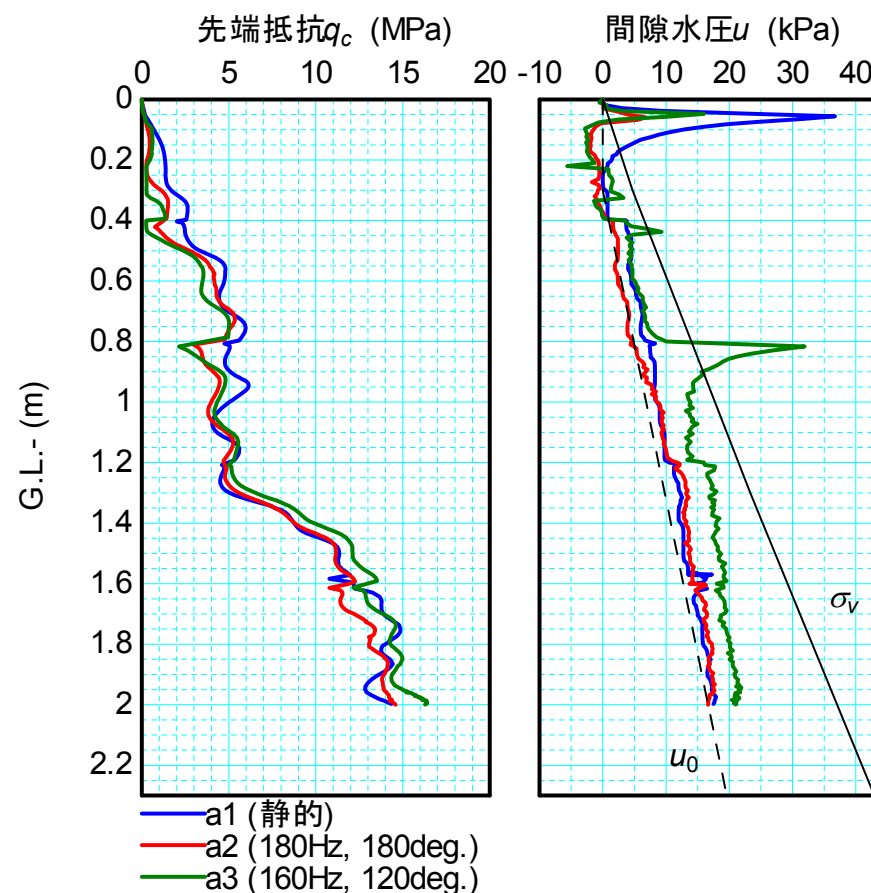


- 未改良地盤部 ($D_r=50\%$) および改良地盤部 ($D_r=75\%$) で実施。
 - いずれも、振動貫入による先端抵抗の低下度合いが鈍い結果。
- ⇒ 今後、試験機の振動能力を向上させたうえで、さらなる検証試験を実施。

E-ディフェンスでの試験状況



試験結果(未改良地盤部)

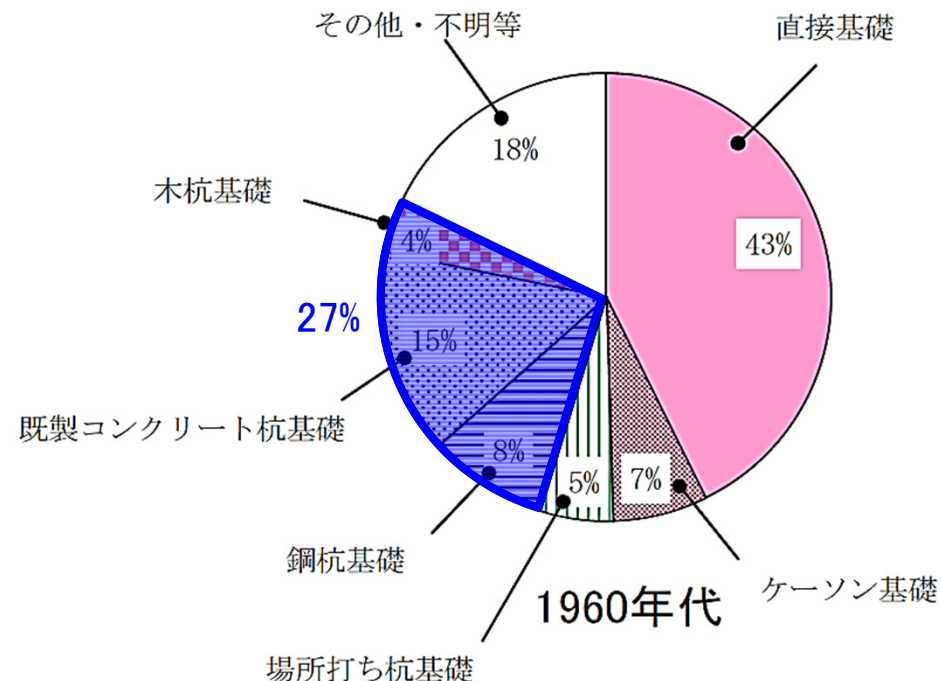


研究(1)⑤: 地盤調査法の検討～杭間地盤調査



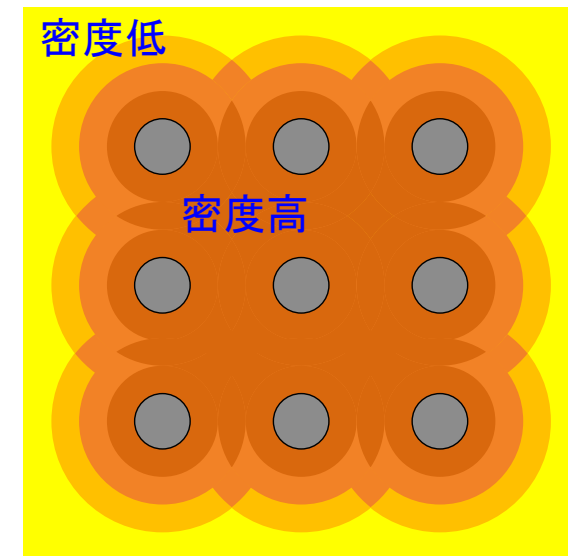
- 液状化設計が行われる以前(～1970)の基礎は、既製杭打撃工法が主流。
 - 杭の打撃貫入に伴い周辺地盤が締固められ、液状化強度が増加している可能性。
- ⇒ 密度計測が可能なRIコーン密度計を用いて、斜方向貫入試験による杭間地盤調査を試験的に実施。

