

地震の時に何が起きるのか？

-液状化のメカニズムと対策の最前線-

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所

上級専任研究員 菅野 高弘

海底で地震が発生すると、「津波」も発生することが多い

地震・津波の発生から被災まで

Evil Twins (悪魔の双子)

岩盤・地盤

秒速7000m ~ 50m

(岩盤) (軟弱土)

**地殻変動
(断層運動)**

秒速200m ~ 10m

(水深4000m) (水深10m)

海水 $C = \sqrt{g \times h}$

g :重力加速度 h :水深

地震被害

対象施設

津波被害

地震による施設被害の要因

- 揺れの強さ（加速度）による被害 ← 大きくなる
- 揺れの速さ（周波数）による被害 ↑
- 共振：構造物と地盤の揺れが一致 応答加速度
- 地盤の劣化・部材の劣化
 - 液状化 常時は堅いが、突然液体状に
 - 繰り返し载荷による損傷の進行
- プレートの動きに伴う被害
 - メートル単位の即時沈下 防潮堤高さ

設計ミス／施工不良／維持管理不良は論外



トルコ コジヤエリ地震
1999年8月17日
M7.6

Yucsekent

リゾート地域
鉄筋コンクリート5～6階建

典型的な
パンケーキクラッシュ



十勝沖地震
1968年5月16日
M8前後



函館大学寄宿舍

ロマ プリータ地震(カリフォルニア州)
1989年10月19日

ダブルデッキの道路高架橋
上層デッキが下層デッキを潰した

サイプレス高架橋(オークランド市内)



斜面の崩壊に伴う被害：サンアントニオ





液状化による被害 万代島の船溜側物揚場 1964年新潟地震



液状化により岸壁が数メートル海側へ変位、背後が2m程度沈下 (神戸港ポートアイランド、1995年兵庫県南部地震)

液状化で傾いた4階建ビル 1999年トルココジャエリ地震





橋脚基礎部の液状化による桁の落下
コンセプト 2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



下水処理施設の液状化による浮上

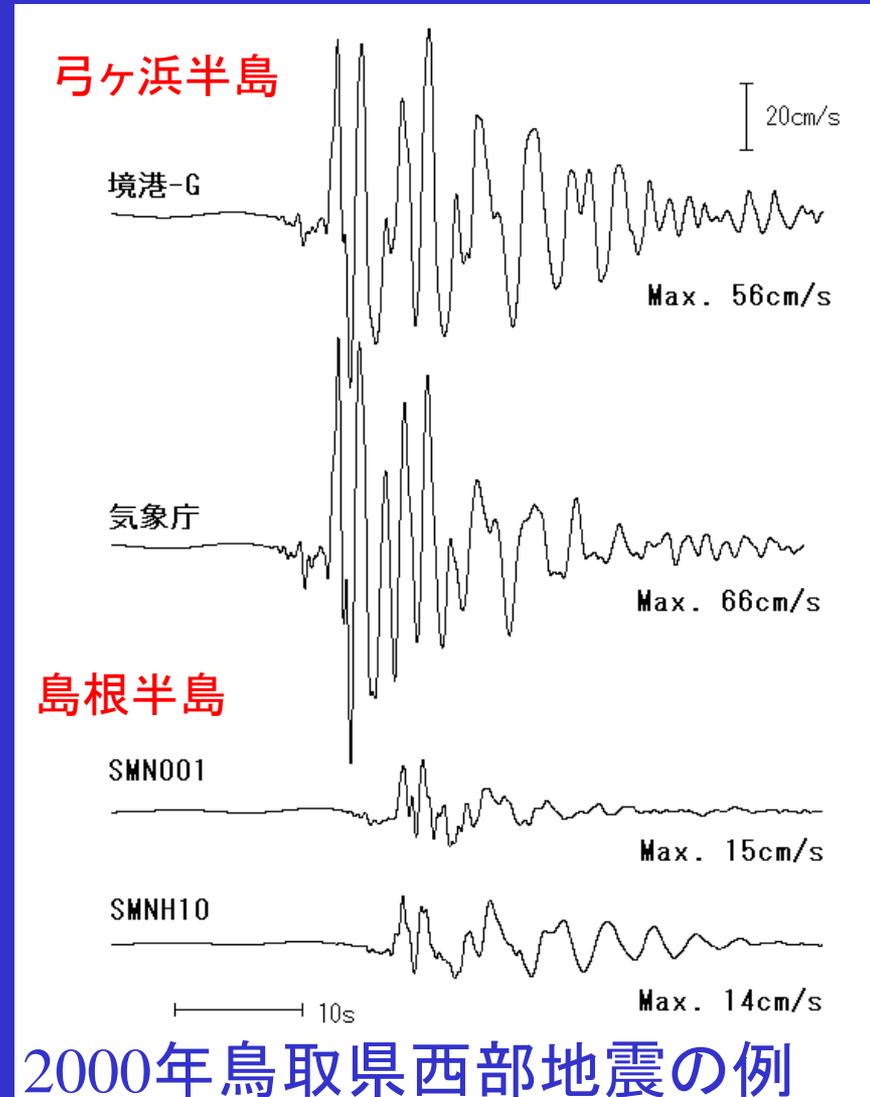
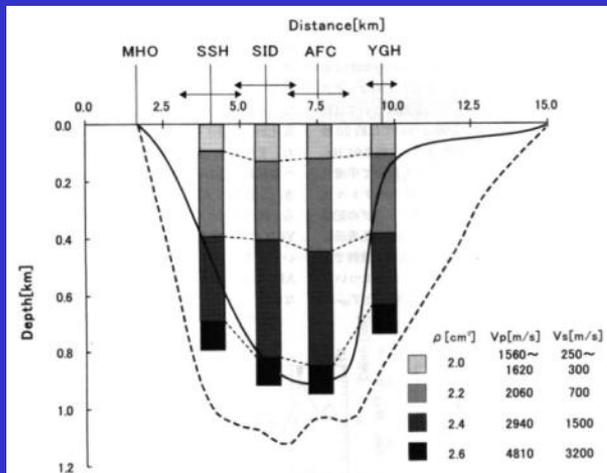


重錘落下による液状化対策が効果を発揮

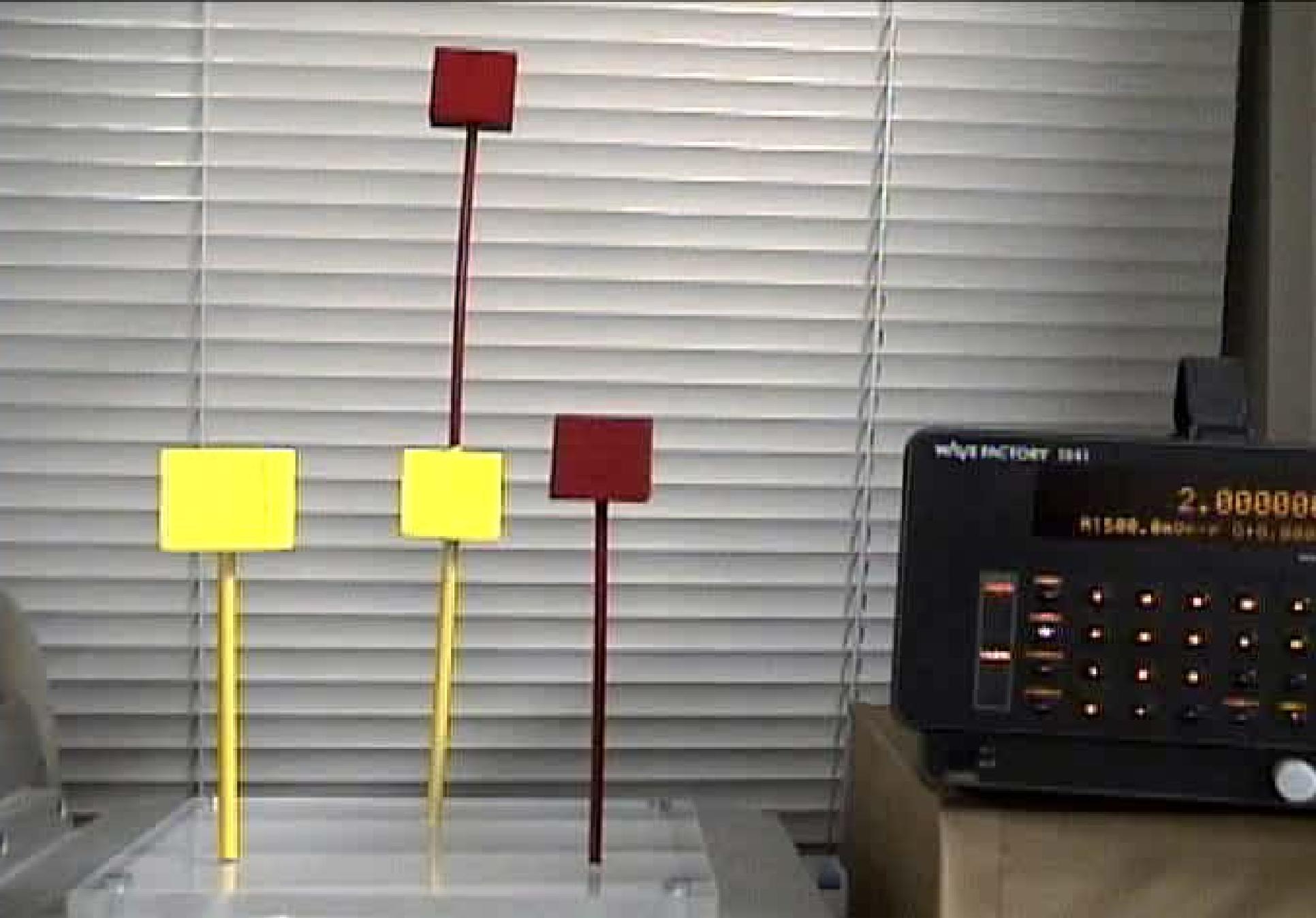
コロネル 漁港縦棧橋 2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



