

複雑な地盤条件に対する効果的な 液状化対策の検討について

藤倉 永大¹

¹近畿地方整備局 大阪港湾・空港整備事務所 工務課（〒552-0007大阪府大阪市港区弁天1-2-1-1500号）

大阪港夢洲コンテナターミナル耐震強化岸壁に附帯する荷さばき地の液状化対策は、「コンテナ蔵置エリアの平坦性」を要求性能とした設計・施工を実施してきているところである。しかし、本工事施工区域においては、旧石積護岸や広範囲に固化体の層が存在するなど複雑な埋立履歴の地盤構成となっている上、液状化層の中に想定されていなかった転石が多数混入していることが確認され、液状化対象層全体の対策には多くのコストが必要となることが判明した。そこで、平坦性確保の観点から性能規定値を相対沈下量で規定し、「モンテカルロシミュレーション」により相対沈下量を推定した。その結果、大幅なコスト縮減が図れる見込みとなった。

キーワード 液状化対策，コスト縮減，モンテカルロシミュレーション，コンテナターミナル

1. はじめに

大阪港は平成23年4月の港湾法施行令の改正により、「国際戦略港湾」として位置付けられ、大阪港夢洲コンテナターミナル耐震強化岸壁は長距離の国際海上コンテナ運送に係る国際海上貨物輸送網の拠点として機能するために必要な係留施設（水深16m以上の耐震強化岸壁）として整備を進めている。本検討の対象施設である夢洲コンテナターミナル耐震強化岸壁に附帯する荷さばき地（写真-1，以下「当該荷さばき地」とする）は、前面岸壁と一体となって機能を発揮すべく、地震後においても荷さばき地として使用可能な耐震性を有することが求められる施設である。

当該荷さばき地では、2013年度（平成25年度）より耐

震強化工事を進めているが、対象となる埋立地は複雑な埋立履歴を持つため、その地盤特性を耐震性評価へ適切に反映する必要があることが課題となっていた。本報文は、その複雑な履歴を持つ埋立地盤に対する液状化の評価・対策検討において、相対沈下量を定量的に算定可能であるモンテカルロシミュレーションを適用した事例を報告するものである。

2. 荷さばき地の地盤特性

当該荷さばき地では、平成25年度以降20地点で土質調査、液状化予測・判定を実施した（図-1）。その結果、厚さ20m程度で分布する埋立土のうち多くが液状化すると判定されたため、具体的な対策工法の選定作業および対策工事を進めてきた。

しかし、液状化対策工事施工区域においては、旧護岸や旧工事用道路と想定される固化改良体を始めとした改良体混り砂礫が広範囲に存在するなど複雑な埋立履歴の地盤構成（図-1）となっていることに加え、設計時では想定されなかった転石が液状化層中に多数混入していることが確認されるなど（写真-2），埋立材料自体のばらつきが大きいことが明らかとなった。また、当該荷さばき地内にはPCBを含有する浚渫土（以下、PCB含有土）の処分地も存在しており、PCB含有土自体は細粒分含有率が60～80%かつ粘土分含有量も20%以上であることから液状化は生じないと想定されるが（図-2），地震時には



