設計に基づいた施工における問題点の検証について
—より効率的な施工を目指して—

港湾空港部　港湾建設課　　○中山　仁
時田　恵生
水口　陽介

近年，既存施設の延命化や施設整備の高度化など，施設に求められる要求性能が多様化・複雑化しており，構造設計において新技術や新工法の採用など高度な技術が求められている．また，設計断面が高度化・複雑化しているが，工事実施においては効率的な施工が求められている．このため，設計段階においては，より施工性を考慮する必要が生じている．

本報文では石狩湾新港の耐震強化岸壁の設計を例により効率的な施工の検討について報告を行うものある．

キーワード：設計・施工，地盤改良

1. はじめに

近年の既存施設の延命化や施設整備目的の多様化など施設の要求性能が複雑化するなかで，設計においては，港湾基準の改訂に伴い，従来の仕様規定から性能規定に変わったことで新技術，新工法に対し柔軟な対応が可能となり，より低コストで高品質な構造施設が求められている．その一方で，設計断面が複雑化することで，実際の施工段階において煩雑な作業や非効率な作業が発生することも少なくない．工事実施段階において発生する様々な課題に対し，基本設計段階から諸課題を考慮し，より効率的に事業を進めるため，これまでに実施してきた構造設計等について検証・評価を行うとともに，設計手法や設計手順について技術的な整理・評価を行い，今後の設計に反映させていくことが重要である．

本報文では，石狩湾新港耐震強化岸壁を例に，工事実施段階で発生した問題点を取り上げ，設計段階にフィードバックしてその対策案を検討した経緯を報告するものである．

2. 石狩湾新港耐震岸壁改良工事における設計事例

(1) 設計の背景

石狩湾新港の-10m耐震強化岸壁は，既設矢板式岸壁（-7.5m）を耐震強化岸壁に増深改良したもので，基本設計において永続状態およびレベル1地震動の変動状態に対する安定照査と，地震応答解析によるレベル2地震動に対する耐震性能照査を実施した．図-1に決定した改良断面の標準断面図を示す．レベル1地震動に対する安定照査を実施するため，国土技術政策総合研究所にて公開されている石狩湾新港におけるレベル1地震動の基盤波形をもとに照査用震度を算出し，耐力比を満足する矢板式（控え直杭）構造を選定した．また，選定した構造断面に対して，レベル2地震動による耐震性能照査を行った．当地域におけるレベル2地震動としてM6.5の直下型地震を想定し基盤波形を算定した結果，改良断面を決定したレベル1地震動の波形に比べると地震規模が大きく，当地域における地震動の特徴として，レベル1地震動とレベル2地震動の波形の差異が顕著となることが分かった．そのため，レベル1地震動による液状化判定では液状化しないという判定であったが，レベル2地震動では埋立地盤が液状化してしまい，耐震性能照査による施設の変形量が許容値をはるかに上回る結果となった．変形量を抑制するためには，埋立地盤の液状化対策を講じる必要があったが，埋立地盤のN値が16程度と大きい