地盤条件で揺れ方が違う



2000年鳥取県西部地震の例



津波による施設被害の要因

- 波圧による被害
 - 衝撃波圧・重複波圧・遡上波圧・越流波圧など
- 流水力による被害
 - 海水と施設間の
 - 摩擦力・抗力・揚力・慣性力・造波抵抗力など
 - 船舶・コンテナ・流木などの衝突
 - 瓦礫を含んだ混相流
- 浮力による被害

設計ミス／施工不良／維持管理不良は論外

ロビンソンクルーソー島津波前 2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



ロビンソンクルーソー島津波後 2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



バンダ・アチエ

2004年スマトラ島沖地震



Ulee Lheue port: 数百キログラムの岩が棧橋の上に 2004年スマトラ島沖地震



発電用バージが3km内陸部へ

2004年スマトラ島沖地震



地震と津波複合被害

先に 地震動作用,

次いで津波作用

秒速7000m~50m

地殻変動

(岩盤)

(軟弱土)

(断層運動)

・ 余震による繰返作用~(数週間)

・ 津波の第二波・第三波・・・

海水

(1日程度)

地震被害

対象施設

津波被害

誰か、被害が進行する過程を見た人はいいますか？

トウブル付近 地震による液状化と津波により破壊した橋梁 2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



ディチャト：河口部

液状化と洗屈により地盤が消失
2015年チリ沖地震（イヤペル地震）



過去の大震災からの教訓

【1964年新潟地震における大規模液状化災害】

液状化による大規模災害が発生し、一般に認知。

【1995年阪神・淡路大震災からの教訓】

(1) 日本国内には、耐震性に劣る古い建物・基盤施設が溢れている。これらの耐震性能を正しく評価したうえで適切に補強し、大地震に備える必要がある。

→ 既存ストックの耐震性向上と再生

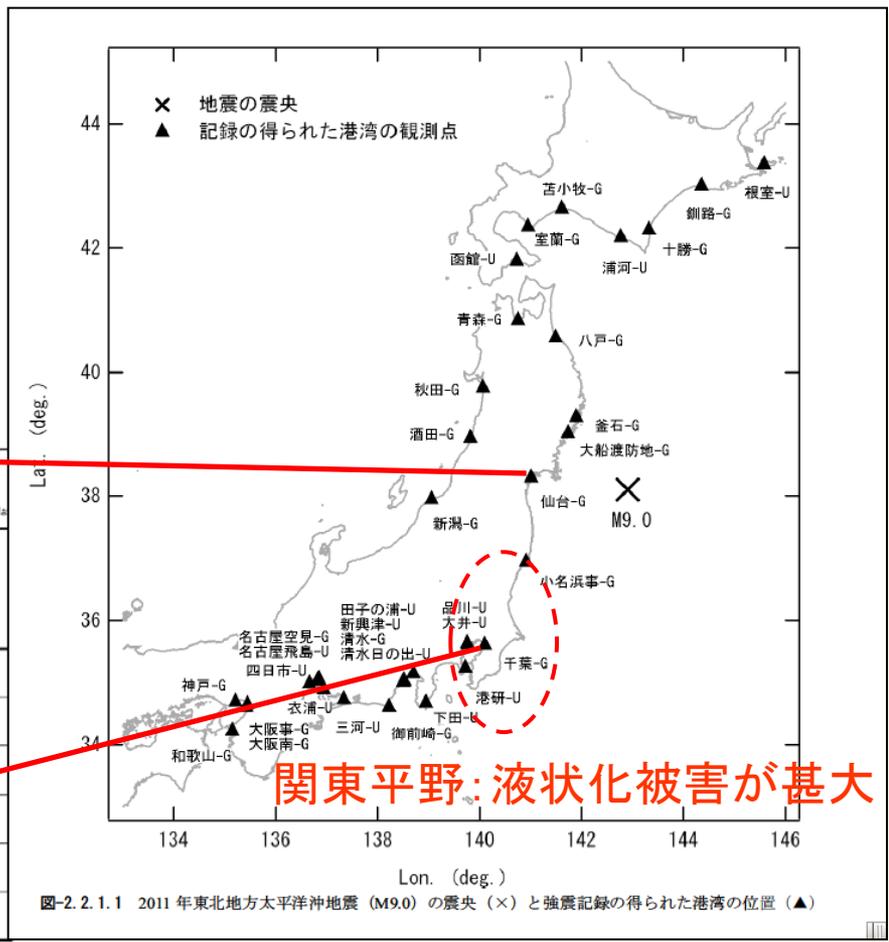
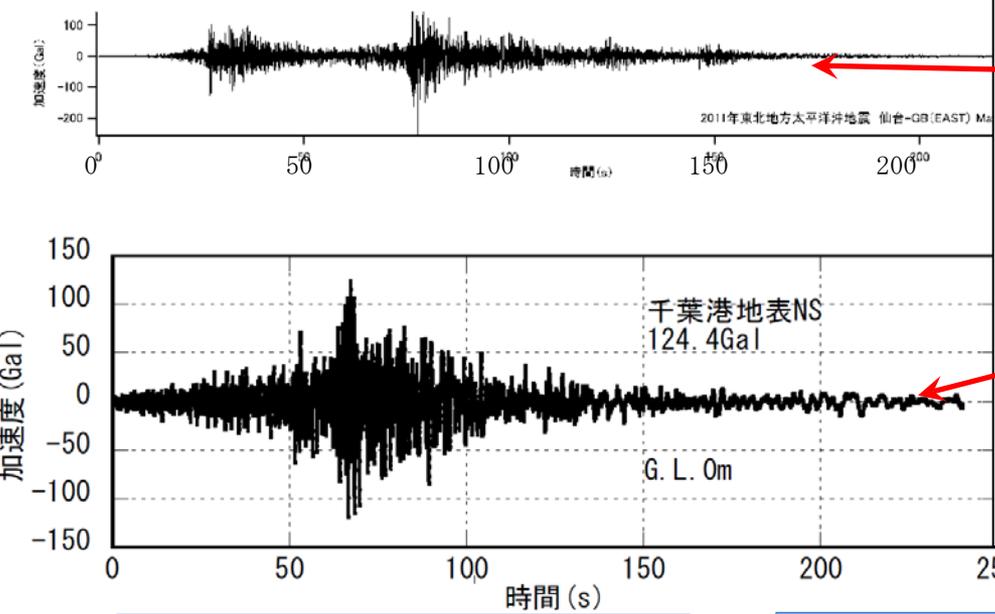
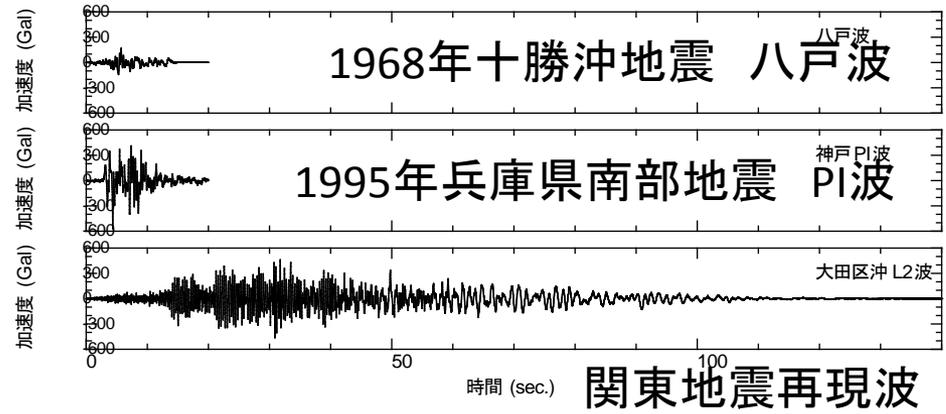
【2011年東日本大震災からの教訓】

(2) 既存構造物で想定するより大きな揺れ/長い揺れが起こり得る。過大な揺れに対する耐震性を明らかに、より耐震性の高い工法に関する技術開発の必要がある。

→ より高い耐震性能（機能維持能力、安全性）を
現実的に確保する技術開発と実践

被災事例分析, 要素試験, 模型実験, 現場実験, 数値解析

2011年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) による課題



関東平野: 液状化被害が甚大

図-2.2.1.1 2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の震央 (X) と強震記録の得られた港湾の位置 (▲)