基礎形式の割合(1960年代)



出典: 土木研究所資料第4168号「既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究」、平成22年5月

杭間地盤の締固めイメージ



※杭の断面積分周辺地盤の密度が増加していると想定する場合、杭間隔2.5Dで置換率 $a_s = 12.6\%$ 。

RIコーンを用いた杭間地盤調査の概要

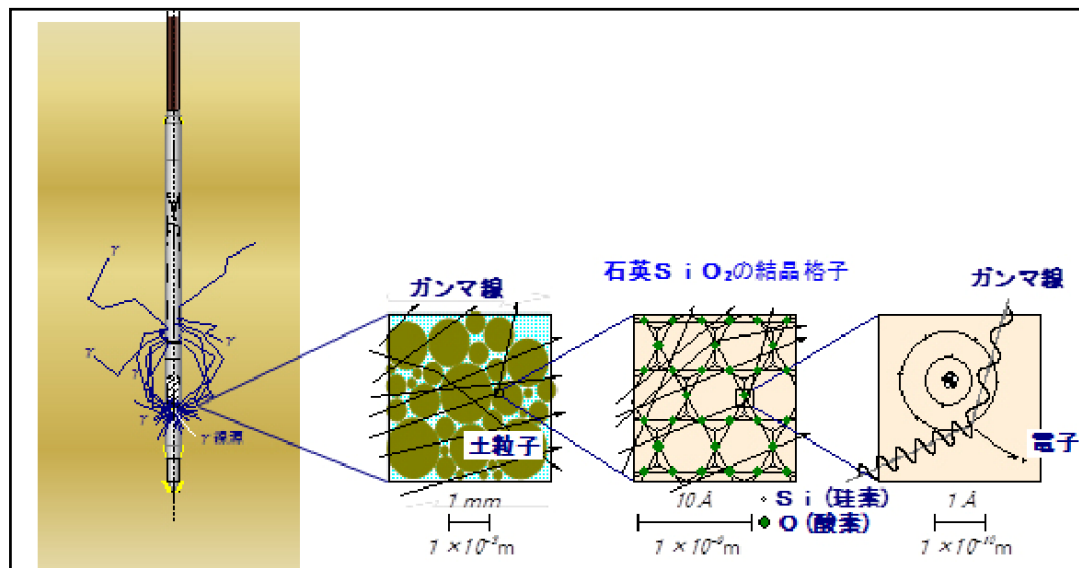
➤ RIコーン密度計の測定原理

線源部(セシウム137)から放出されるガンマ線と電子との相互作用(散乱・吸収)を利用して、電子の空間存在度に比例する質量の空間存在度=湿潤密度を測定。

➤ 地盤調査の方法

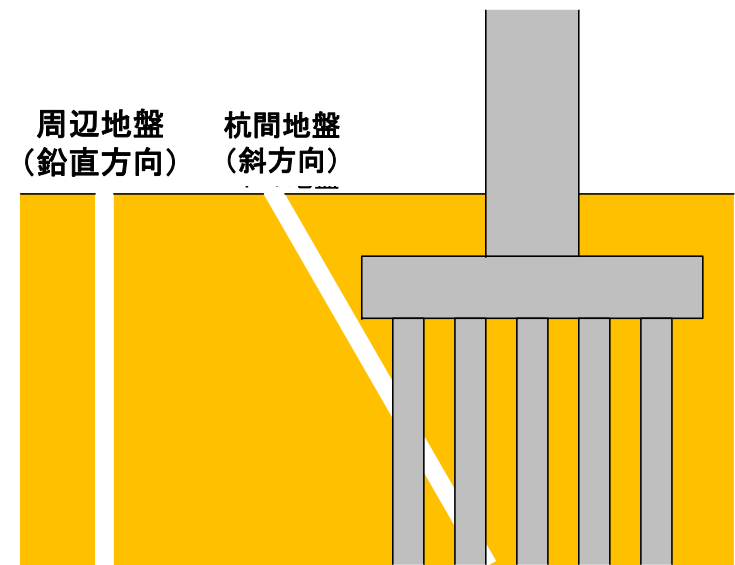
既設橋の周辺および杭間地盤(斜方向、最大傾斜角 40°)に対してRIコーン貫入試験を実施し、地盤の密度を計測・比較評価。