写真-1 北港南地区 荷さばき地 全景

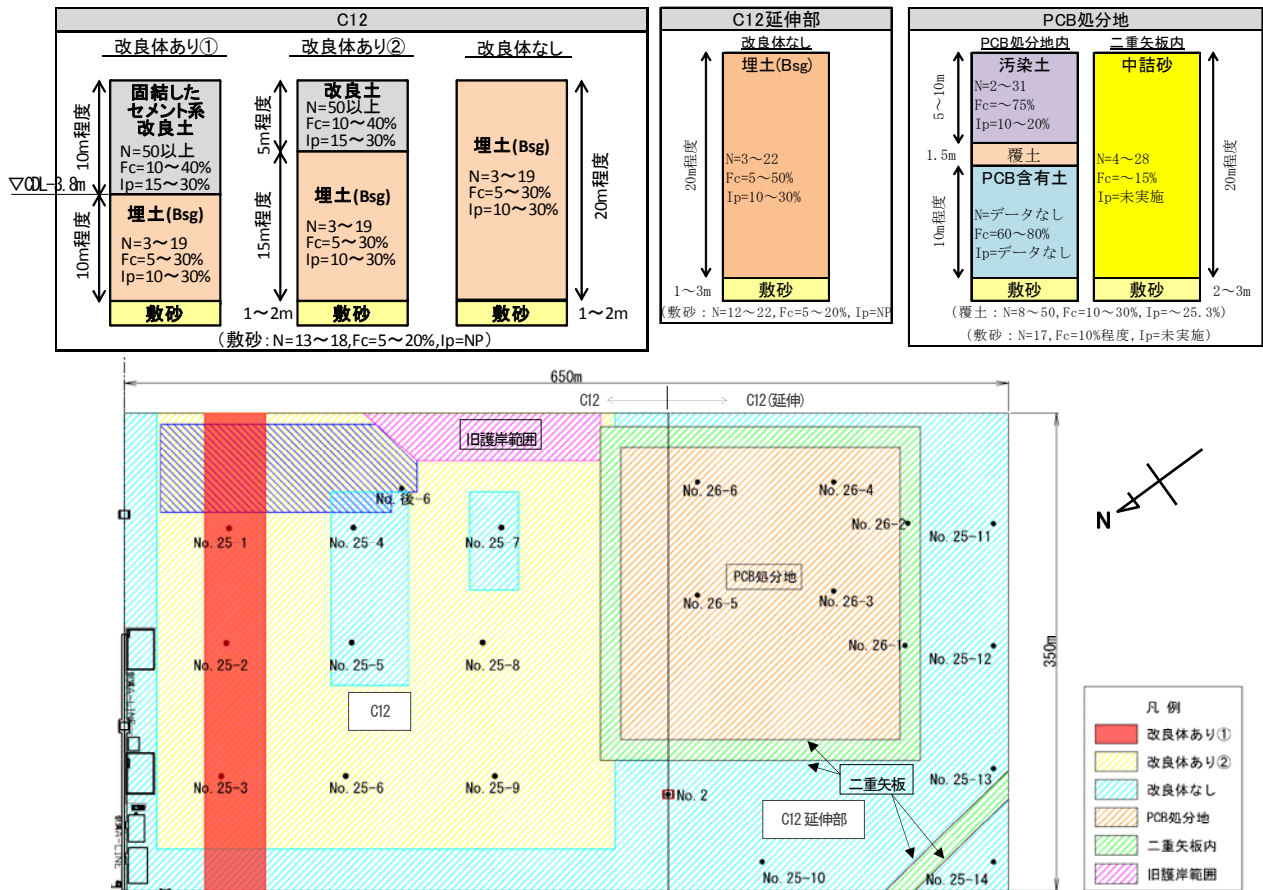


図-1 既往土質調査・液状化判定位置



写真-2 転石状況

周辺の液状化地盤との相対沈下が生じることが想定されるため、荷さばき地としての使用性を確保し難いことも明らかとなった。

3. 荷さばき地の要求性能

当該荷さばき地は、(特定) 幹線貨物輸送対応の耐震強化施設であるC-10～C-12岸壁と一体となって機能を発揮する必要がある荷さばき地であるため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(H19)¹⁾」(以下、「港湾の基準」とする)より、「レベル2地震動等の作用による損傷等が、軽微な修復によるレベル2地震動の作用後に当該荷さばき地に必要とされる機能の回復に影響を及ぼさないこと」を要求性能とした。