2016年熊本地震でも

地震動の継続時間が長い + 前震・本震・余震・・・何度も揺られる

液状化が発生した地震の代表的事例（～1980）

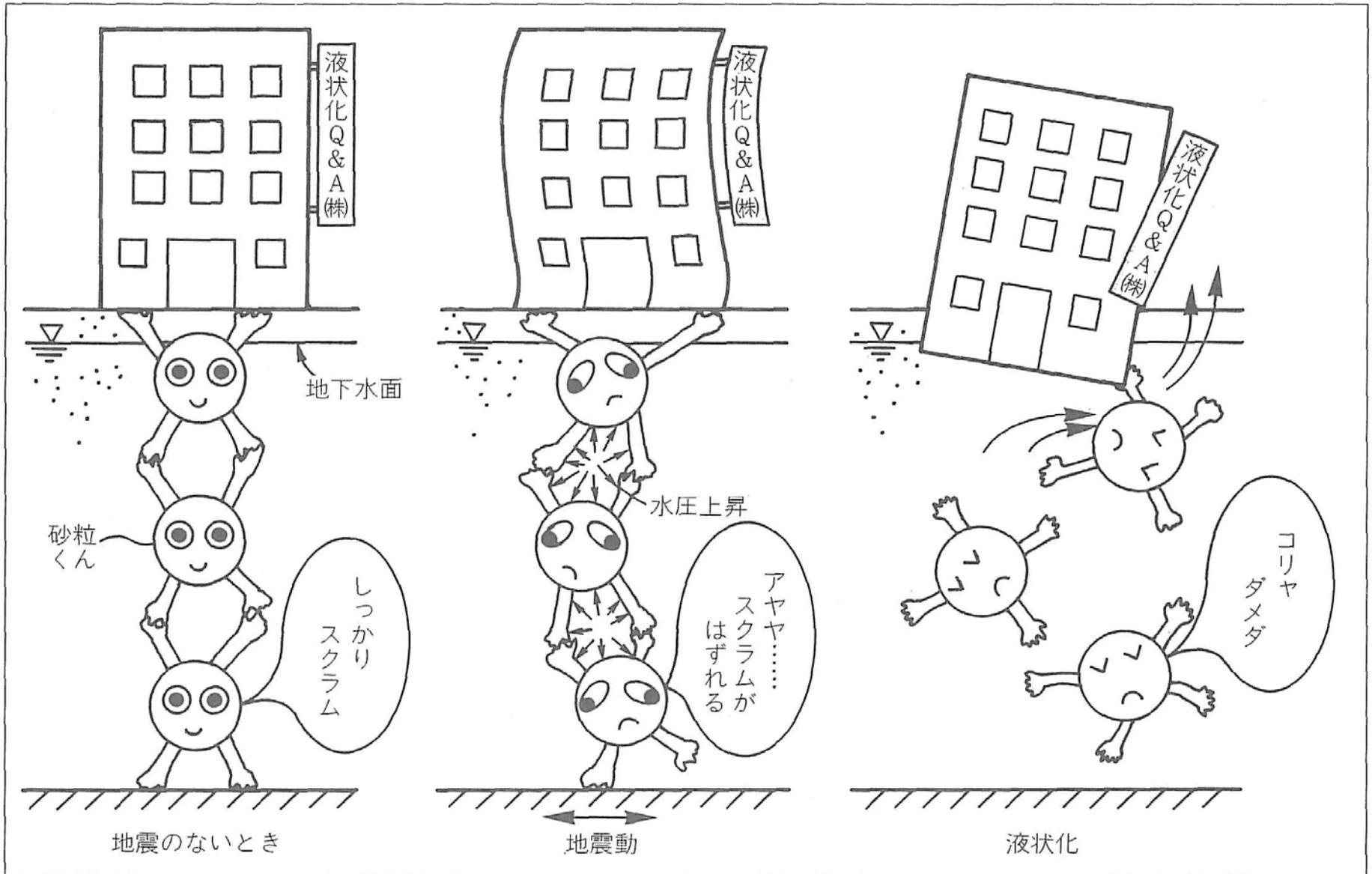
学ぶことが多く、徐々に研究・開発が進んでいる

日時	地震名	M	液状化発生範囲および特徴
1891.10.28	濃尾地震	8.4	濃尾平野における液状化
1923.9.1	関東地震	7.9	関東平野広域における液状化
1945.12.7	東南海地震	8.0	静岡から大阪にかけての広域における液状化
1948.6.28	福井地震	7.1	沖積平野における液状化
1964.3.27	アラスカ地震	8.4	沿岸地域の地すべり
1964.6.16	新潟地震	7.5	信濃川河口域を中心とした液状化地盤の流動
1968.5.16	十勝沖地震	7.9	青森から北海道の太平洋沿岸域における埋立て地盤の液状化
1971.2.9	サンフェルナンド地震	6.6	アースダム（サンフェルナンドダム）の崩壊
1973.6.17	根室半島沖地震	7.4	埋立て地盤（花咲港，霧多布港）の液状化
1975.2.4	海城地震	7.3	下遼河平野における液状化
1976.2.4	グアテマラ地震	7.5	アマティトラン湖岸砂質地盤の液状化
1976.7.28	唐山地震	7.8	唐山市南方の三角州地帯の液状化,アースダムの崩壊
1977.3.4	ルーマニア地震	7.2	水平地盤（ブカレストその他）の液状化
1978.1.14	伊豆大島近海地震	7.0	伊豆山中の鉱さい堆積場の液状化
1978	宮城県沖の地震	6.8	宮城県名取川沿いの液状化
1978.6.12	宮城県沖地震	7.4	宮城県の平野一帯における水平地盤の液状化
1979.4.15	モンテネグロ地震	7.3	水平地盤（モンテネグロ）の液状化

液状化が発生した地震の代表的事例（1981～）

1982.3.21	浦河沖地震	7.3	北海道太平洋沿岸における液状化
1983.5.26	日本海中部地震	7.7	秋田から青森の日本海沿岸一帯における干拓堤防砂丘後背地の液状化
1985.9.19	メキシコ地震	7.9	埋立地（ラサロカルデナス）における液状化
1987.12.17	千葉県東方沖地震	6.7	東京湾岸埋立地における液状化
1989.10.17	ロマプリータ地震	7.1	水平地盤，埋立て地盤の液状化
1990.7.16	フィリピン地震	7.8	液状化による地盤の流動（ダグパン）
1993.1.15	釧路沖地震	7.8	釧路市東港区等,埋立て地盤の液状化,グラベルドレーンの効果
1994.7.12	北海道南西沖地震	7.8	奥尻島沿岸部における河川付近,礫質地盤における液状化
1994.12.28	三陸はるか沖地震	7.5	港湾地域（八戸港河原木地区，八太郎地区埠頭）を中心とした液状化による噴砂，亀裂および陥没の発生
1995.1.17	兵庫県南部地震	7.2	埋立地,人工島（ポートアイランド等埋立地他）における液状化
1997.3.26	鹿児島県北西部地震	6.3	造成地,しらすの液状化
1999.9.21	トルコ・コジャエリ地震	7.4	内陸部自然地盤（アダパザルの旧河道）における液状化
1999.9.21	台湾・集集地震	7.3	低地,河川流域および臨海地域における液状化
2000.10.6	鳥取県西部地震	7.3	埋立地（竹内工業団地）におけるシルトの液状化
2001.2.28	米国・ニスクワリー地震	6.8	港湾付近やデルタにおける液状化,水際における側方流動
2001.3.24	芸予地震	6.4	埋立地における液状化
2003.5.26	三陸南地震		鳴瀬川堤防に被害
2003.9.26	十勝沖地震		300km離れた札幌市内で液状化
2004.10.23	新潟県中越地震	6.8	信濃川の旧河道，自然堤防を形成する河成砂および河岸段丘面の液状化および軟弱地盤上の盛土，埋戻し土
2012.3.11	東北地方太平洋沖地震	9.0	関東平野の宅地地盤において，軒並み激しい液状化

液状化のメカニズム



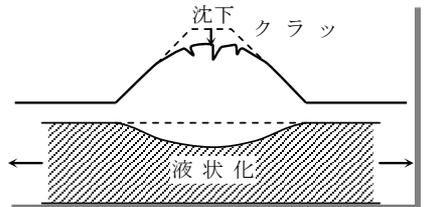
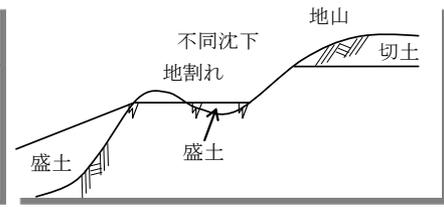
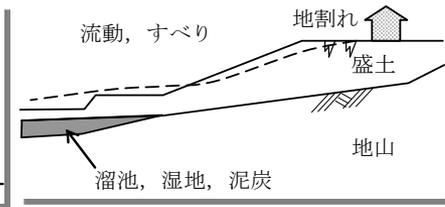
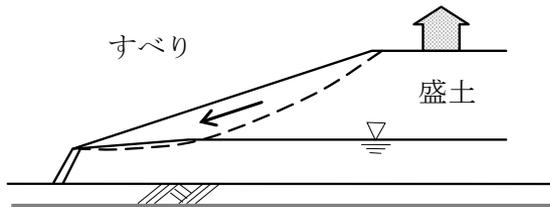
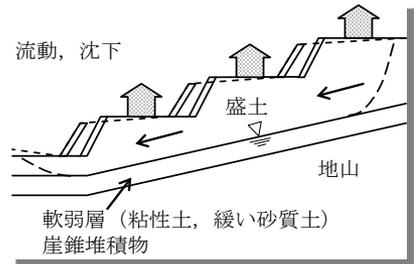
- 地震の作用によって地盤の強度や剛性が低下
- 地下水位が高く、緩く堆積した砂地盤で発生することが多い
- 地震で揺すられ砂粒子の配列が変化、間隙が小さくなろうとすると、水圧が上昇、スクラムが崩れて砂粒子がバラバラに・・・