RIコーン密度計の測定原理



http://www.soilandrock.co.jp/tyosa_shiken/cpt.html

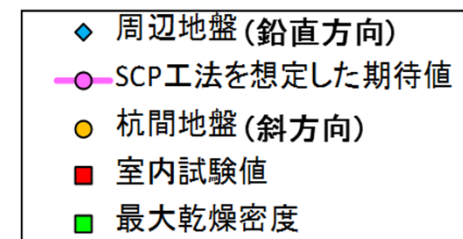
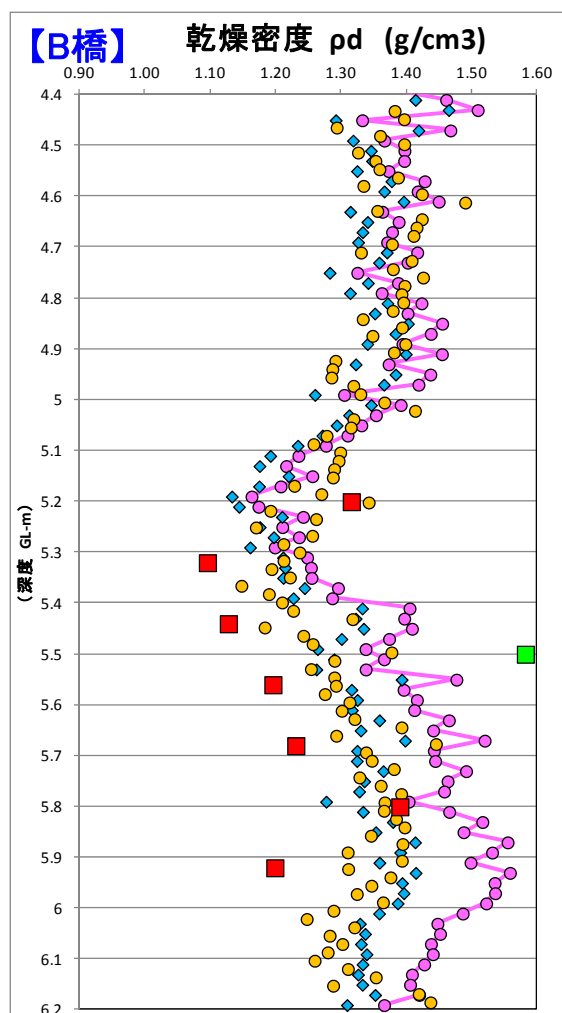
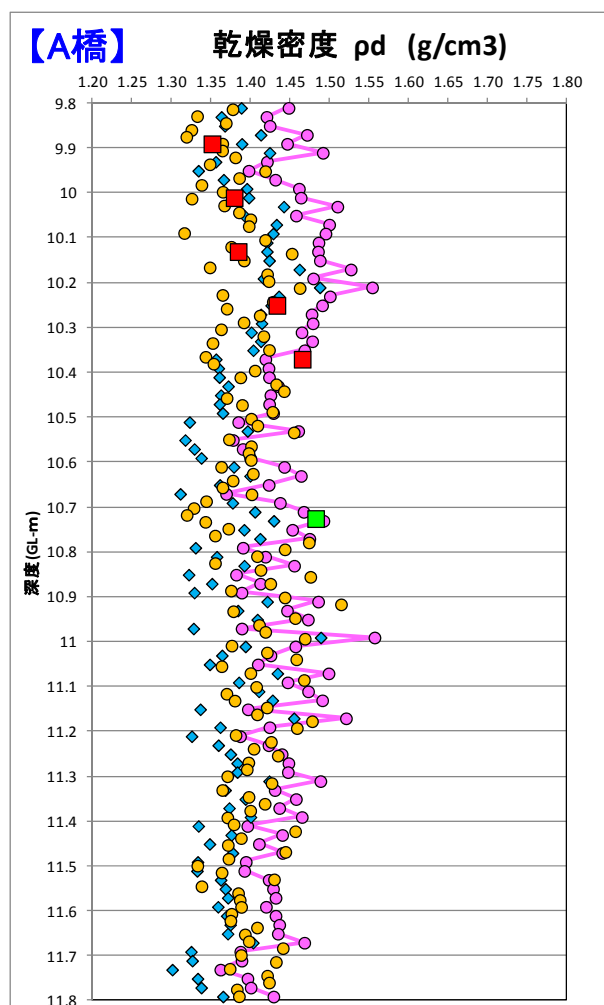
地盤調査の方法



研究(1)⑤: 地盤調査法の検討～杭間地盤調査



- 2つの既設橋(A橋、B橋)で調査を実施(N値10以下の沖積砂質土層)。
- 周辺地盤と比べて杭間地盤で密度が増加している傾向は見られず。
(なお、RIコーンによる杭間地盤調査自体の実用性は確認。)



杭間地盤調査の状況

成果(2)①: 基礎の補強方法の提案



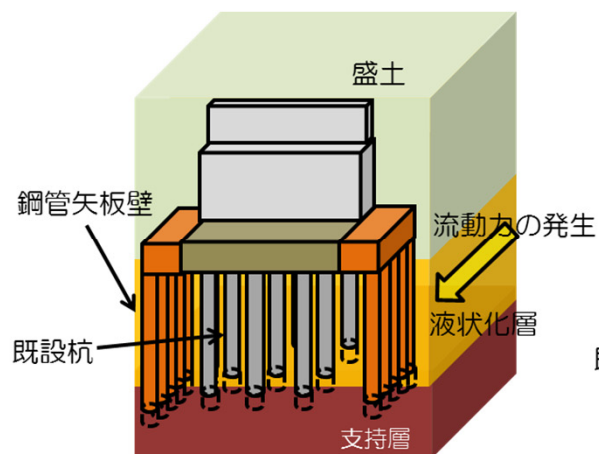
➤ 以下の観点での検討により、基礎の補強工法・構造を提案。

((一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究)

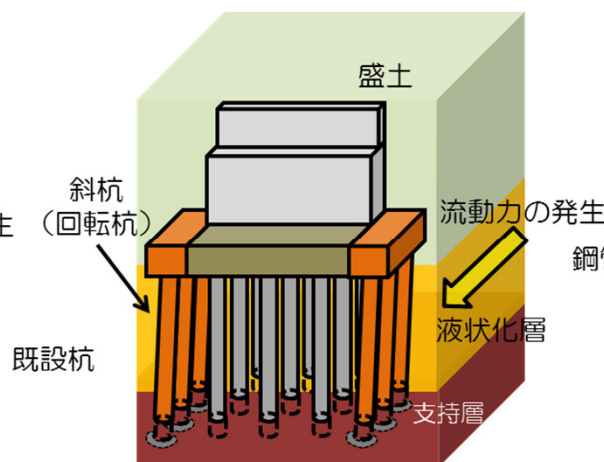
- 補強工事で交通を阻害しない(既設橋のため)
- 液状化に伴う地盤流動に対する有効性
- 施工機械の適用性 など

