「鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査技術」拡充に関する講習会
－屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針の拡充－
2021年10月28日 14:20～14:50

密な地盤に液状化が生じた地中構造物の三次元非線形解析

小委員会幹事

渡部　龍正（東電設計）

マニュアル拡充に向けた研究背景と目的

背景

・近年では基準地震動が大きくなってきたことで，密な地盤であっても液状化が生じることが想定される。

・河井らの実験的検討（技術資料Ⅶ-2005）では、地盤が液状化することが必ずしも構造物に厳しい結果になるとは限らないとしている。

・密な地盤が限定的に液状化する場合や三次元条件での構造物に対する影響は、十分に検討されていない。

既往の検討

地層境界でせん断力が大きくなることが懸念される。

目的

密な地盤が液状化する条件に着目し、構造物に及ぼす影響を評価する。また、三次元条件（構造形状、地盤物性等）が構造物の地震応答に与える影響評価と解析手法（有効応力、全応力）の適用性を確認する。

マニュアル・照査例・技術資料の改訂箇所

＜マニュアル＞　技術資料の検討結果に基づき修正加筆

1章1.3　解析に用いる地盤のモデル化

＜照査例＞　新規作成

Ⅳ. 三次元材料非線形の地震応答解析を用いた照査(2)

Ⅵ. 密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査例

＜技術資料＞　実験及び解析検討内容を追加・新規作成

Ⅳ 三次元鉄筋コンクリート製地中構造物の地震時挙動に関する実験的検討およびその解析

Ⅴ　地盤－構造物連成系の三次元非線形地震応答解析

Ⅵ　密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響

本講習会での主対象

＜技術資料＞ ⇒ **＜マニュアル＞** ⇒ **＜照査例＞** の順に主な内容を紹介

技術資料Ⅵでの検討内容

p.227～283

密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響に関する主な確認事項

・一部の層が液状化する場合や三次元構造条件に与える影響

・有効応力解析による影響評価と解析手法の適用性確認

Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響

1.はじめに
2.二次元RCボックスカルバートの遠心載荷実験シミュレーションに基づく検討
3.三次元RC立坑のせん断土槽振動実験シミュレーションに基づく検討
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討
⇒ 一部の液状化層がRC構造物（三次元形状）に与える影響を実験および解析により検討した。

液状化領域が構造物に及ぼす影響解析手法の適用性を確認

5.三次元実規模モデルでの検討
⇒ 実規模相当の構造物全体系モデルを用い，周辺地盤の液状化による影響および地盤改良による対策効果を確認した。

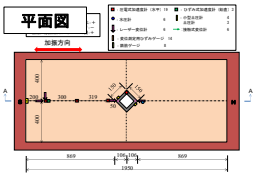
実規模モデルでの解析的検討

6.まとめ

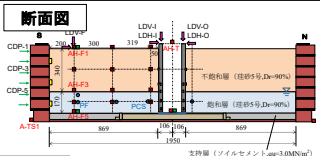
Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討（実験概要）

遠心実験の目的
- 密な地盤（一部液状化条件）の地震時挙動の把握
- RC立坑の非線形領域までの損傷・変形性状の把握
- 地盤・構造物連成系の三次元非線形有効応力解析手法の適用性を検証するための実験データの取得

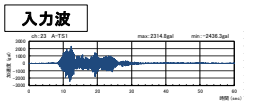
平面図



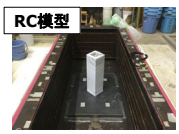
断面図



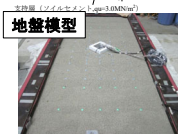
入力波



RC模型



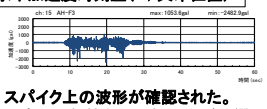
地盤模型



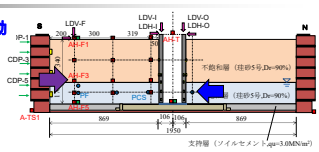
Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討（実験結果）