常時は硬い地盤が液体状に変化
雪崩、土石流も似たような現象

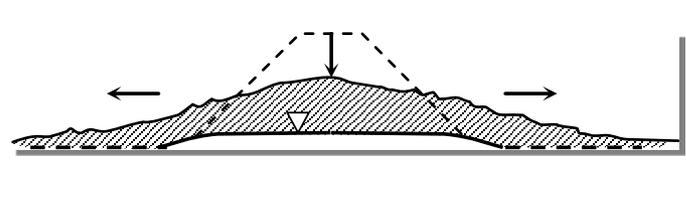
動きやすくなる 変形しやすくなる

液状化被害パターン

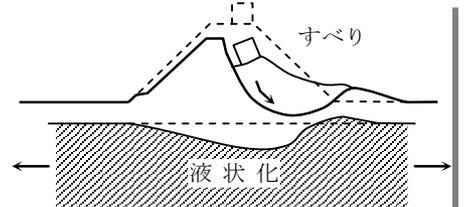
盛土造成地等



沈下, クラック

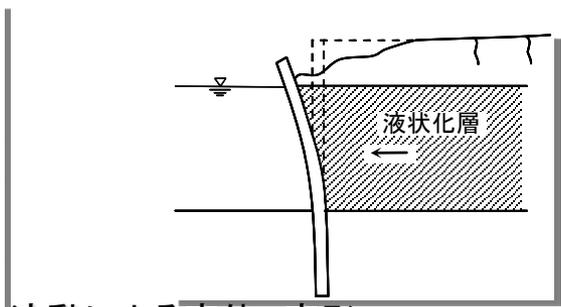
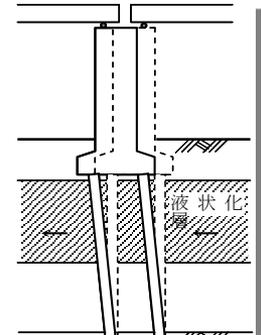
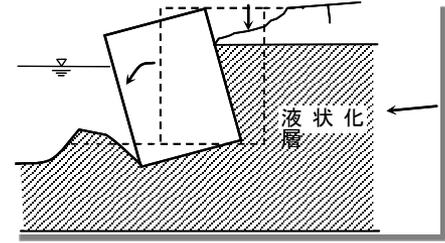
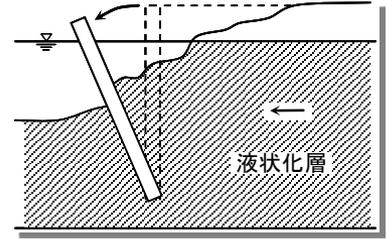
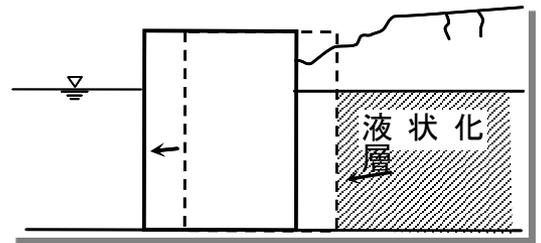
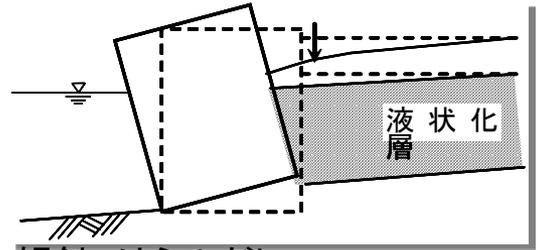