⇒ 実験等を通じて対策効果を検証。

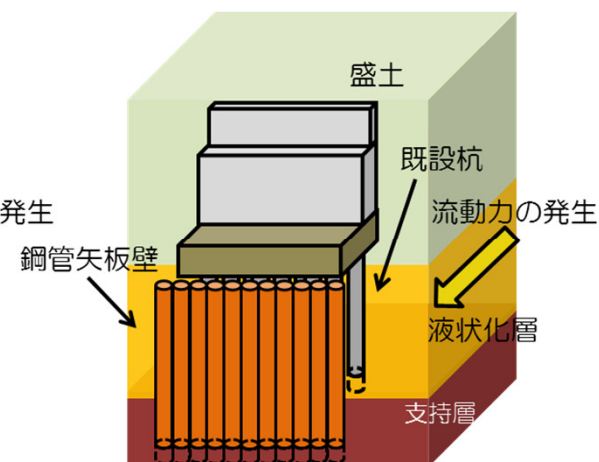
基礎の補強工法・構造



鋼管矢板壁
(側面:一体型)



斜杭(回転杭)
(側面:一体型)



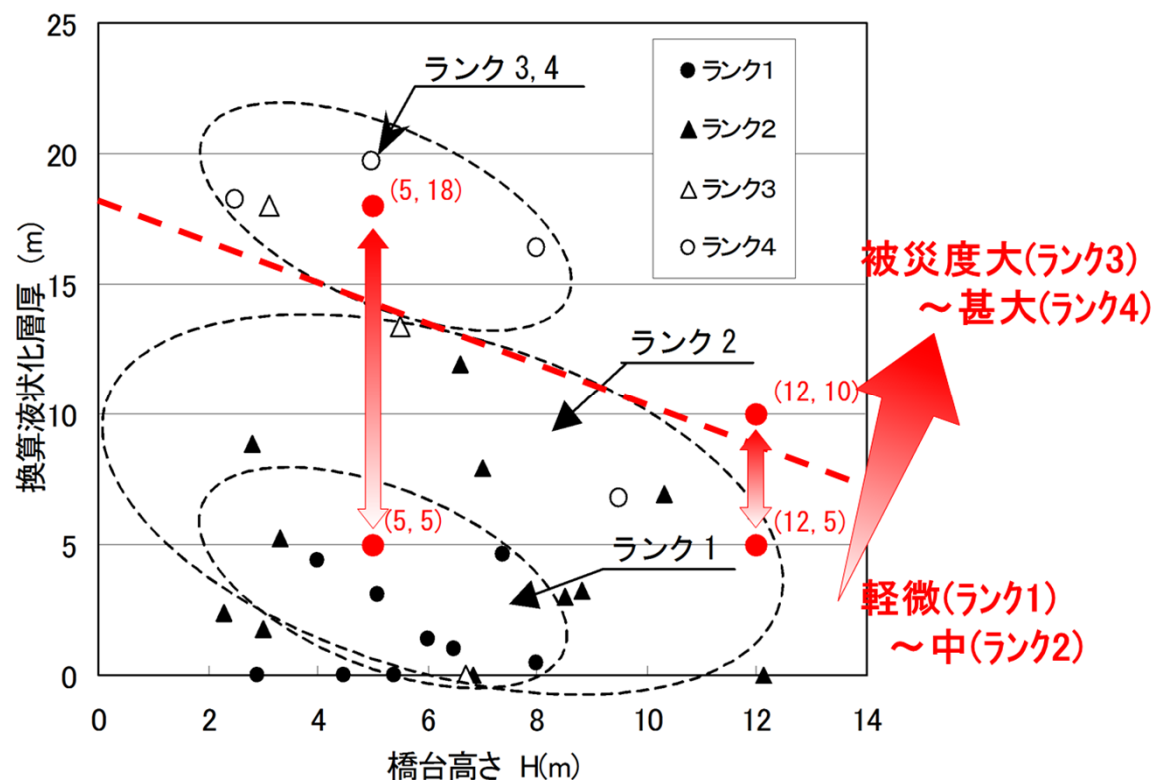
鋼管矢板壁
(前面:分離型)

成果(2)②: 振動実験による検証(対策技術)



- 抽出した補強工法・構造の有効性等を検証するため、動的遠心力载荷実験を実施(現在実施中)。
- 橋台の液状化被災事例の分析から、橋台高さ・層厚をパラメータに。

橋台高さ・液状化層厚と被災度



実験ケース

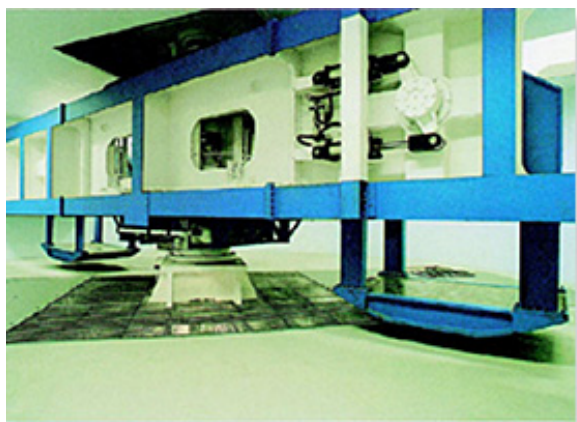
	橋台高さ	液状化層厚	設計基準	補強工法
①	5m	5m	旧	無対策
②	5m	18m	旧	無対策
③	5m	18m	旧	壁(前)
④	5m	18m	旧	斜杭
⑤	5m	18m	旧	壁(側)
⑥	5m	18m	現行	—
⑦	12m	5m	旧	無対策
⑧	12m	10m	旧	無対策
⑨	12m	10m	旧	壁(前)
⑩	12m	10m	旧	斜杭
⑪	12m	10m	旧	壁(側)
⑫	12m	10m	現行	—