「港湾の基準」では、現時点で荷さばき地における定量的な許容限界値は設定されていない。他方で当該荷さばき地は、(特定) 幹線貨物輸送対応の岸壁と一体となって機能発揮する必要があることから、港湾の基準上の要求性能は「修復性」が対象となるが、レベル2地震動作用後の荷さばき地の状況を想定した場合、被害を受けたコンテナの撤去移動等を前提とした速やかな修復作業は困難である。そのため、当該荷さばき地では、要求性

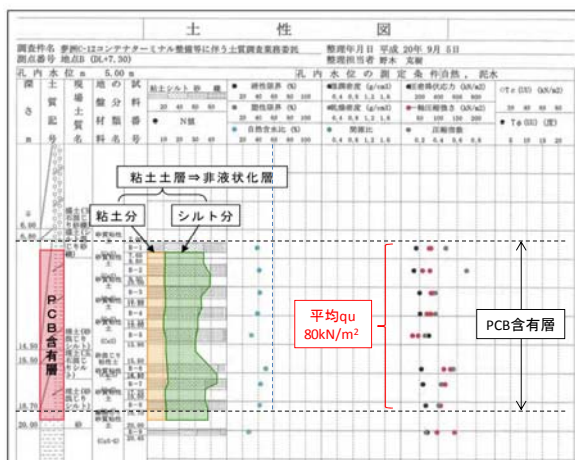


図-2 PCB含有土の土性図

能を「使用性」と同程度とし、荷さばき地機能としてのトッププライオリティである「コンテナ蔵置エリアの平坦性の確保」を性能規定として設定した。

なお、本検討では「平坦性」の確保ということに重点を置き、岸壁背後エプロンにおける使用性を対象とした許容被害「エプロン上の段差；0.03～0.1m未満」を参考として、設計限界値は相対沈下量10cmとして設定した。

4. 液状化による相対沈下量の推定

(1) 沈下量把握手法

改良体および改良体混じり砂礫（ $N \geq 50$ 程度）が散在するC12において、液状化に伴う沈下量を面的に把握し、対策工の必要性や改良範囲・深度等の諸元を設定することを目的とし、面的な沈下量を推定する。

面的な沈下量を推定する手法として、本検討では空港埋立地の広範囲の圧密沈下予測²⁾や液状化による不同沈下予測³⁾に用いられる「モンテカルロシミュレーション」により地盤材料のばらつきを確率変数として考慮する方法を適用した。この手法により液状化による沈下量を算出するには「液状化層厚」および「体積ひずみ」

（過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の体積収縮）が必要となる。本検討では「液状化層厚」を三次元土層モデルにより設定し、各層の「体積ひずみ」をモンテカルロ法における変数とした。モンテカルロシミュレーションの概要は付録に示す。

(2) 三次元土層モデルに基づく液状化層厚の設定

当該荷さばき地の既往土質調査及び表面波探査位置平面図を図-4に示す。三次元土層モデルはこれらの調査結果に基づき、以下の手順で作成した。

- ①既往調査ボーリングから、自然地盤と敷砂の境界を面的に推定
- ②同様に敷砂と埋土層（Bsg層）の境界を面的に推定
- ③改良体および改良体混じり砂礫層の分布をボーリングと表面波探査結果から推定
- ④構造物周りの土層（基礎）をモデル化

作成した三次元土層モデルの例を図-5に示す。作成した三次元土層モデルに基づき、図-6に示すメッシュ毎に液状化層厚を整理した（図-7）。なお三次元土層モデルの作成には二重鋼矢板や旧護岸等の構造物周りの状況を反映させた（図-8）。