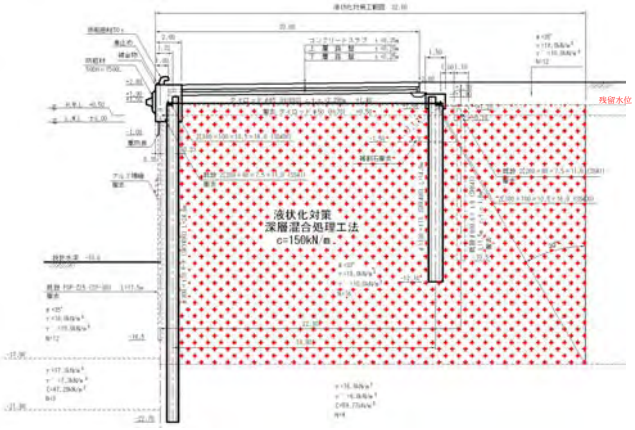


図-1　標準断面図

Hitoshi Nakayama, Akio Tokita, Yousuke Mizuguchi

値のため，SCP工法による地盤改良は適応外であったことから，深層混合処理案，事前混合処理案，薬液注入工法案のうち最も経済的となる深層混合処理による地盤改良工法を採用し，液状化現象の発生を抑えることで施設の変形量を許容値内に抑えた．液状化対策範囲は，岸壁前面から控え杭と残留水位との交点から背後に30度で下ろし，液状化層の下面との交点までを対策範囲（岸壁法線から32.6m）とした．また，改良強度は，FLIPによる地震応答解析で変形量が許容値内に収まるように設定した．尚，FLIPにおける地盤改良範囲の液状化に関するパラメータは，液状化しないという考えのもとに過剰間隙水圧の上昇はないものとして考慮していない．

(2) 設計を反映した施工方法・施工手順

設計段階では，FLIP解析モデルで液状化対策範囲全体を非液状化として設定しているため，控え杭近傍まで地盤改良が必要である．そのため，地盤改良には構造物への近接施工が可能な機械攪拌式と高圧噴射式を併用した深層混合処理工法を採用している．図-2に本施工区間における地盤改良配置平面図を示す．

設計に基づいた施工方法および施工手順は以下のとおりである．

① 前面既設矢板に仮設斜杭を設置

改良前に既設タイロッドを撤去するため，背後の土圧に対して既設矢板と仮設斜杭で対応する．

② 既設タイロッドおよび既設控え杭の撤去

地盤改良を行うため，液状化対策範囲内にある既設タイロッドと既設控え杭を撤去する．

③ 新規控え杭下部の地盤改良

新規に打設する控え杭下部の地盤改良は，杭打後の改良が不可能であるため，杭打設前に改良しておく．（図-3　③参照）

④ 新規鋼管矢板および新規控え杭の打設

地盤改良は，新規鋼管矢板および控え杭に近接して施工する必要があるため，地盤改良を先に施工してしまうと，qu＝400kN/m^2 程度の強度を有する地盤改良後の固化地盤に控え杭を打設することとなり，杭打設の施工能力の低下や杭の破損を招く危険性があることか