出典: 土木研究所資料第4014号「道路橋橋台およびその基礎の地震被災事例」
(平成18年5月)に加筆

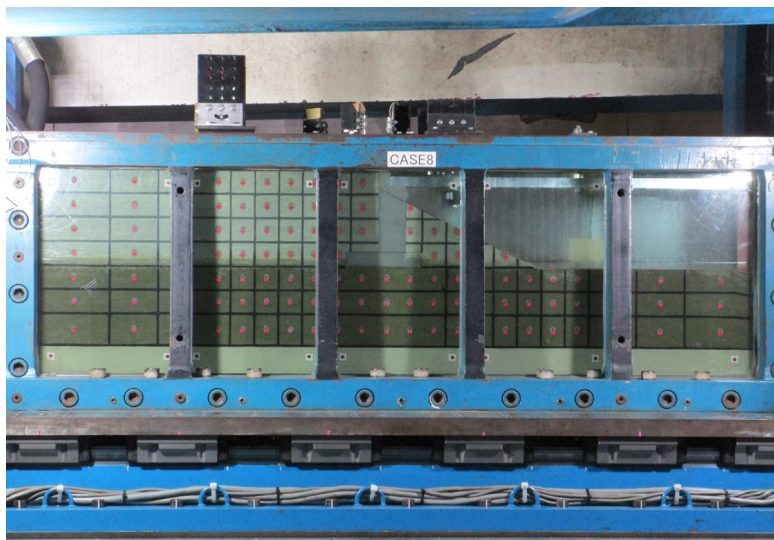
動的遠心力载荷実験の概要

- 大型動的遠心力載荷装置(土木研究所)を使用。
- 縮尺1/60とし、60Gの遠心加速度を作用させた状態で土槽を動的に振動。

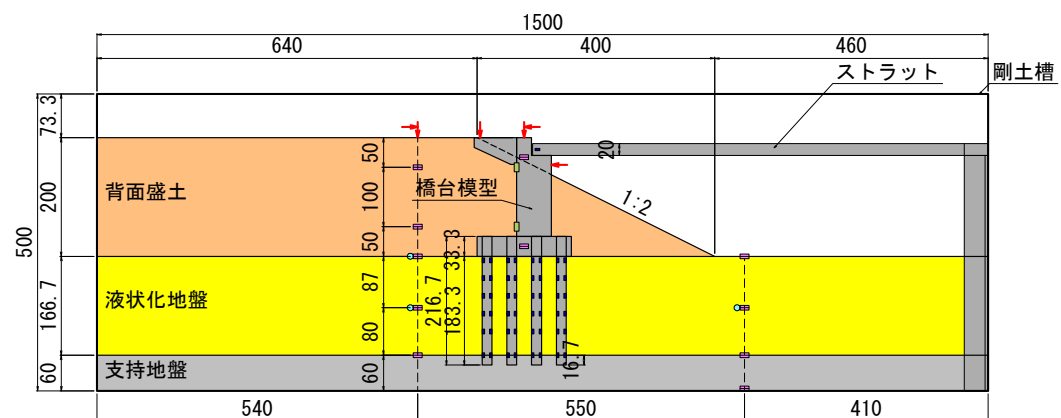
大型動的遠心力載荷裝置



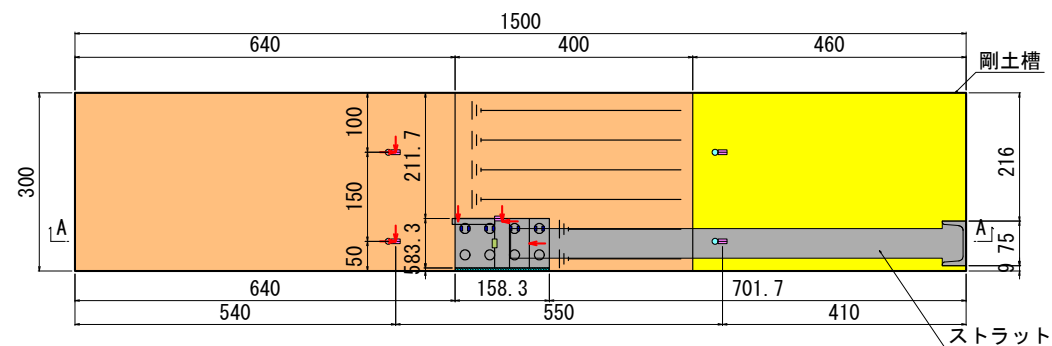
実験土槽および模型の状況 (Case8)



側面図および平面図 (Case8)