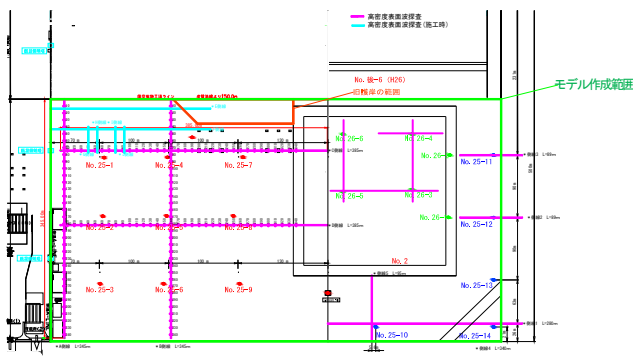


図-4 既往土質調査及び表面波探査位置図

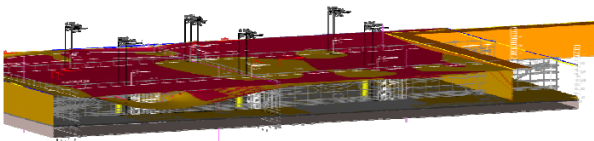


図-5 三次元土層モデルの例

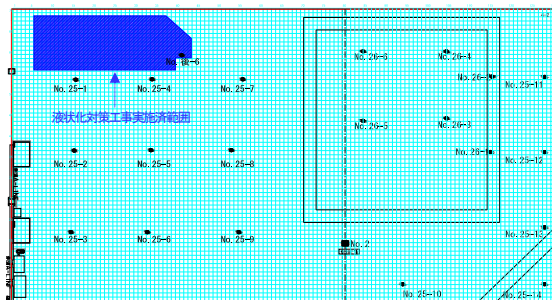


図-6 平面メッシュ図 (5m×5m)