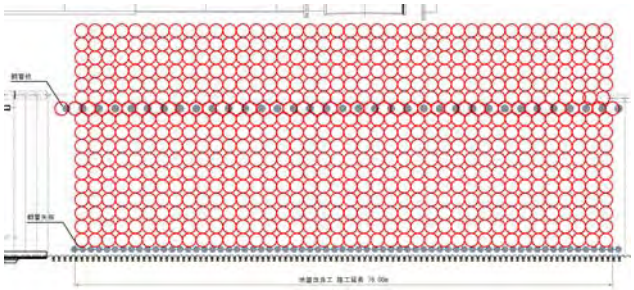


図-2　地盤改良配置平面図

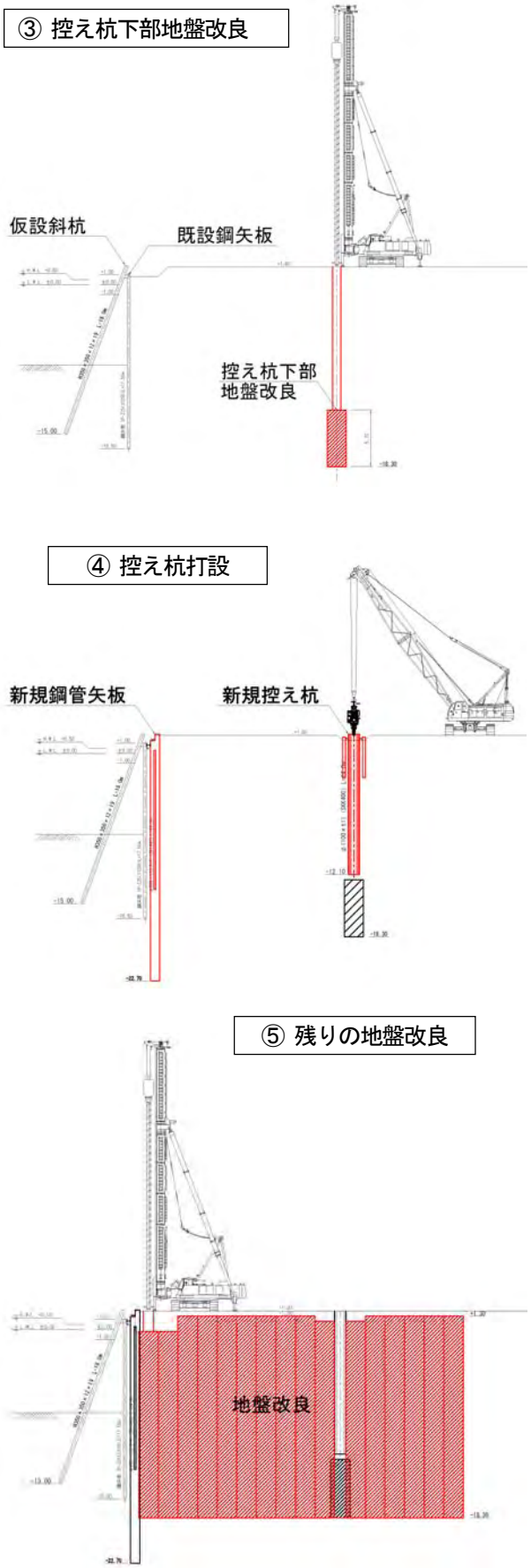


図-3　当初作業手順

ら，予め，鋼管矢板および控え杭を打設しておく．（図-3　④参照）

⑤ 残りの地盤改良

液状化対策範囲内の控え杭下部を除く残りの地盤改良を行う．機械攪拌＋高圧噴射による地盤改良工法を採用することで，先に打設済みの控え杭近傍まで改良が可能である．（図-3　⑤参照）

⑥ 新規タイロッドの設置

地盤改良終了後，新規タイロッドを設置する．

⑦ 既設矢板および仮設斜杭の撤去

(3) 施工上の問題点

実際の工事に際して，設計段階で決定した断面を施工するため，施工検討において上述した施工方法，施工手順を計画したが，当施工計画では，実際の工事段階で以下のような問題が発生し，作業が煩雑となり，施工性が非常に悪いことが，発注者・受注者間での事前協議の際に判明した．

・控え杭下部の地盤改良箇所とその他の地盤改良箇所とで，杭の打設を挟んで2段階の施工となり，地盤改良機および注入プラントが約1ヶ月待機する期間が発生するため，余計な機械損料が発生する．

・地盤改良作業の間に鋼管杭打設作業が入るため，その都度，作業の準備，施工後の機械の解体・搬出作業が伴い，施工が煩雑となる．また，隣接バースは供用中であることから，杭打設機械と地盤改良機械の搬入搬出に必要な作業ヤードの確保が困難となる．

・地盤改良と鋼管杭打設作業の段取換えの都度，1週間程度の作業ロスが発生する．

これらの非効率な施工上の問題点に対応するため，施工方法，施工手順の見直し，さらには，設計段階からの改良断面の見直しも含めた検討を行った．

図-4　地盤改良作業状況

(4) 効率的な代替案の検討

当初の施工計画における問題点の最も大きな要因が，控え杭下部とその他の地盤改良が連続して施工できない状況であることから，地盤改良作業の工程について検討した．

まず，杭近傍まで地盤改良するためには，地盤改良により固化した地盤に杭を打設することが施工上困難であると考えられることから，施工手順として杭打設と地盤改良の順番を変更することはできない状況であった．

一方，控え杭下部の地盤改良については，控え杭打設後に改良する方法として，控え杭の内部に地盤改良攪拌翼を通し下部を改良する方法も考えられるが，攪拌翼が管内部に接触する危険性や改良による地中での盛り上り土の杭への影響も考えられることから，困難であると判断した．また，控え杭を液状化層下端まで伸ばすことも考えられるが，施工費が高くなる結果となった．