密な地盤（一部液状化条件）の地震時挙動

水平加速度時刻歴（⇨矢印位置）

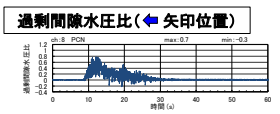


スパイク上の波形が確認された。
→密な地盤特有の剛性回復が影響。



計測位置図

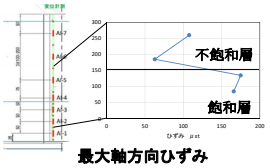
過剰間隙水圧比（⇦ 矢印位置）



➢ 最大でも0.5～0.6ほどで、明確な液状化には至らなかった。

→加振中に非排水条件とならなかった。

RC立坑の変形性状



最大軸方向ひずみ

→飽和層と不飽和層の境界でひずみの発生に違いがみられた。

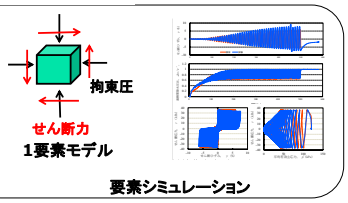
Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討(再現解析概要)

再現解析の流れ

液状化試験を実施
(液状化特性の把握)

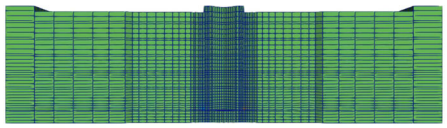
要素シミュレーションを実施
(地盤の挙動を再現する)

遠心実験の再現解析を実施
(全体系の挙動を再現する)



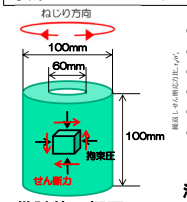
要素シミュレーション

変形+せん断ひずみ分布

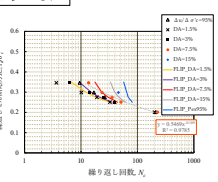


Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討(解析概要)

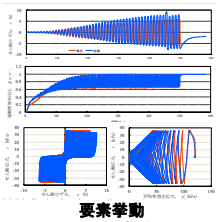
要素シミュレーション(珪砂5号)



供試体の概要



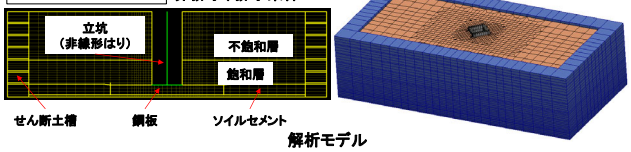
液状化強度試験フィッティング
(R_{L20}=0.31)



要素挙動
(せん断応力比0.3, 拘束圧120kPa)

二次元解析(FLIP) 非排水、排水条件

三次元解析(COM3) 排水条件

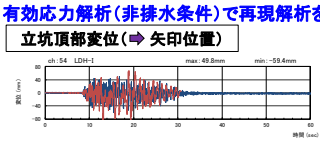


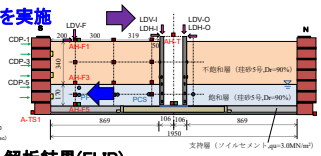
解析モデル

Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討 (FLIP_非排水条件)

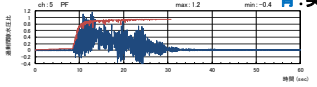
有効応力解析(非排水条件)で再現解析を実施

立坑頂部変位(➡ 矢印位置)





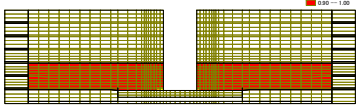
過剰間隙水圧比(⬅ 矢印位置)



赤:解析結果(FLIP)
青:実験結果

計測位置図

最大過剰間隙水圧比分布



構造物の変位応答

・実験結果よりも安全側の評価となった。
・地盤の軟化により、周期が長くなった。

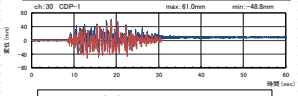
地盤の応答(過剰間隙水圧比)