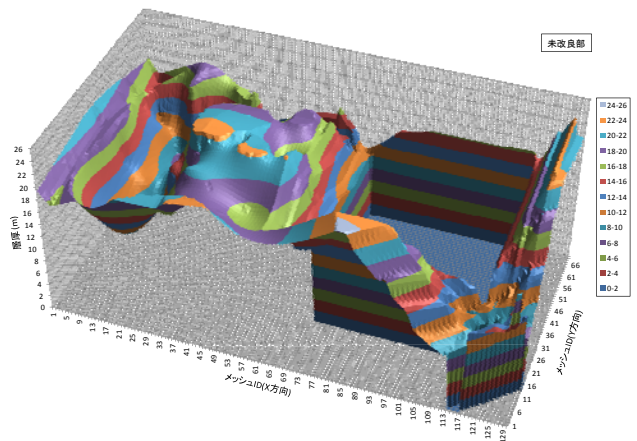


図-7 Bsg層の層厚分布

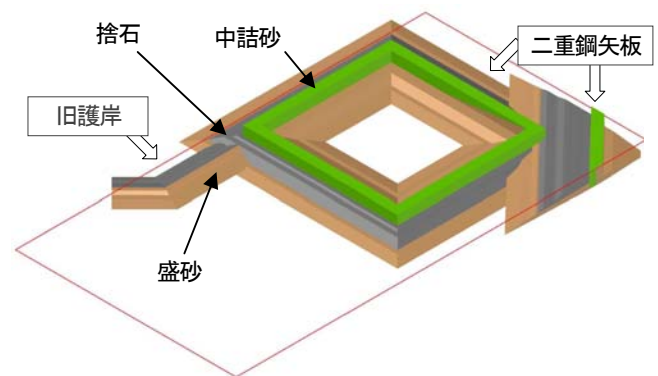


図-8 構造物周りの土層モデル

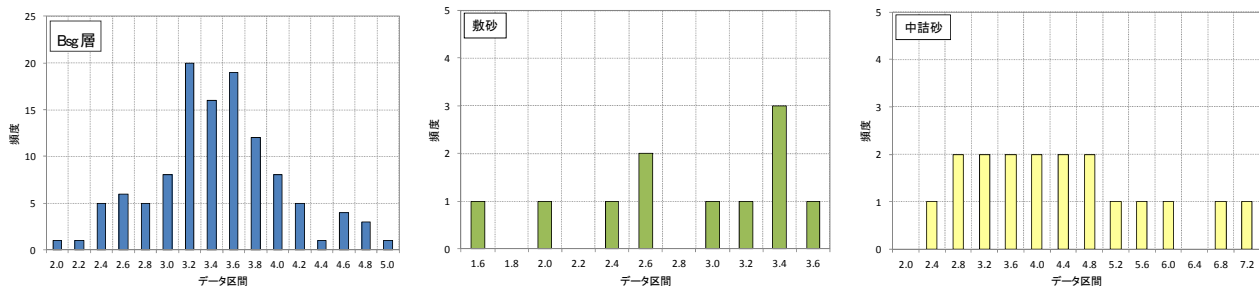


図-10 体積ひずみのヒストグラム (左: Bsg層, 中: 敷砂, 右: 中詰砂)

表-1 液状化対象層の体積ひずみ測定結果

土層	データ数	最小値	最大値	平均値	標準偏差
Bsg (C12)	92	1.97	4.89	3.336	0.575
Bsg (延伸部)	23	2.04	4.77	3.394	0.626
Bsg (C12+延伸部)	115	1.97	4.89	3.348	0.583
敷砂 (延伸部)	11	1.59	3.48	2.740	0.640
中詰砂	18	2.25	7.09	4.238	1.380

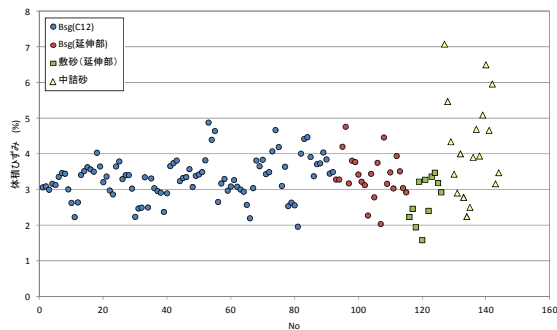


図-9 液状化対象層の体積ひずみ測定結果

(3)液状化層で想定される体積ひずみ量の設定

既往土質調査における液状化対象層の体積ひずみ測定結果を表-1および図-9に示す。また、各土層のヒストグラムを図-10に示す。図-10に示すヒストグラムから、Bsg層の体積ひずみは概ね正規分布の形状をしている事が判るが、敷砂層は試験数が11データしかなく、ヒストグラムでは正規分布となっていない。また、中詰砂についてもBsg層のように明確な正規分布とはなっていないが、平均値付近に頻度が集中している傾向が見られるため、データ数が増えれば正規分布となる可能性が高い。以上を踏まえ、各土層の体積ひずみを以下のように設定した。

- ・Bsg層：正規分布を仮定し平均±標準偏差でモデル化
- ・敷砂層：沈下量が大きくなるよう最大値でモデル化
- ・中詰砂：正規分布を仮定し平均±標準偏差でモデル化

(4)計算条件

モンテカルロシミュレーションでは、各要素の確率変数（本検討では体積ひずみ）が相互に相関を有することが前提となるが、当該荷さばき地の地盤は埋立土であることから、自然地盤と異なり地盤特性の相関性は大きくないものと考え、短めの距離（5m）を相関距離として採用し、また試行回数は100回とした。

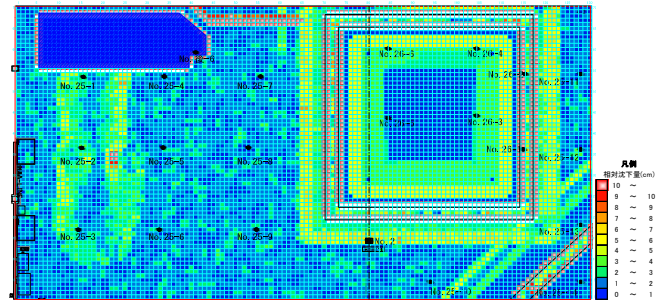


図-11 相対沈下量平面分布 (対策無)