以上の検討結果から，施工方法および施工手順の変更だけでは対応が困難であるため，基本設計段階にフィードバックし，杭近傍と控え杭下部の地盤改良範囲を詳細に設定することとした．

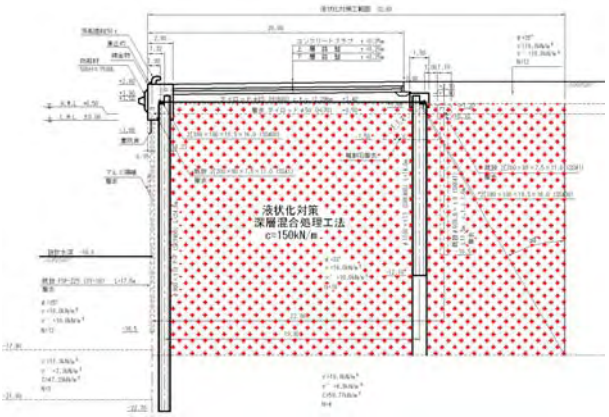


図-5　標準断面図（修正案）

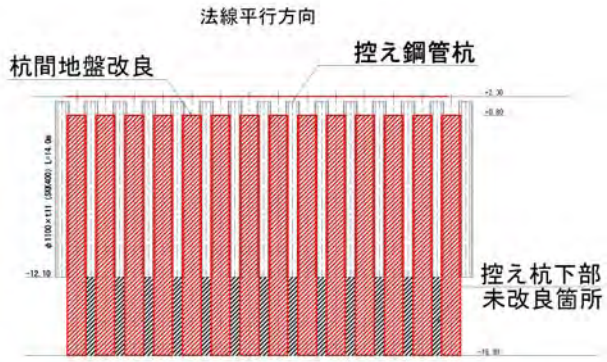
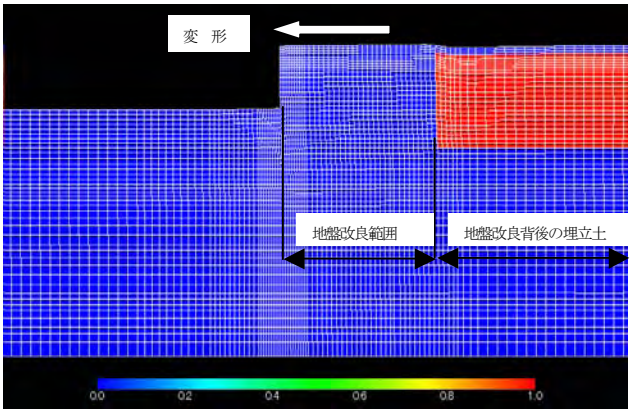


図-6　法線方向正面図

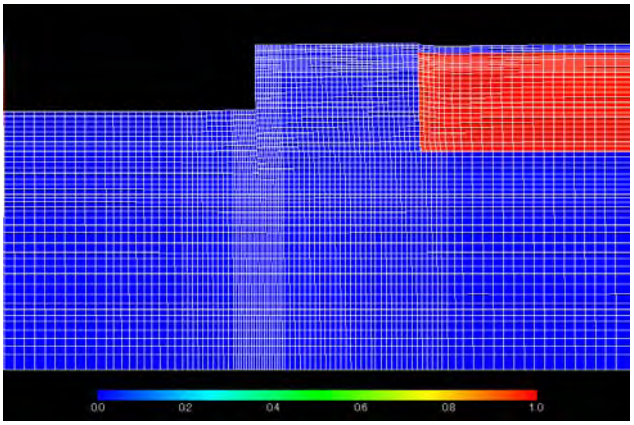
見直しの対象は控え杭下部（改良長：5.7m）の改良範囲とし，控え杭下部を未改良にした場合の耐震性能照査を実施し，当代替案が施設の耐震性能に影響がないか再検討することとした．**図-5** に検討した修正案の標準断面図を示す．但し，控え杭同士の間（杭間隔：2.296m）の地盤については，液状化層の下端まで地盤改良が可能であることから，控え杭設置箇所での断面では杭下部が未改良断面（**図-5**），杭間での断面では改良された断面となる（**図-6 法線方向正面図** 参照）．この法線方向の断面の違いを2次元の地震応答解析で表現するため，解析モデルを以下の2 ケースで設定し解析を実施した．まず，CASE1 として控え杭下部の液状化層の地盤剛性を改良部と未改良部の加重平均にてモデル化し，液状化特性については周辺を固化改良されていることから，過剰間隙水圧の上昇はないものとして設定した．CASE2 では断面の危険側を考慮して，控え杭下部の液状化層を完全な未改良地盤としてモデル化し，液状化特性は埋立土と同様の液状化パラメータを設定した．