A-A断面图



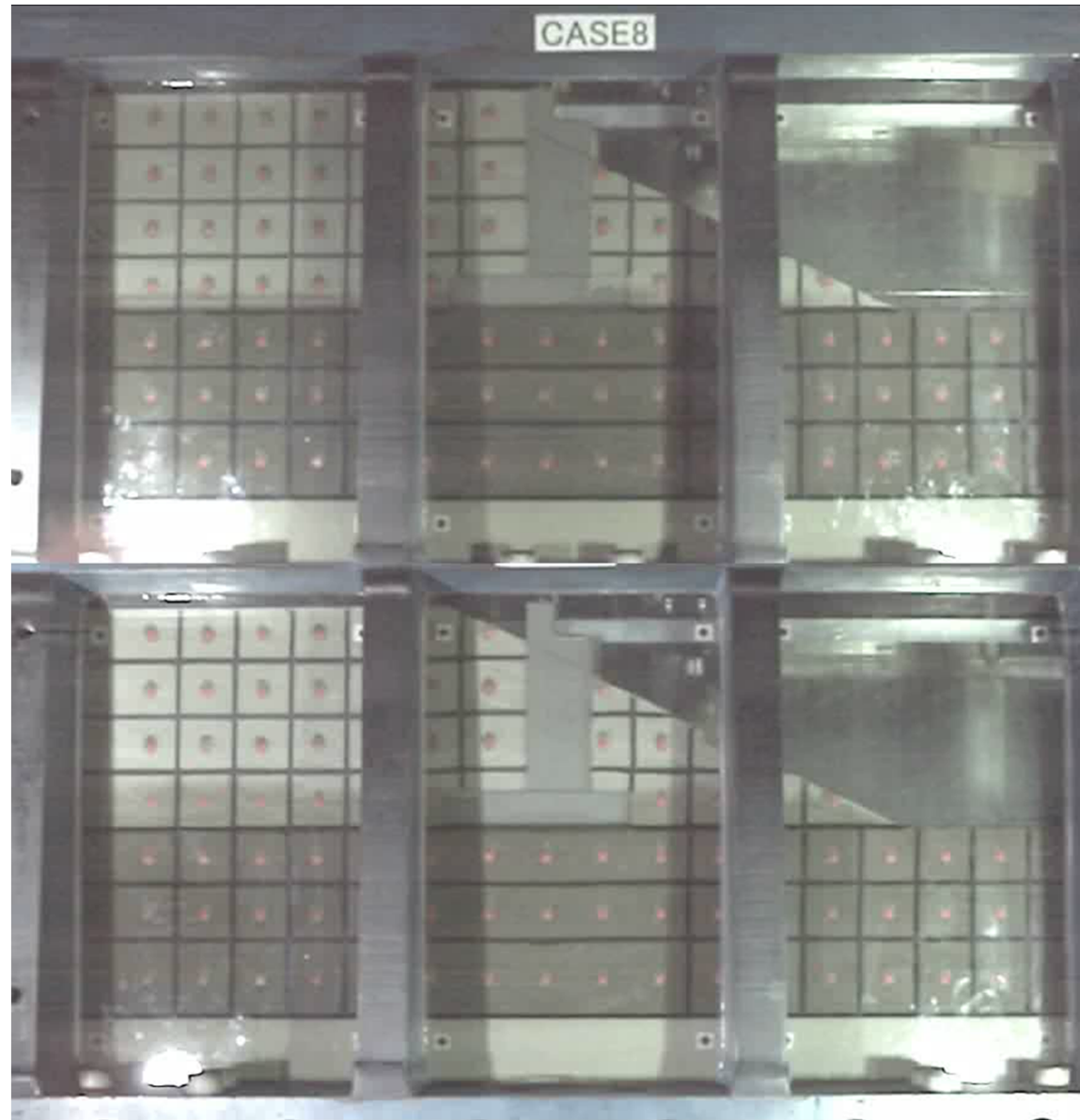
平面図

[单位:mm]

Case8,11 (橋台高さ12m,液状化層厚10m) 実験状況(10倍速)

Case8
無対策

Case11
鋼管矢板壁
(側面:一体型)

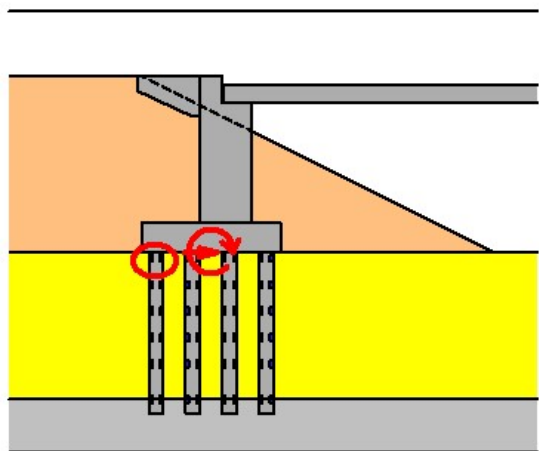


成果(2)②: 振動実験による検証(対策技術)