(5)検討結果

モンテカルロシミュレーションによる相対沈下量の平面分布を図-11に示す。なお、各メッシュの相対沈下量は隣接メッシュ（上下左右4方向）との最大値とした。

これより、過年度の液状化対策工事実施済範囲周辺、旧護岸位置及びPCB処分地周囲の二重矢板前後、さらに固化体が局所的に厚く分布している地点等で設計限界値である相対沈下量10cmを上回ることが明らかとなった。一方、相対沈下量10cmを下回る範囲においても相対沈下のばらつきが広範囲に分布し、かつ固化体との境界部での相対沈下の発生が顕著となっている。これらの相対沈下の発生は、地震後の荷さばき地の早期供用に対して大きなリスクとなることから、これらの相対沈下を抑制して平坦性を確保するための液状化対策が必要であると判断した。

5. 液状化対策範囲の設定

前述したとおり、当該荷さばき地は固結した改良体が局所的に分布する地盤構成となっている。そのため、改良体の有無により液状化層厚が大きく異なり、液状化層厚の差異によって不陸が生じる可能性が高い。当該荷さばき地の供用においては、コンテナクレーン及び車両の走行性の確保やコンテナが崩れない程度の変形に留める必要があるため、地震後にも不陸を抑制し、平坦性を確保する必要がある。

平坦性を確保するために最適な方法は、液状化の発生

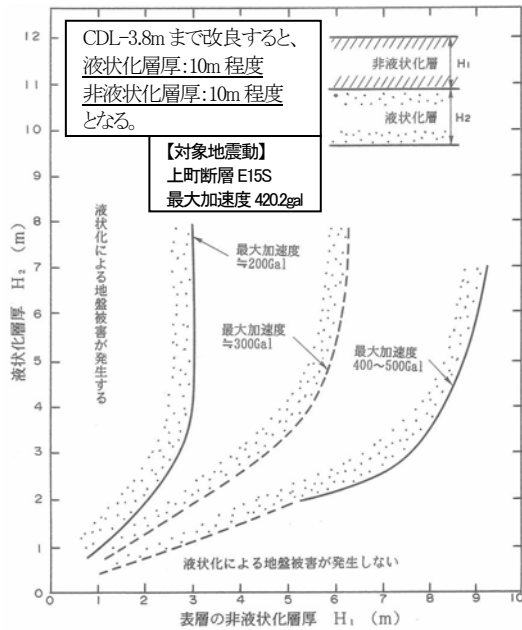
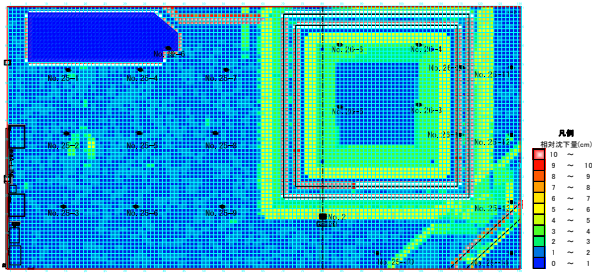
図-12 液状化による地盤被害が発生する条件⁴⁾

図-13 相対沈下量平面分布（一律CDL-3.8m対策）

が想定される全層を対象として液状化対策を行い、液状化の発生そのものを生じさせないことである。しかし、前述した現場条件を踏まえると、全層を対象とした液状化対策の実施は、多大なコストと時間を要するため現実的でない。そこで液状化が発生しても平坦性を確保するという観点から、不陸を抑制するための合理的な液状化対策範囲を設定する方針とした。

不陸を抑制する方法としては、まず液状化層厚の平準化を図ること必要である。本検討では概ね固化改良体の下端標高であるCDL-3.8mまで一様に改良を実施したモデルにより検討を実施した。ここでCDL-3.8mは、固化改良体の下端標高であるとともに、埋立地内で確認された転石分布深度の上端標高程度に該当する。地盤改良にあたって転石の除去は多大な時間とコストが必要であるため、地盤改良深度下端をCDL-3.8mとすることで大幅なコスト削減を図ることが可能である。更に、CDL-3.8mまで改良を実施することによって、液状化層以浅の非液状化層厚が10m程度造成されるため、図-12より地盤被害の発生が生じない、もしくは被害程度が軽減されるものと推測される。