表-1　地震応答解析結果一覧

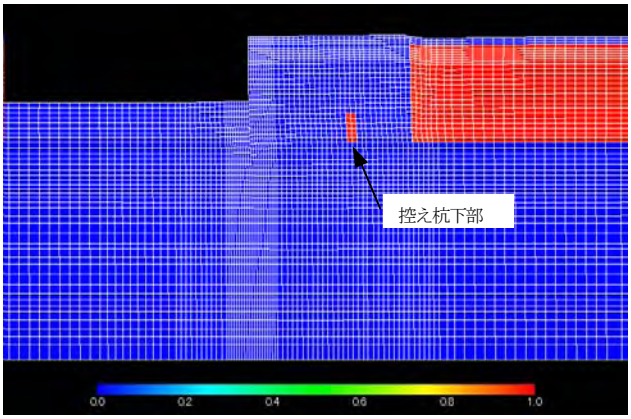
	残留変形量	応力照査		
	法線天端	鋼管矢板	鋼管杭	タイロッド
	(cm)	(kN・m/m)	(kN・m/m)	(kN/m^2)
許容値	100	1,956	1,215	690,000
修正前	80	1,810	698	87,405
CASE1	84	1,855	624	107,863
CASE2	86	1,880	595	122,901



(a)　当初設計案



(b)　代替案　CASE1



(c)　代替案　CASE2

図-7　地震応答解析結果（過剰間隙水圧比分布図）

図-7 に地震応答解析による変形図と過剰間隙水圧比の分布（残留値）を示す．また，**表-1** に解析結果（最大値）一覧を示す．変形図と過剰間隙水圧比分布図を見ると，地盤改良背後の埋立土で過剰間隙水圧比が1.0程度まで上昇しており，レベル2地震により完全に液状化していることが分かる．また，CASE2 では杭下部も未改良としているため，当箇所においても液状化の発生が認められる．また，どのケースも地盤改良範囲全体が一体となって前面側に変形している．解析結果一覧を見ると，修正案では，岸壁法線天端の水平変形量は当初設計に比べて4～6cm程度大きくなったものの，許容値内に収まる結果となった．また，CASE1 とCASE2 では危険側で設定したCASE2 の方が若干変形量が大きいものの，ほとんど変わらない結果となった．部材の応力照査については，当初設計より前面鋼管矢板とタイロッドに掛かる負担が増加しモーメントおよび引張力が大きくなってはいるが，いずれも許容値内となっている．

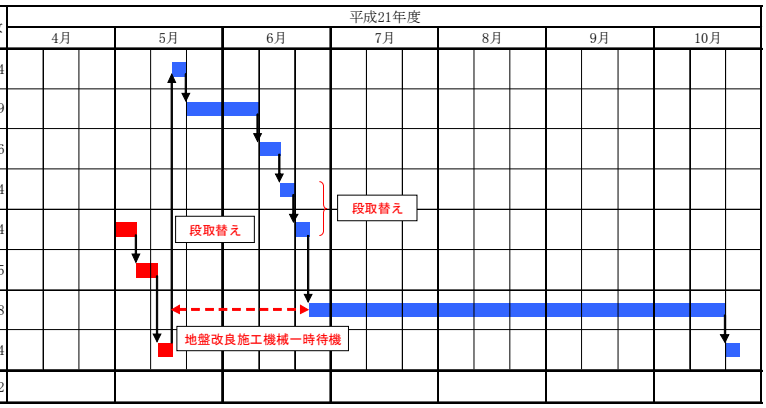
以上の検討結果から，控え杭下部の地盤改良を行わなくても，耐震性能を十分満足することが分かった．この結果を受け，控え杭下部の地盤改良を施工せず，地盤改良作業を連続して行う方法を採用した．