・実験結果に比べて高くなった。(地盤の軟化を過大に見込んでいる)。

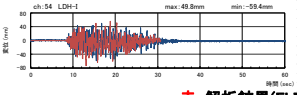
Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討 (FLIP_排水条件)

加振中に排水が確認されたため、有効応力解析(排水条件)で再現解析を実施

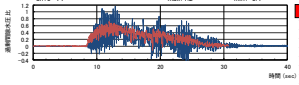
せん断土槽頂部変位(➡ 矢印位置)



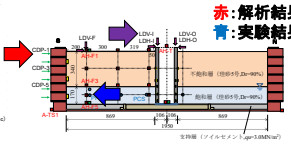
立坑頂部変位(➡ 矢印位置)



過剰間隙水圧比(⬅ 矢印位置)

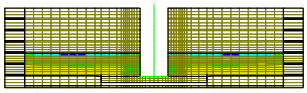


赤:解析結果(FLIP)
青:実験結果



計測位置図

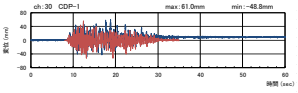
最大過剰間隙水圧比分布



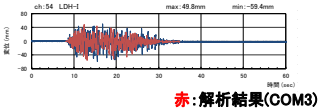
変位及び過剰間隙水圧比は実験結果を概ね再現できた。
飽和層の過剰間隙水圧比は1.0に達しておらず、加振中の排水により液状化には至らなかったと考えられる。

Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
4.三次元RC立坑の遠心載荷実験に基づく検討 (COM3_排水条件)

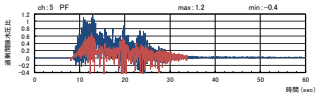
せん断土槽頂部変位(➡ 矢印位置)



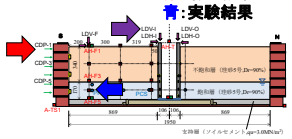
立坑頂部変位(➡ 矢印位置)



過剰間隙水圧比(⬅ 矢印位置)

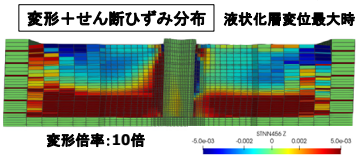


赤:解析結果(COM3)
青:実験結果



計測位置図

変形+せん断ひずみ分布 液状化層変位最大時

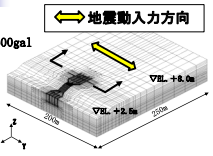


変位および過剰間隙水圧比は実験結果を概ね再現できた。
過剰間隙水圧比の時刻歴において負圧も確認された。

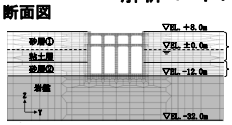
Ⅵ. 密な地盤の液状化が構造物に及ぼす影響
5.三次元実規模モデルでの検討

解析コード:COM3

地震動
最大振幅:600gal



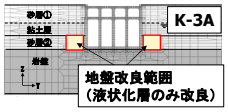
断面図

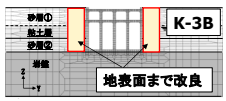


解析ケース

解析ケース	地盤条件の変更	解析方法
K-0	-	全応力(基本ケース)
K-1	砂層②のみ液状化	全応力(液状化考慮)
K-2	砂層②のみ液状化	有効応力
K-3	液状化+改良体	有効応力

地盤改良ケース(K-3)