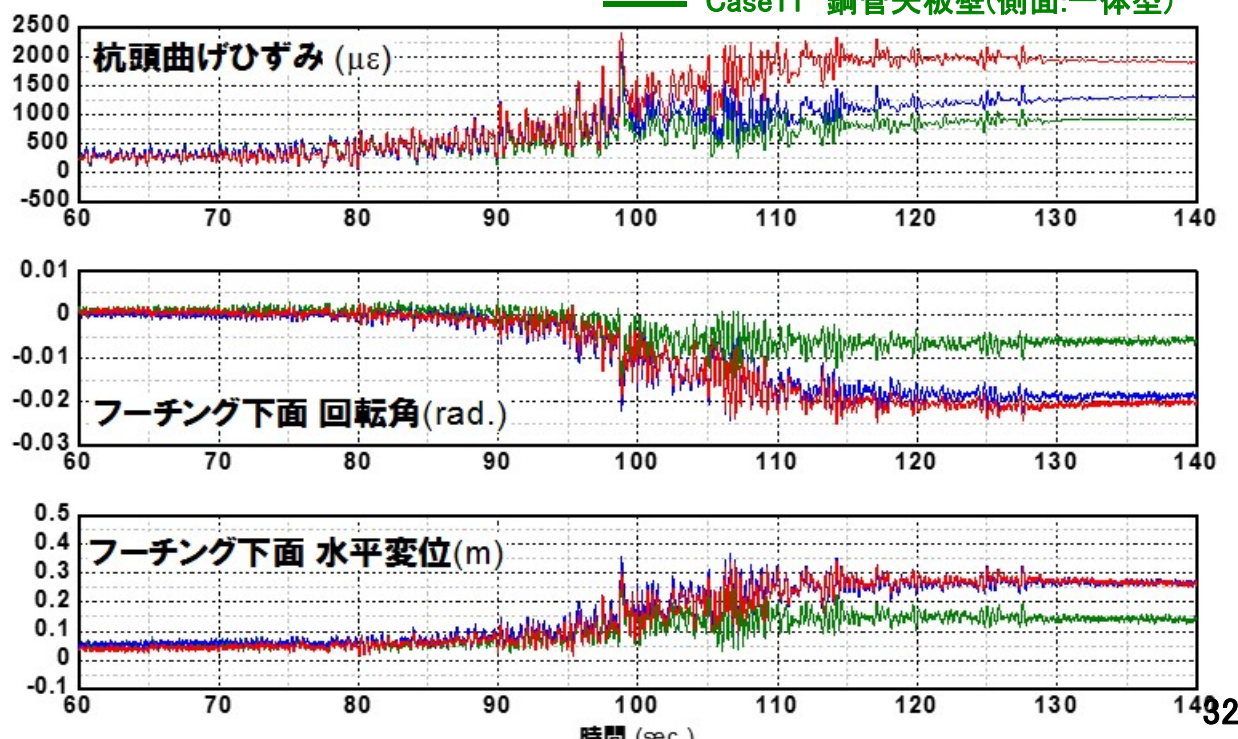
➤ 無対策(**Case8**)および各補強工法・構造(**Case10, Case11**)の実験結果を比較すると(速報値)、鋼管矢板壁(側面:一体型)(**Case11**)は、杭の曲げひずみ、橋台の傾斜・変位抑制の観点から効果あり。

⇒ 今後、土研大型振動台(H28)・E-ディフェンスでの検証実験(H29)を行い、地震後に求められる性能や施工性なども考慮したうえで、補強工法・構造を提案する予定。



実験結果(速報)

— Case8 無対策
— Case10 斜杭(回転杭)(側面:一体型)
— Case11 鋼管矢板壁(側面:一体型)



1. 背景・目的
2. 研究項目・体制
3. 研究状況
4. 今後の取組み等

(1) 今後の取組み

取組み①: E-ディフェンスを活用した検証実験

取組み②: 情報システムへの反映

取組み③: 耐震設計思想の転換

(2) 社会実装 ～ 研究成果の社会への還元

取組み①: E-ディフェンスを活用した検証



- 世界最大級の実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス、(国研)防災科学技術研究所)を用いた大規模実証実験により、提案した対策技術の有効性を検証(平成29年度に実施予定)。

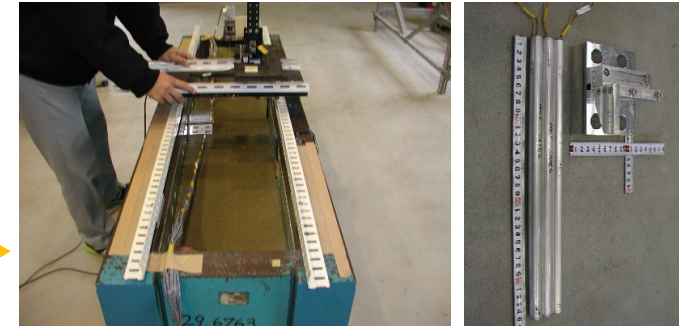


大規模検証実験の目的・意義

1. 遠心力载荷実験 (1/60縮尺: 杭径約1cm)

- 液状化地盤中の基礎の性能評価に影響する各種パラメータ (地盤条件、構造条件、補強方法等) を踏まえた多数の実験を実施し、パラメータの影響を評価

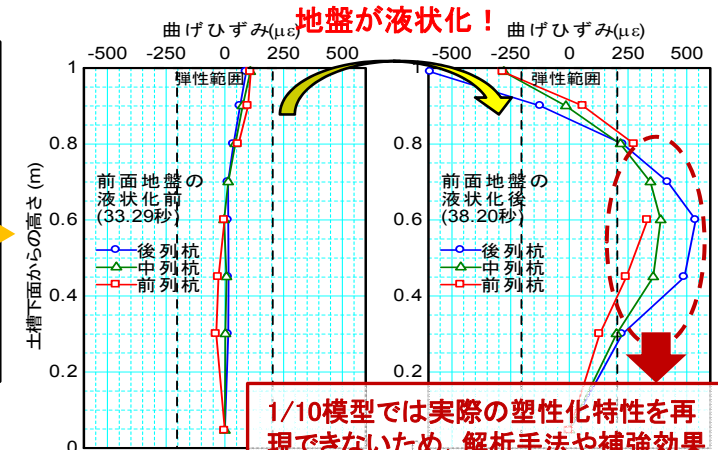
⇒ただし、実験時の観察、データ計測量に限界
→ 液状化～基礎の挙動の関係を詳細に把握できず



2. 振動実験: 土研振動台 (1/10縮尺: 杭径約5cm)

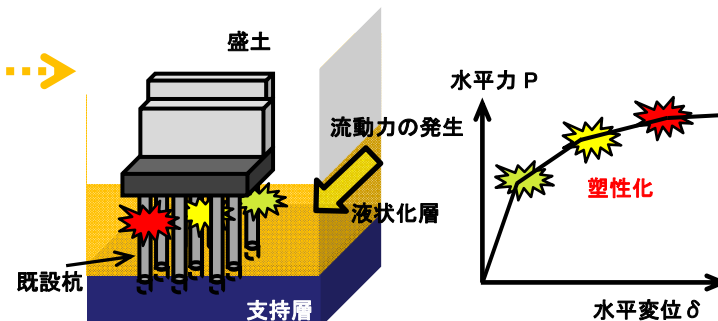
- 代表的な地盤条件、補強条件に対して実験(5ケース)
- 液状化の発生と基礎の挙動の変化を時刻歴で把握
→ 液状化による基礎への影響の詳細評価が可能に!