盛土自体の液状化による崩壊



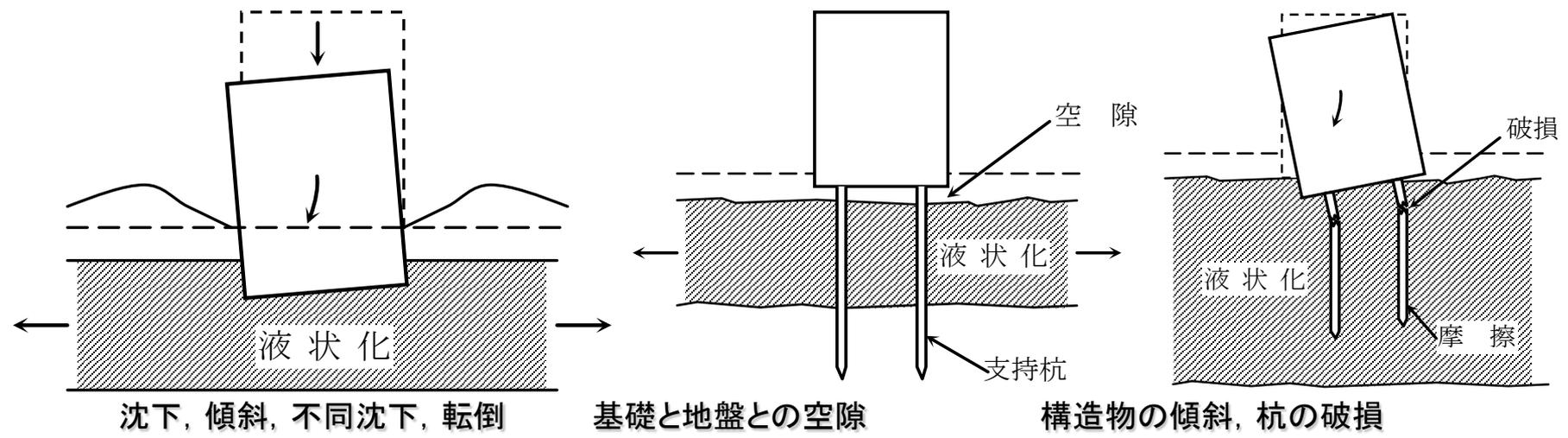
すべり破壊

護岸・橋脚基礎



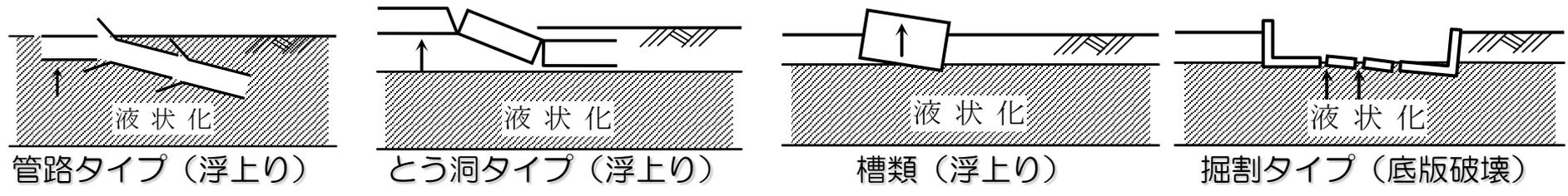
液状化被害パターン

建築



地下埋設物

浮き上がり



破損



4階建てのアパートを支えていた
砂地盤が液状化すると……



16m程度の高さケーソンが、最大5m程度
海側に動いた

→5階建のアパート相当の
鉄筋コンクリートの箱

液状化し難くするには！

地震が発生しなければ良い・・・無理
地震の揺れが小さければ良いが・・・

難しそうなので、地盤を強くして、
地震の揺れに対して頑張れるように

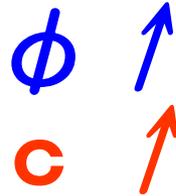
地盤の強度：

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi$$

cを大きくする **u**を小さくする **ϕ** を大きくする

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi$$

- 密度の増大
 - 固結
 - 粒度の改良
 - 飽和度低下
 - 間隙水圧抑制・消散
- せん断変形抑制
 - 構造的対策



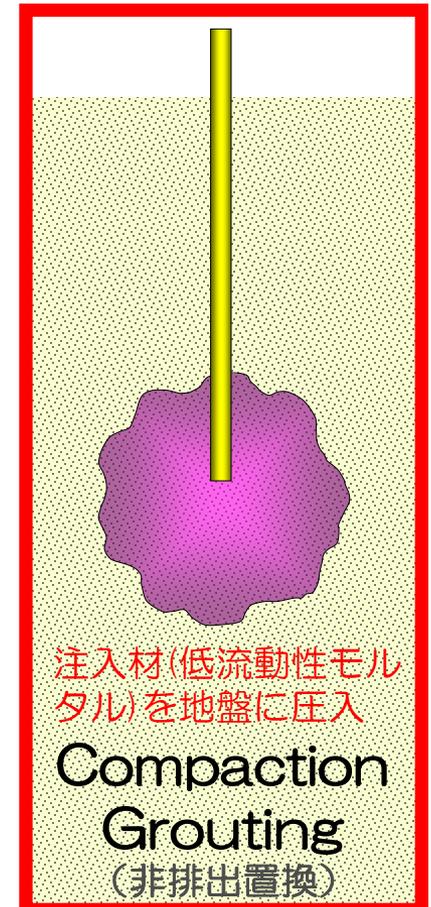
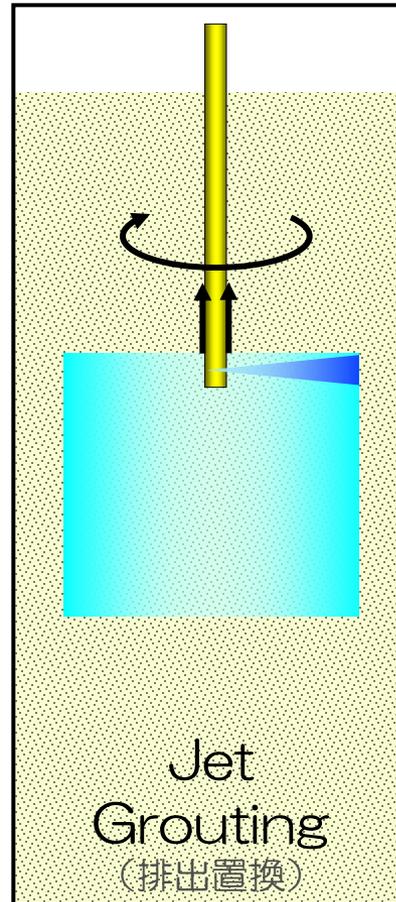
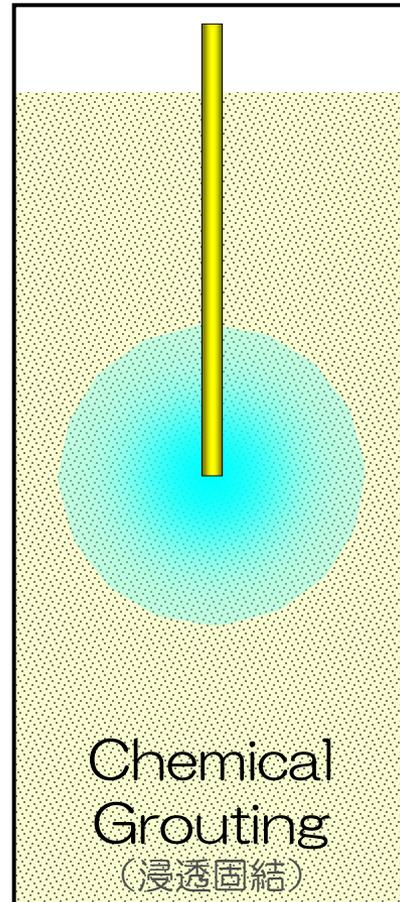
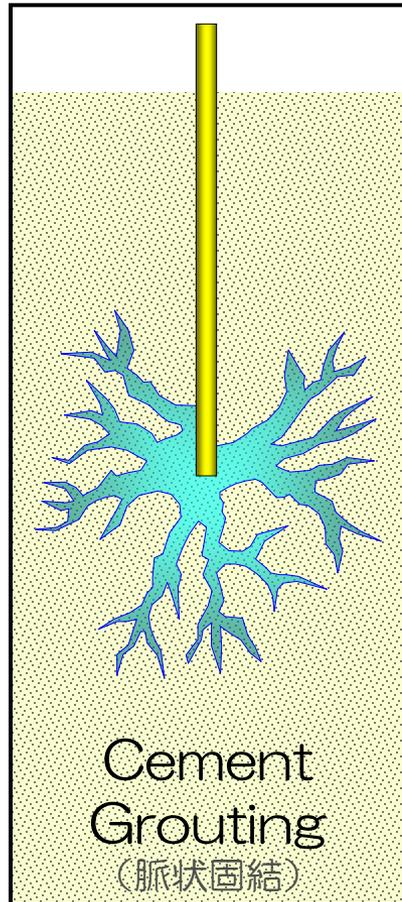
例えば、礫質土にする $u \downarrow$