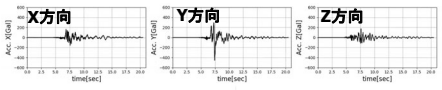


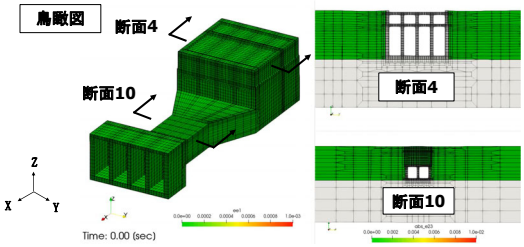
※改良範囲の異なる2ケース実施

検討項目
・一部の液状化層が構造物に与える影響
・三次元形状効果(構造物)
・解析手法(全応力・有効応力)による影響
・改良体による液状化対策効果

取水ピットの動的解析検討（液状化影響を考慮）

留萌波





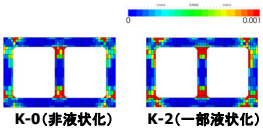
第1主ひずみ分布図
（変形倍率25倍）

せん断ひずみ分布図
（変形倍率10倍）

変形＋第1主ひずみ・せん断ひずみ分布図

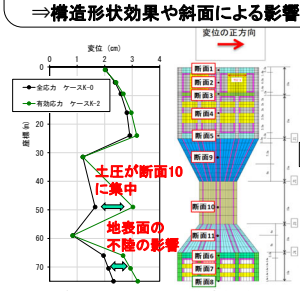
一部の液状化層が構造物に与える影響
三次元形状効果（構造物）

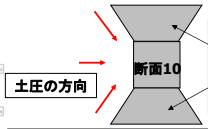
K-0とK-2の比較（液状化の影響）
断面10、断面6～8では一部液状化の方が構造物変位、ひずみが大きくなった。
⇒構造形状効果や斜面による影響



K-0（非液状化）　K-2（一部液状化）

断面10の最小第1主ひずみ分布





前後のブロックの構造変位は一部液状化の影響は小さかった。

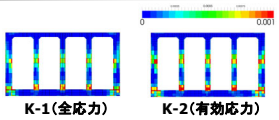
構造物形状の影響により、土圧・残留変位が断面10に集中しやすい

各ケースの最大構造物変位

構造形状効果による影響

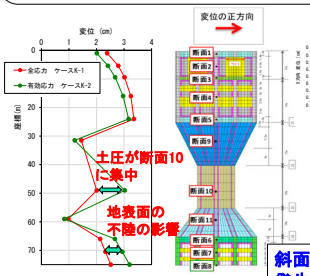
解析手法（全応力・有効応力）による影響

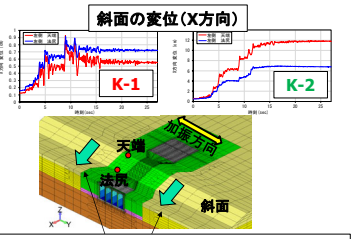
K-1とK-2の比較
断面10、断面6～8では有効応力解析の方が構造物変位、ひずみが大きくなった。
⇒斜面の残留変位の影響