なお、想定する液状化対策工法は、占有しての面的改良が可能であること、当該荷さばき地での実績があるこ

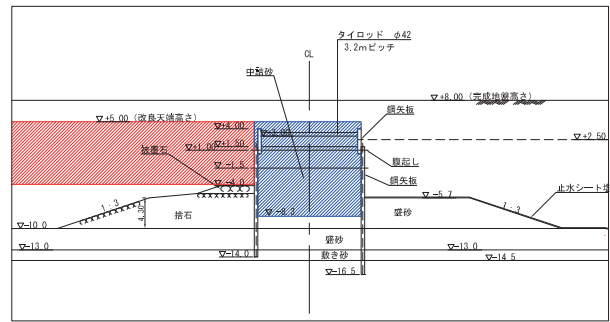


図-14 PCB処分地周辺二重鋼矢板内改良断面

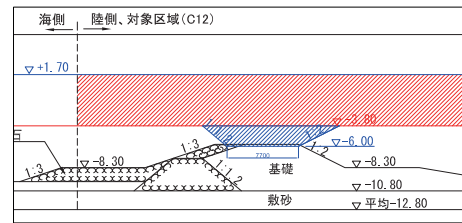


図-15 旧護岸部の摺りつけ改良断面

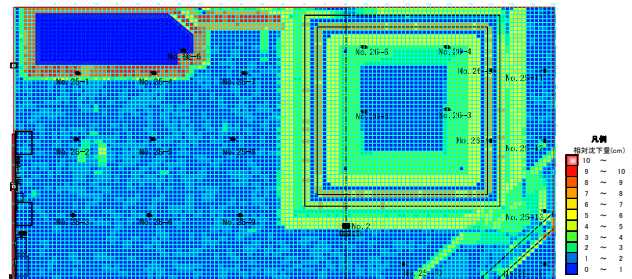


図-16 相対沈下量平面分布（摺りつけ改良実施）

と並びにコスト削減の観点から、サンドコンパクションパイル工法を基本とした。

6. 液状化対策後の相対沈下量の推定

5章で設定した「一律CDL-3.8mまで改良したケース」の相対沈下量分布図を図-13に示す。図-11に示した無対策ケースと比較すると、固化体が局所的に厚く分布する範囲では相対沈下量10cmを下回ることが確認できた。また、広範囲でばらついていた相対沈下も抑制でき、地震後の早期供用に対するリスクを低減可能であることが確認できた。

しかし、地盤条件が局所的に大きく異なる液状化対策工事実施済範囲周辺、旧護岸位置及びPCB処分地周辺等ではまだ設計限界値（相対沈下量10cm）を上回る。そこで、設計限界値を満足するよう、液状化対策工事実施済範囲の境界部及び旧護岸において改良下端深度の摺りつけを行い、緩い中詰砂が沈下要因となるPCB処分地境界部の二重鋼矢板内部は改良下端深度を深くし、沈下量の抑制を図ることとした。適正な範囲は繰返し計算により決定した。

PCB処分地周辺二重鋼矢板内部では改良深度をCDL-8.3m (図-14) , 旧護岸部分では旧護岸天端 (CDL-6.0m) からCDL-3.8mまで1:1.2及び1.2の勾配で摺りつけ改良 (図-15) , 液状化対策工事実施済範囲では, 改良下端深度 (CDL-14.2m) からCDL-3.8mまで1:1.6の勾配で摺りつけ改良を行った結果を図-16に示す。これより, 全ての範囲で相対沈下量10cmを満足することが確認できた。