$u \rightarrow 0$ に近づける



地震作用を軽減する
揺れによる変形を抑制
地盤に期待しない

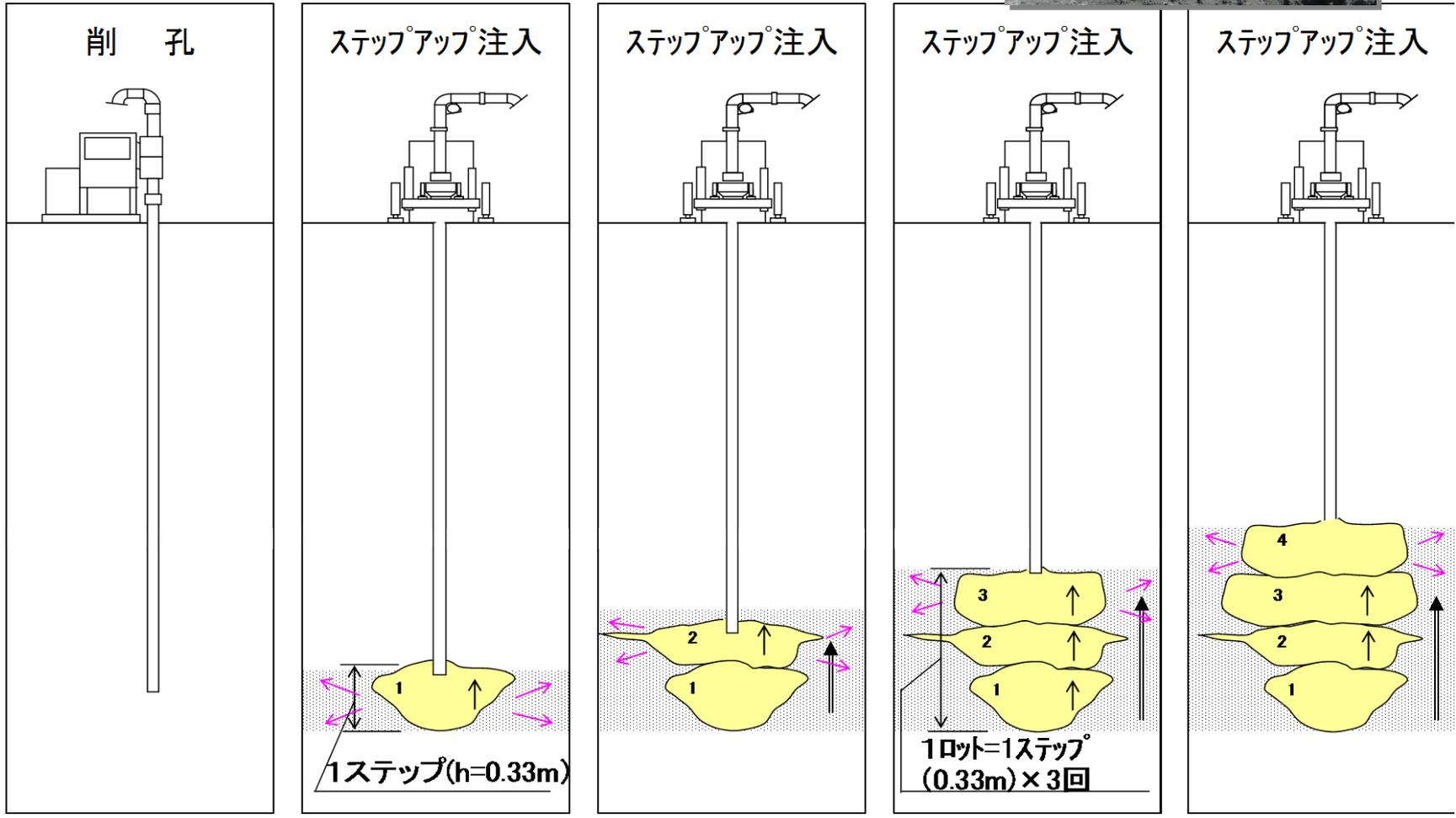
各種注入工法の注入形態比較



②注入材固結＝地盤改良

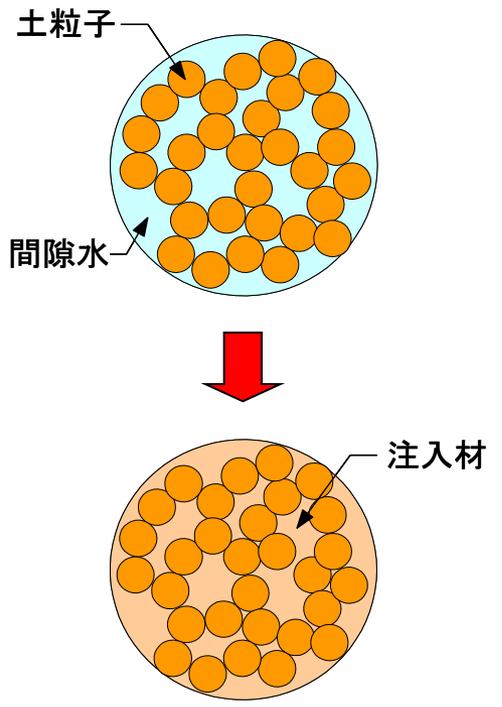
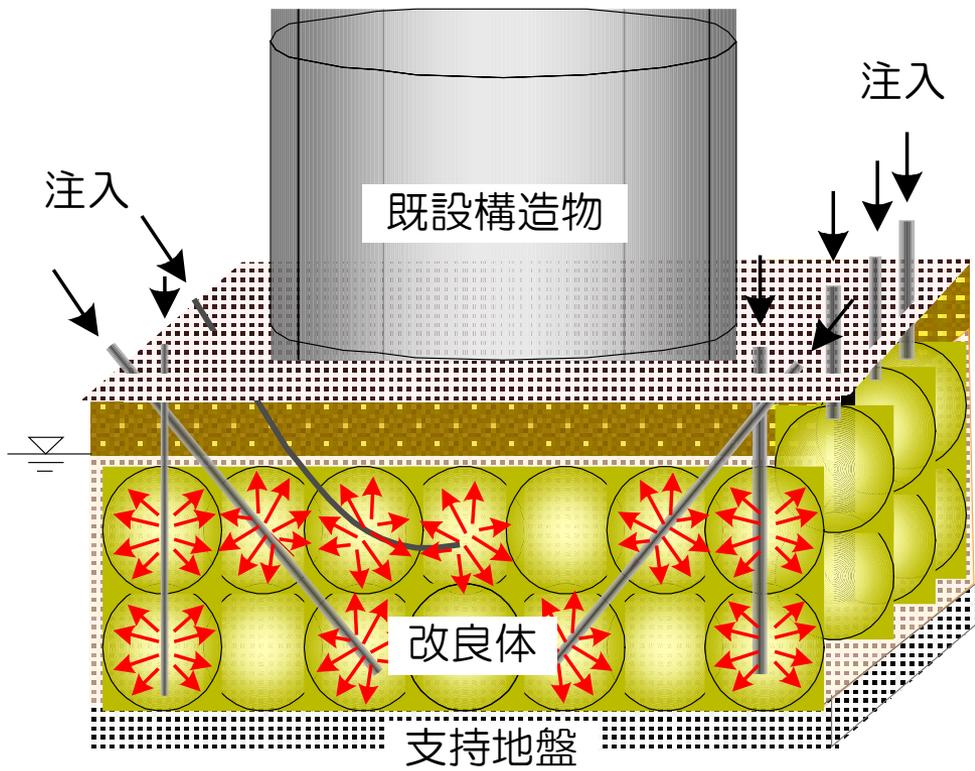
①地盤の密度増＝地盤改良

◆ 注入方法



薬液注入工法（浸透固化処理工法）

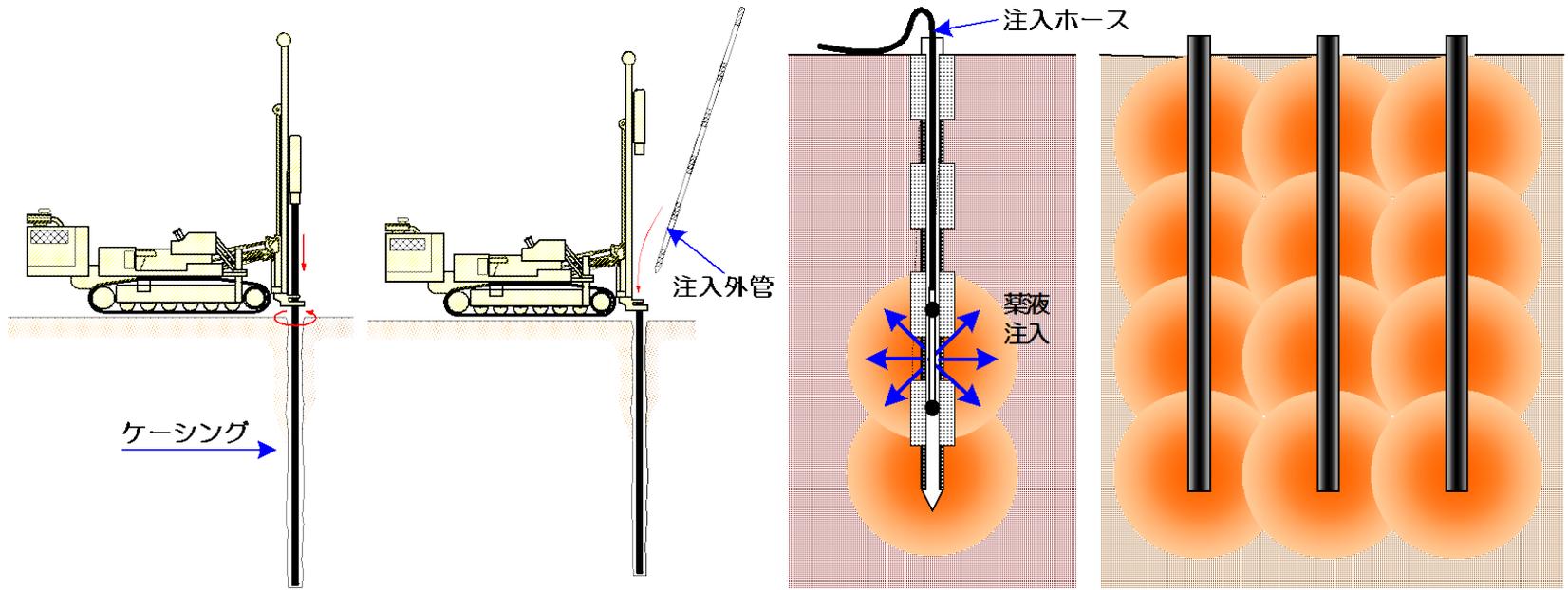
溶液型恒久薬液である超微粒子シリカを浸透注入し，砂質土中の間隙水をゼリー状の薬剤に置換することによって，地盤強度を増進する工法。



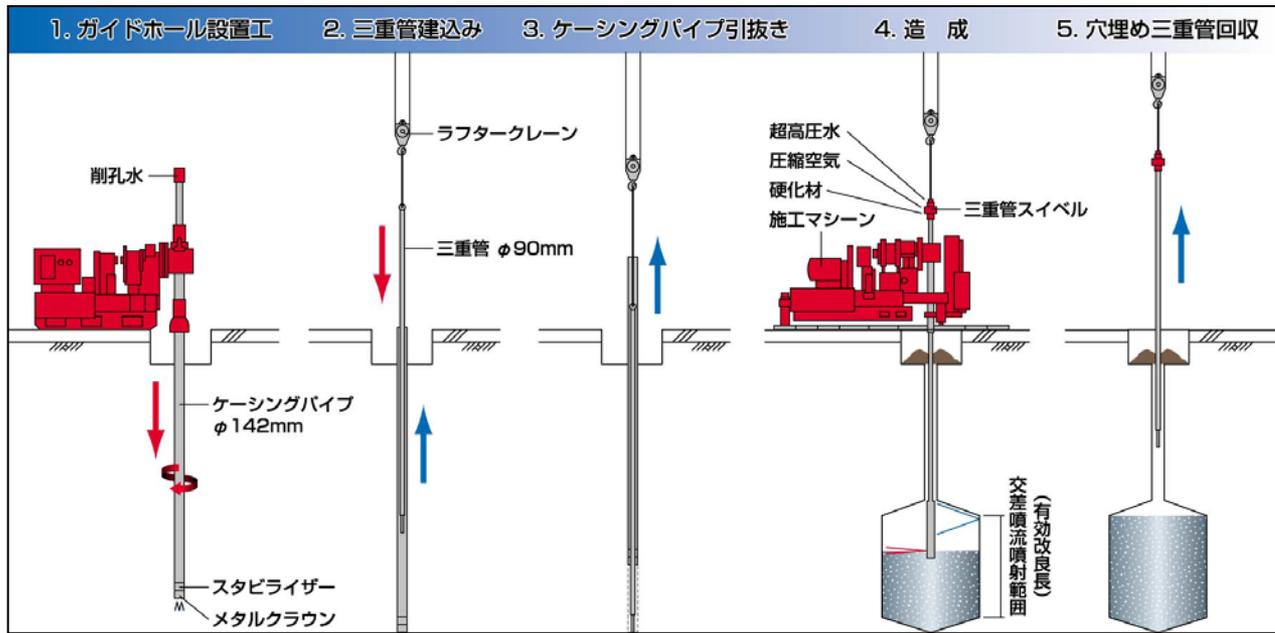
◆ 施工手順



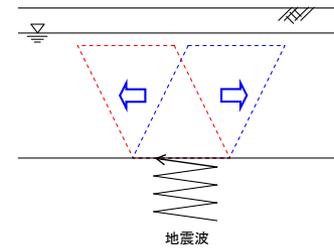
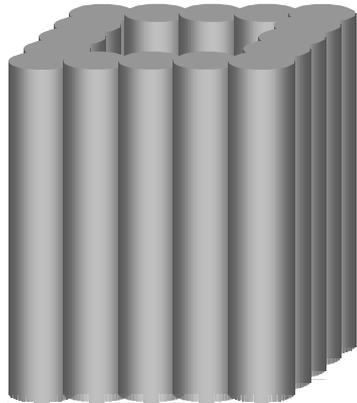
- 1 ボーリングマシンによる掘削
- 2 注入管の建て込み
- 3 薬液の注入
- 4 施工完了



高圧噴射攪拌工法

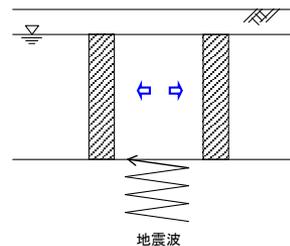


タイプ I (φ2.2~2.5m)