表-2 に，変更前の当初設計案（上段(a)），変更後代替案（下段(b)）の地盤改良および杭打設作業の工程表を示す．当初の工程と比べ，前半の控え杭下部の地盤改良がなくなった分，煩雑な段取換え（各工種の準備・後片付け）や地盤改良機械の一時待機期間を無くすことでより効率的な施工が可能となった．また、施工期間も10日ほど短縮できた。

表-2　地盤改良および杭打設作業の工程表

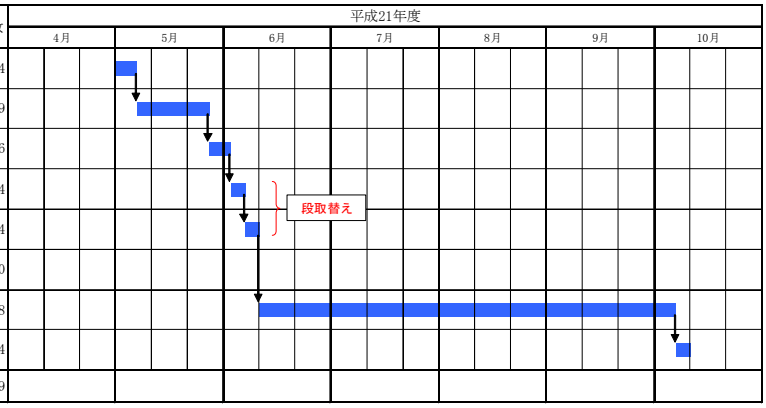
(a)　当初設計案

工	種	数量	単位	Qd	組数	供用係数	日数
本体工	準備						4
	鋼管矢板打設	68	本	6　本/日	1	1.65	19
	鋼管杭打設	35	本	10　本/日	1	1.65	6
	後片付け						4
地盤改良工	準備						4
	控え杭下部	680	m^3	280　m^3/日	1	1.65	5
	地盤改良	20,000	m^3	280　m^3/日	1	1.65	118
	後片付け						4
合計							172



(b)　代替案

工	種	数量	単位	Qd	組数	供用係数	日数
本体工	準備						4
	鋼管矢板打設	68	本	6　本/日	1	1.65	19
	鋼管杭打設	35	本	10　本/日	1	1.65	6
	後片付け						4
地盤改良工	準備						4
	控え杭下部	0	m^3	280　m^3/日	1	1.65	0
	地盤改良	20,000	m^3	280　m^3/日	1	1.65	118
	後片付け						4
合計							159



3.　まとめ

ここでは，石狩湾新港耐震岸壁改良工事における事例を挙げ，設計に基づいた施工における問題点とその対応について述べた．事例のように，局所的な地盤改良範囲の詳細な設定のような通常の設計では考慮していない事項についても，施工上の問題の発生要因となり得ることから，地盤改良範囲の設定にあたっては，設計段階で全体の工程計画や工法選定について十分留意する必要がある．また，他工事の案件についても，工事請負者の現場代理人を対象としたアンケート調査を実施し，改善が可能と思われる案件については，詳細調査により，改善事項の抽出，改善事項の発生要因の分析，また，改善のための対策案について検討し，今後の構造設計や実施設計，積算に反映させる基礎資料として整理していくことが重要である．

Hitoshi Nakayama, Akio Tokita, Yousuke Mizuguchi