7. まとめ

本報文では, 複雑な埋立履歴を持つ埋立地上の荷さばき地を対象とし, 平坦性確保の観点から相対沈下量10cmを設計限界値とした「モンテカルロシミュレーション」による液状化対策の検討を行った。その結果, 液状化対策層厚の平準化やコスト縮減, 施工性の観点から, 全層対策と比して対策深度を約50%としても, 地盤条件が局所的に異なる地点において摺りつけ対策を行うことにより設計限界値を満足することを確認できた。

本検討では, 従来空港埋立地の圧密沈下予測, 液状化による不同沈下予測で用いられてきた「モンテカルロシミュレーション」による地盤材料のばらつきの評価手法を, 港湾施設の埋立材料の液状化に伴う沈下予測に適用したものである。したがって, 本検討で想定した条件 (例えば相関距離の考え方など) について被災事例や模型実験等により今後検証されることが望ましい。

なお, 本検討では設計限界値を相対沈下量10cmとしたが, 絶対沈下量は30cm程度発生する結果となった。この30cm程度の絶対沈下量が, コンテナターミナル荷さばき地の供用性に与える影響を, 東日本大震災の類似の被災事例等から検証する必要もあると考えている。

謝辞: 本検討の実施にあたっては, 国立研究開発法人港湾空港技術研究所地盤改良研究チーム森川TLに御助言・御指導を賜った。ここに記して深甚の謝意を表します。

付録 モンテカルロシミュレーションの概要

モンテカルロ法とは, 数値計算やシミュレーションを乱数を用いて解く (近似解) 手法の総称であり, 様々な分野で用いられている。具体的には, 数式化された事象の変数をランダム (乱数を用いる) に決定し, 試行回数を多数行うことにより統計的 (確率的) に意味のある近似解を推定する手法である。

ある層の体積ひずみは, 正規分布すると仮定しその平均値, 標準偏差を μ_ε , σ_ε とする。任意の平面メッシュ (要素) に, ランダムな体積ひずみを割り付けるには,

正規乱数 α (平均値0, 標準偏差1.0) を用いて, 次のように求めることができる。

$$\varepsilon = \mu_\varepsilon + \sigma_\varepsilon \times \alpha$$

この方法では, 隣合う要素間で大きく異なる体積ひずみが割り付けられることもありえるが, 土質特性である以上, 水平方向の相関性を有すると考える方が適切である。そこで, 各要素の確率変数が相互に相関を持っていることを考慮して, ランダム変数を割り付ける。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{1p} \\ \varepsilon_{2p} \\ \vdots \\ \varepsilon_{np} \end{pmatrix} = \mu_\varepsilon + \sigma_\varepsilon \cdot [C^*] \cdot \begin{pmatrix} a_{1p} \\ a_{2p} \\ \vdots \\ a_{np} \end{pmatrix} \quad (a)$$

ε_{ip} : 要素*i*の試行*p*回での体積ひずみ

α_{ip} : 正規乱数

$[C^*]$: 共分散マトリックス $[C_x]$ をLU分解して得られる

$$[C_x] = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{12} & \cdot & \cdot & \tau_{1n} \\ \tau_{21} & 1 & \cdot & \cdot & \tau_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tau_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} = [C^*] \cdot [C^*]^T \quad (b)$$

$$[C^*] = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdot & \cdot & c_{nn} \end{pmatrix} \quad (c)$$

τ_{ij} : 要素*i*と要素*j*の相関係数で

$$\tau_{ij} = \exp(-r_{ij} / b)$$

r_{ij} : 要素*i*と要素*j*の中心間距離

b : 相関距離

参考文献

- 1) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) 土田, 小野: 数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, 4, 1988.12.
- 3) 宮田, 井合, 一井: 液状化による不同沈下の予測手法の開発, 港湾技研資, No.908
- 4) 沿岸開発技術センター: 液状化ハンドブック