無対策地盤

→地震時のせん断変形により
間隙水圧が上昇(液状化)。



格子状改良地盤

→固化改良体により地盤を拘束する
ことでせん断変形・水圧の上昇を
防止する。

数百種類の液状化対策工法

改良原理は

密度の増大	固結	粒度の改良
飽和度低下	間隙水圧抑制・消散	
せん断変形抑制	構造的対策	

問題点は？

新規施設への適用であれば選択肢は多数

既存施設への適用

既存構造物を壊さない
狭隘な現場での施工性
事業継続したままの施工性

対策費用が高い

従来、公共工事を対象とした技術開発が先行

対策費用 数億円～数百億円

戸建て住宅

対策費用 数十万円～数百万円が限度か？

民間事業者の施設

対策よりも、製造設備が優先

見えない部分（地中）、本当に対策できたか疑問

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)
〔レジリエントな防災・減災機能の強化〕

大規模実証実験等に基づく 液状化対策技術の研究開発

研究責任者：(国研)港湾空港技術研究所 菅野 高弘

提案機関



総務省 消防庁
消防研究センター

 (国研) 土木研究所



(国研) 港湾空港技術研究所

社会基盤施設の防災・減災に関する ホームドクターと最先端医療技術を駆使するドクターの両方を目指します。

医学：検査	診断	治療
X線、内視鏡、超音波検査	治療実績、Evidence-based Medicine	体に優しい腹腔鏡手術、内視鏡手術、経過観察
SIP：調査	診断	対策
非破壊地盤調査技術	被災分析、大規模実証実験、数値解析等による 検証を経た診断、Evidence-based Design	大規模実証実験により効果が確認された 生活/生産活動を阻害しない対策工法

- M9クラスの巨大地震による液状化への備え **長継続時間地震動、余震、長周期地震動** 対応可能な判定法・対策工法を提案
- 生産が1日止まると損失は莫大、生活の質を落とすたくない、これまでは調査には数週間～数ヵ月、対策には数ヶ月～数年
液状化判定を数時間で、既存施設を使いながら調査・診断・対策 できる技術を提案
- 石油コンビナートには海中・地中・地表・空中に様々な設備(港湾、道路、橋梁、タンク、製造設備、建築物、ライフライン等)が混在
適用基準、指針が異なる、耐震を考えていない設備もある、大型の建設機械が入らない
事業者自らが診断を実施し、事前対策と事後復旧の判断支援をする診断システム、
様々な制約条件に対応した調査・対策技術を提案
- 石油コンビナートという厳しい条件での研究開発技術は、住宅や他の社会基盤施設への適用も可能
調査・診断・対策をパッケージ化：わかり易いガイドラインを提案



原料搬入



製品出荷(海上)



沈下・傾斜

③石油コンビナートの防災力向上に関する
技術開発(消防研)

製品製造設備



- 石油コンビナート全体を網羅
- ①港湾・埋立地盤
 - ②地中の基礎構造
 - ③危険物施設、製造施設



製品出荷(陸上)

①港湾施設および埋立地の液状化
(耐震)診断および対策技術の開発(港空研)

②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(土研)

大規模実証実験等に基づく液状化対策技術の研究開発

(国研)港湾空技術研究所

- ・非侵襲・低侵襲耐震診断
技術開発
- ・埋立地の地盤性状把握
- ・低変位液状化対策技術開発
- ・簡易耐震診断システム開発
- ・流出油・漂流物対策開発

(国研)土木研究所

- ・橋梁基礎の耐震性能評価
地震時挙動シミュレーション技術開発
- ・橋梁基礎の耐震対策技術開発

消防研究センター

- ・被害調査結果
- ・地震記録分析
- ・危険物貯蔵施設・防液堤等
対策技術開発
- ・製造施設

液状化診断・対策ガイドライン

府省連携による総合的な防災力向上を狙う

技術的アドバイス/現場調査
国際シンポジウム共催
学

共同研究

(国研)防災科学研究所

- ・E-Defense大規模震動実験
- ・地震記録提供(K-net等)

地方自治体
技術協力・現場提供
施工検討・現場調査
産

港湾および背後圏大震災による油類等危険物流失被害軽減技術の懇談会

代表:大阪大学
加藤教授 統合的コンビナート防災

東京工業大学 代表:高橋教授
液状化地盤中の橋梁基礎の解析

関東学院大学 代表:規矩教授
非侵襲・低侵襲耐震診断

高圧ガス保安協会

高度な技術的アドバイス

(一財)沿岸技術研究センター

埋立地に関する技術的アドバイス

(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会

鋼材を使った耐震補強技術

コンビナート事業者
建設コンサルタント
建設会社等

コンビナート：施設を使いながら適用可能な診断技術・対策技術・復旧計画策定ツール等を開発

ガイドライン提案（多くの社会基盤施設に適用可能）→**技術移転・社会実装**



内径7.6m 高さ5m
液高4.47m(水200トン)

タンクの地震時挙動を把握
浮き上がりが生じても漏液無しを確認



タンク本体の数値解析モデルの高精度化

実務では、
3次元構造物を2次元でモデル化し
液状化の数値解析することが多い



地震時にタンク本体(底板)と
タンク基礎地盤間の反力分布を把握



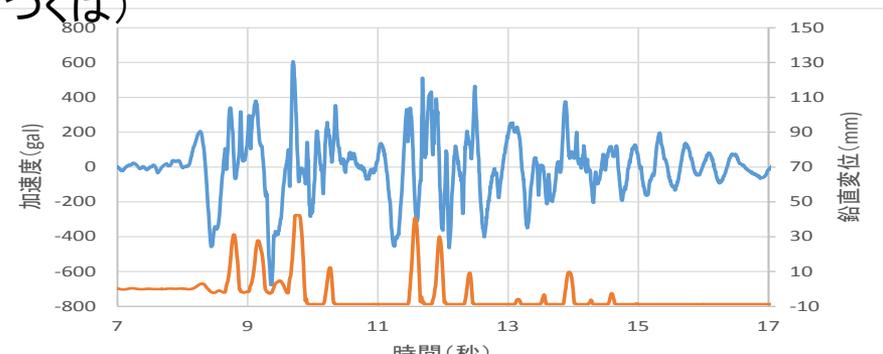
実務精度を担保した2次元液状化数値解析

平成28年1月 (国研)防災科学技術研究所(つくば)



底板

基礎



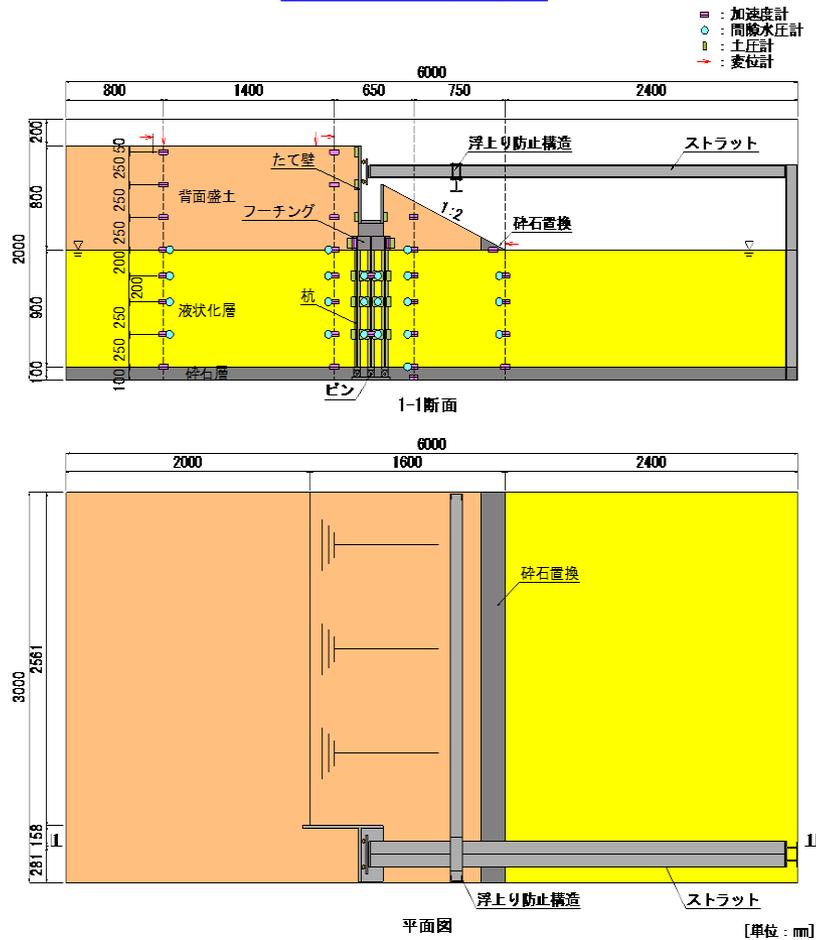
地震時に浮き上がった様子(拡大) 地震波(JMA神戸NS波)とタンク底板の浮き上がり