K-1（全応力）　K-2（有効応力）

断面7の最小第1主ひずみ分布



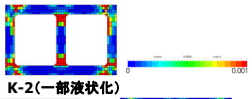


各ケースの最大構造物変位

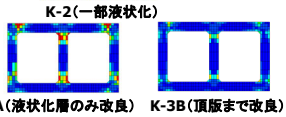
斜面の影響で断面6～8に向かって残留変位が発生する（全応力では評価が困難）

改良体による液状化対策効果

K-2とK-3A・K-3Bの比較
すべての断面で構造物の変位抑制効果が確認された。改良範囲が大きいほど改良効果は大きかった。

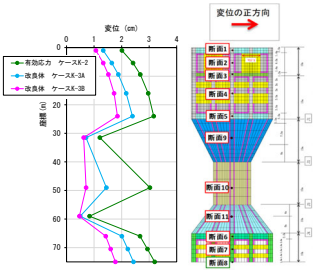


K-2（一部液状化）



K-3A（液状化層のみ改良）　K-3B（頂版まで改良）

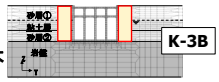
断面10の最小第1主ひずみ分布



各ケースの最大構造物変位

改良体範囲：小
抑制効果：小

改良体範囲：大
抑制効果：大



マニュアルの改訂事項（第1章1.3）

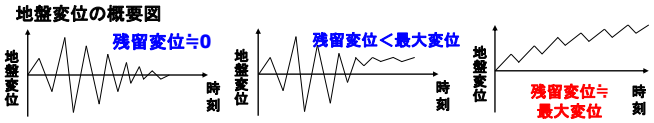
1.3　解析に用いる地盤のモデル化
1.3.1 モデル化の基本方針
1.3.2 有効応力モデル
(1) モデル化の概要
(2) 飽和地盤の特性
(3) 飽和地盤に埋設された地中構造物の挙動
1.3.3 全応力モデル
(1) モデル化の概要
(2) 全応力モデルの基本構成
(3) 物性試験のフィッティング精度を向上する方法
(4) 地盤物性の拘束圧依存性
(5) 鉛直動を動的に入力する場合の注意点
(6) 側壁に作用する土圧に関する注意点

- 全応力解析と有効応力解析の構成則の違いに関する記述を拡充
  → 一覧表で整理した.
- 全応力解析の適用範囲に関する留意事項を追記
- 有効応力解析（排水条件）について記載

全応力解析の適用範囲（改訂事項1）

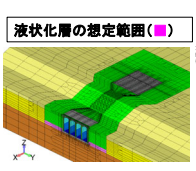
地震中のせん断変形よりも，主に残留変形による影響が卓越する場合には，残留変形の影響を考慮できる適切なモデルを使用しなければならない。

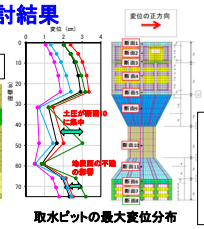
地盤変位の概要図



記述に関連する検討結果

液状化層の想定範囲（■）





取水ピットの最大変位分布

液状化範囲が限定的な場合
全応力 ≒ 有効応力解析

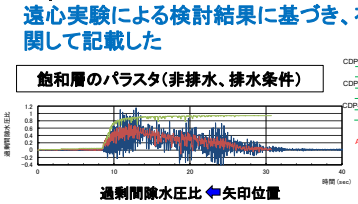
形状効果や斜面による影響
全応力 ＜ 有効応力解析

全応力解析を適用する場合の留意が必要となる条件
斜面や構造形状効果等による影響で液状化層の残留変位が卓越する場合

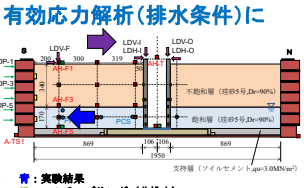
有効応力解析（排水条件）の記載（改訂事項2）

遠心実験による検討結果に基づき、有効応力解析（排水条件）に関して記載した

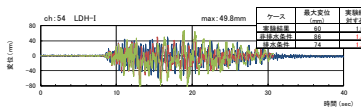
飽和層のパラスタ（非排水、排水条件）



過剰間隙水圧比 ⇐矢印位置



青：実験結果
緑：マルチスプリング（非排水）
赤：カクテルグラス（排水）



ケース	最大変位 (mm)	実験結果に対する比率
実験結果	60	1.00
非排水条件	88	1.47
排水条件	74	1.23

RC立坑頂部水平変位 ⇒矢印位置

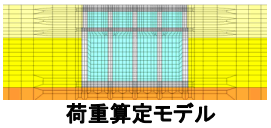
- 非排水条件の場合、本検討においては地盤の軟化を過大に評価している。
- RC立坑の変位は、最大値で非排水条件は実験結果の4割程度大きくなり、保守的な評価となった。

遠心実験の結果から、有効応力解析（排水条件）で評価した方が，実現象と整合的で合理的な評価となる場合がある。

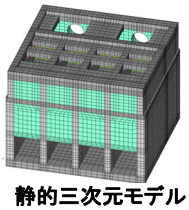
照査例VIの記載内容

p.303～321

VI.密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査例（取水ピット）・構造物全体系での照査を実施（有効応力解析から得られた荷重を用いる）