⇒ただし、実橋に即した基礎構造(RC等)のモデル化は困難
→ 基礎が塑性化した後の地震時挙動の検証ができず



3. 振動実験: E-ディフェンス (約1/4縮尺: 杭径約13cm)

- 代表的な地盤条件、補強条件に対して実験(1ケース)
- 実橋に即した基礎構造をモデル化し、塑性化後の挙動を把握
→ 基礎の塑性化後の挙動も含めた液状化～基礎の挙動の関係が明らかに!



基礎の挙動評価技術および対策技術の確立

取組み②: 情報システムへの反映



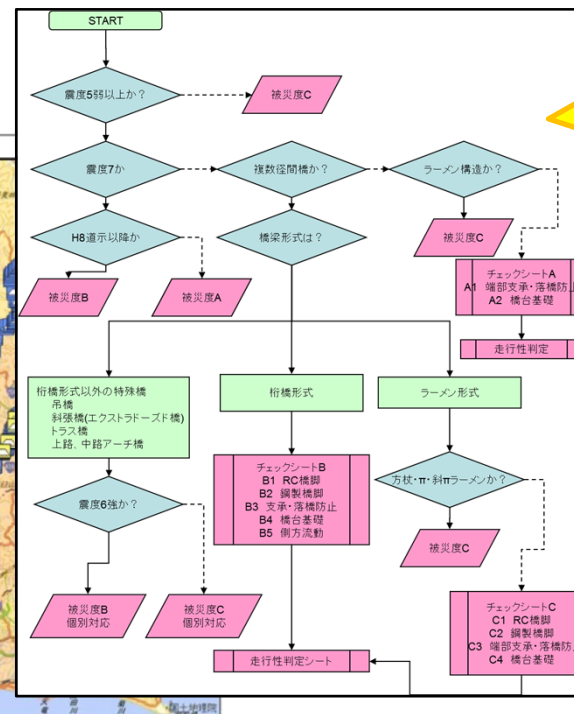
➤ 本研究で得られた知見に基づき道路橋被災度評価手法を改善し、課題⑤「インフラ被災情報のリアルタイム収集・集約・共有技術の開発」(国総研)において開発中の情報分析・意思決定支援システムに反映していく予定。

⇒ 過去の大地震で重篤な被害が生じている液状化被害に対する信頼性が向上。システムの精度向上に貢献(“SOCIETY 5.0”への寄与)。

情報分析・意思決定支援システムのイメージ



道路橋被災度評価フロー



研究成果を反映、
液状化被害に対
する信頼性向上

取組み③: 耐震設計思想の転換

- これまでは、”Safety Design”(安全設計)。

地震による作用力 $\leq$ (タンクや橋の) 抵抗力

- 東日本大震災や熊本地震では、タンクの破壊や落橋は防いだものの、被災により燃料供給機能や通行機能の回復が遅れ、社会的に大きな影響が発生。

⇒ 燃料供給機能や通行機能が速やかに確保されるよう、建設や補強を行う必要あり。

コンビナート地区の液状化被害
(東日本大震災)



高速道路の橋脚の傾斜(熊本地震)



これからの耐震設計 ～Usability-Based Design (UBD)への転換～



これまでの耐震設計 – Safety Design (SD) –

- ・タンクが壊れない
- ・橋が壊れない
- ...

⇒ 抵抗力が作用力を上回るよう設計



これからの耐震設計 – Usability-Based Design (UBD) –

- ・燃料供給ができる程度に変状を抑える
- ・車が通行できる程度に変状を抑える
- ...

⇒ 変位が制御された設計 (Displacement Control)



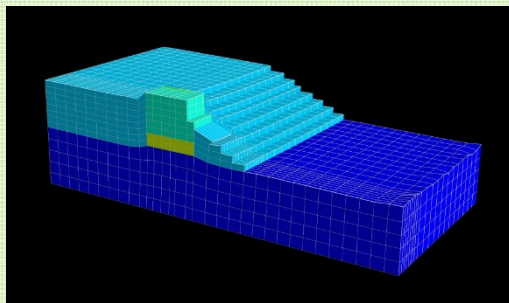
USBへの転換のための大きなチャレンジ

- ・ 液状化による構造物変位の正確な予測は、現在の技術では困難。

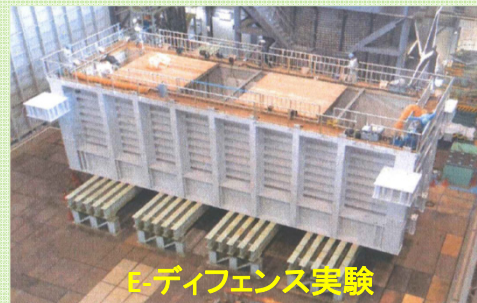
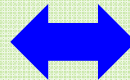


SIPによるブレイクスルー！

- ・ 大規模実証実験 (E-ディフェンス) に裏打ちされた 高精度な予測技術を開発！



検証



E-ディフェンス実験

- 研究成果は、技術基準への反映等を通じて社会実装。
 - 液状化地盤における橋の耐震性能評価手法
⇒ 道路橋の設計基準(道路橋示方書)へ。
 - 液状化地盤における既設橋の基礎の耐震対策技術
⇒ 設計ガイドライン等を公表し、耐震補強施策を技術支援。
- CAESARとしても、出来るだけ早期に成果をあげて社会に還元していくことを目指し、引き続き重点的に取り組んでいく。