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 (国研) 土木研究所

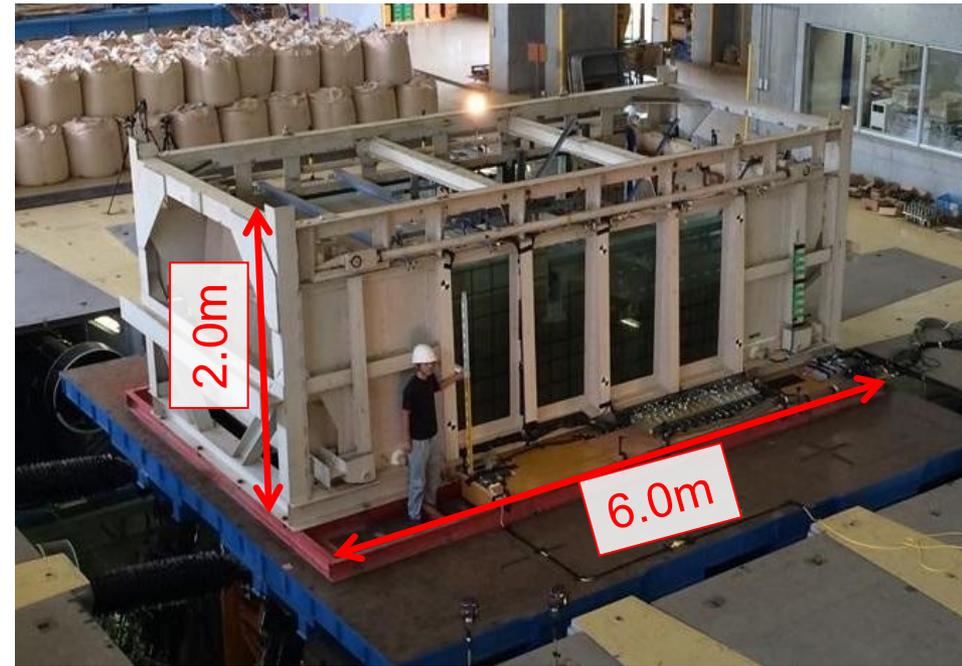
液状化地盤における橋台基礎の地震時挙動に関する振動台実験

液状化に起因する側方流動の影響を受ける橋台基礎を対象

模型の概要



大型剛土槽



ピエゾドライブ
コーン試験
液状化判定技術



直径36mmの金属コーン(先端に水圧センサーを装備)を打撃しながら地中に貫入していく
従来技術では1週間程度を要する
液状化判定を1打撃毎、

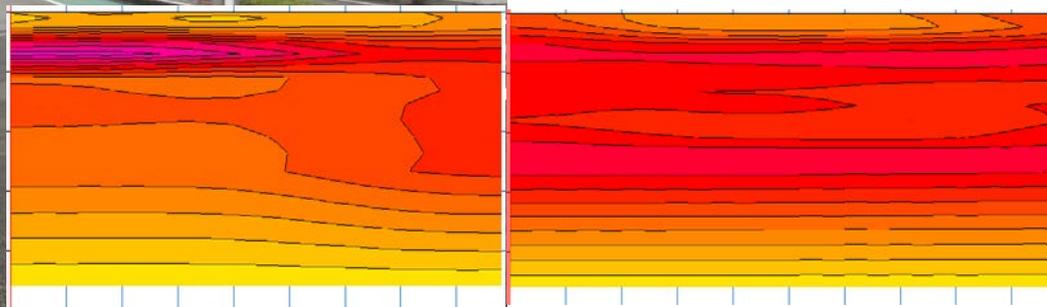
リアルタイムに液状化判定を実施
操業中の石油化学コンビナートで関東学院大と共同で地盤調査技術の適用性を確認

表面波探査による地盤内部の 弾性波速度計測

非破壊・非侵襲・迅速に
高い空間分解能で液状化し易い
地盤か判断する



高感度地震計を2mピッチで設置
カケヤを震源として地盤構成を推定する



操業中の石油化学コンビナートで関東学院大と共同で
地盤調査技術の適用性を確認(平成27年度実施)

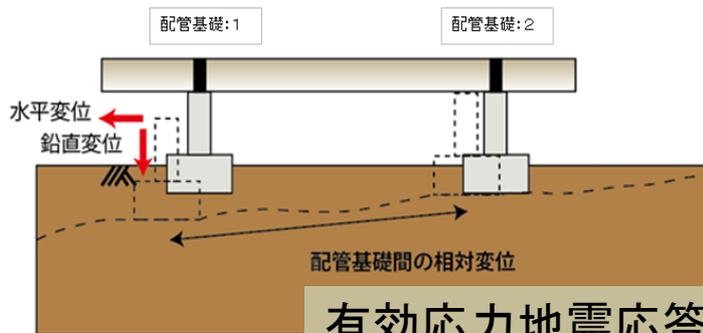
チャート式耐震診断システム

表計算ソフトに地盤条件等の必要項目を入力
地震時変状態が出力される

【配管基礎のチャート式耐震診断システム】

入力項目			
項目			備考
配管基礎1の前面護岸法線からの距離	25.00	m	
配管基礎2の前面護岸法線からの距離	40.00	m	
前面護岸情報	構造形式	控え直杭式矢板	フルダウンにより選択
	控え工距離	20.00	m 控え式矢板の場合入力が必要
	等価N値	15	自立式矢板、控え式矢板の場合必要
前面護岸の地震時水平変位	100	cm	沿岸構造物のチャート式耐震診断システム等より算出した値を入力

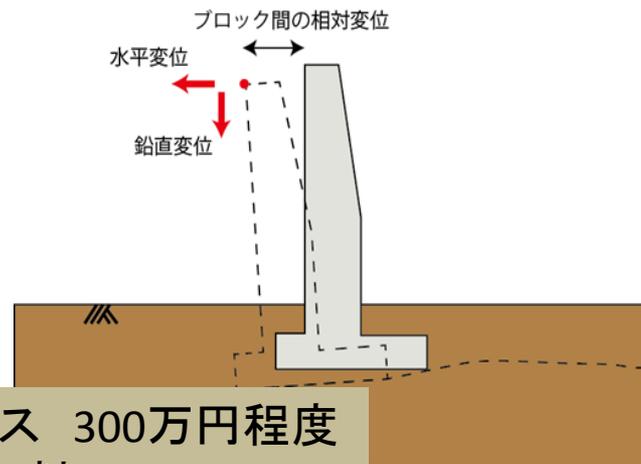
出力項目		
配管基礎1の水平変位量	62	cm
配管基礎1の鉛直変位量	35	cm
配管基礎2の水平変位量	30	cm
配管基礎2の鉛直変位量	18	cm
配管基礎間の相対変位量	37	cm



【防油堤のチャート式耐震診断システム】

入力項目			
項目			備考
前面護岸法線からの距離	10.00	m	
前面護岸情報	構造形式	傾斜型護岸	フルダウンにより選択
	控え工距離	20.00	m 控え式矢板の場合入力が必要
	等価N値	15	自立式矢板、控え式矢板の場合必要
前面護岸の地震時水平変位	53	cm	沿岸構造物のチャート式耐震診断システム等より算出した値を入力

防油堤の水平変位量	60	cm
防油堤の鉛直変位量	74	cm
ブロック間の相対変位	30	cm



有効応力地震応答解析 1ケース 300万円程度
チャート式耐震診断システム 無料

○地震被害が発生する毎、基準類の改定により耐震性向上が図られてきており、平成7年兵庫県南部地震クラスの地震への対応は進みつつありますが...

本研究開発により、過去の悲惨な被害を2度と繰り返しません。

□M9クラスの巨大地震による液状化への備え **長継続時間地震動、余震、長周期地震動** 対応可能な判定法・対策工法を提案

□生産が1日止まると損失は莫大、生活の質を落としたい、これまでは調査には数週間～数ヵ月、対策には数ヶ月～数年

このため、対策の優先順位が低く、進捗が遅れがち

液状化判定を数時間で、既存施設を使いながら調査・診断・対策 できる技術を提案

□石油コンビナートには海中・地中・地表・空中に様々な設備(港湾、道路、橋梁、タンク、製造設備、建築物、ライフライン等)が混在

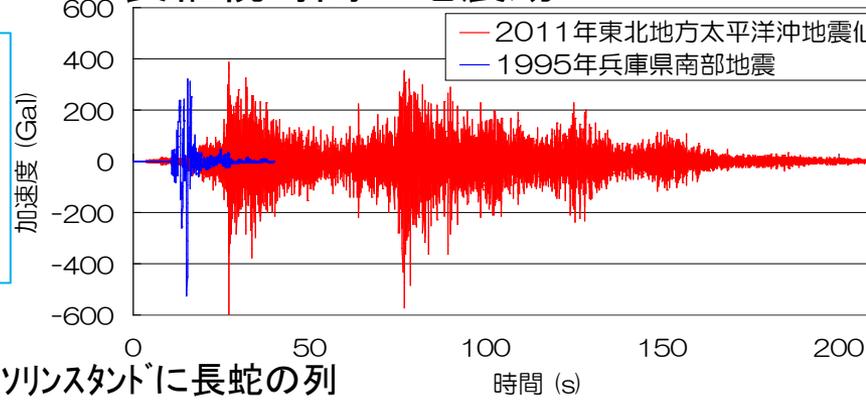
適用基準、指針が異なる、耐震を考えていない設備もある、大型の建設機械が入らない

事業者自らが診断を実施し、事前対策と事後復旧の判断支援をする診断システム、

様々な制約条件に対応した調査・対策技術を提案

□石油コンビナートという厳しい条件での研究開発技術は、住宅や他の社会基盤施設への適用も可能

長継続時間の地震動



調査・診断・対策を
パッケージ化
わかり易い
ガイドラインを提案

平成23年東北地方太平洋沖地震 ガソリンスタンドに長蛇の列

昭和39年新潟地震 大規模火災で避難生活



昭和39年新潟地震 使えなくなった埠頭



http://www.iwate-np.co.jp/311shinsai/sh201103_2/sh1103191.html

昭和39年新潟地震 落橋 復旧に5ヶ月以上