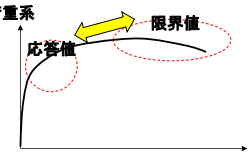


荷重算定モデル



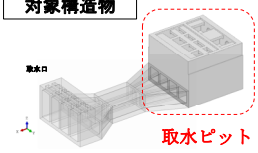
静的三次元モデル

プッシュオーバー解析



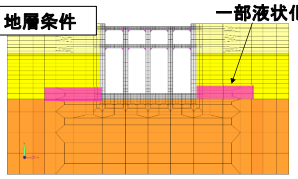
VI. 密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査例 照査条件

対象構造物

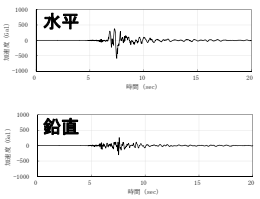


取水ピット

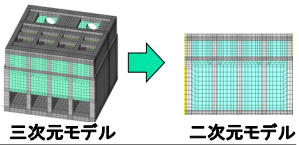
地層条件



入力波　留萌波：水平・鉛直入力



構造条件



三次元モデル　二次元モデル

照査例では，三次元モデル（線形）を利用して等価剛性を設定

VI. 密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査例 基本的な考え方

照査の流れ

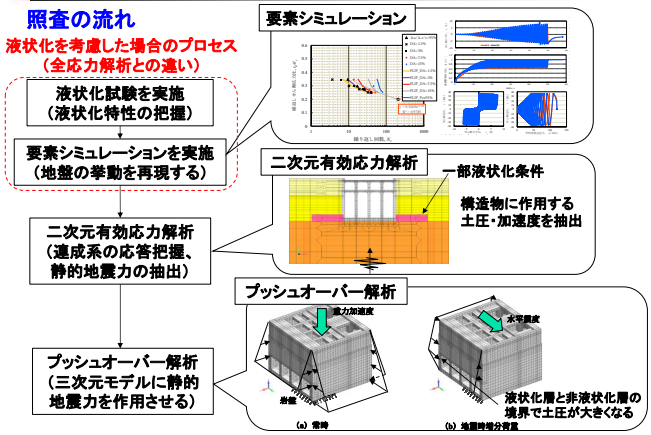
液状化を考慮した場合のプロセス（全応力解析との違い）

液状化試験を実施（液状化特性の把握）

要素シミュレーションを実施（地盤の挙動を再現する）

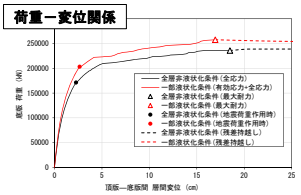
二次元有効応力解析（連成系の応答把握、静的地震力の抽出）

プッシュオーバー解析（三次元モデルに静的地震力を作用させる）



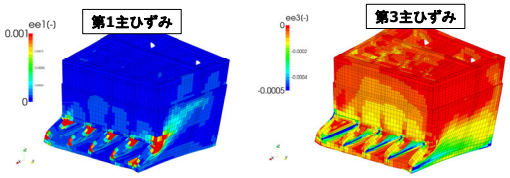
VI. 密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査例 プッシュオーバー解析結果

荷重－変位関係



全層非液状化条件よりも地震荷重作用時は変形・荷重が大きい傾向（地盤－構造物連成系の三次元解析結果と整合的）

全層非液状化条件よりも耐度は小さくなったものの，全体系の照査としては満足した．



地震荷重時の主ひずみ分布図（変形倍率：200倍）

まとめ

◆ 密な地盤が限定的に軟化・液状化する場合に対して，地盤・構造連成系の遠心実験と三次元非線形地震応答解析手法の適用性の検証を行った。

- ✓ 不飽和層と飽和層の境界部において，構造物にせん断変形が生じることが確認された。
- ✓ 有効応力解析（排水条件）を行い，密な地盤に埋設されたRC立坑および地盤の挙動を概ね再現することができた。

◆ 実規模構造物を対象にし、液状化を考慮した場合の三次元非線形地震応答解析ならびに照査法を示した。

- ✓ 全応力解析の適用性を実規模の三次元地震応答解析で確認した。
- ✓ 地盤が液状化する場合の構造物の照査法を有効応力解析を用いて示した。