

2011年東北地方太平洋沖地震において 地震動により被災した港湾構造物の再現解析 - 控え矢板式岸壁を対象として -

住谷 圭一¹・榊原 務¹・田代 聡一¹・曲 伝軍²・小濱 英司³・一井 康二⁴

¹正会員 東亜建設工業株式会社 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー31F)

E-mail: k_sumiya@toa-const.co.jp, t_sakakibara@toa-const.co.jp, s_tashiro@toa-const.co.jp

²株式会社応用解析 (〒115-0052 東京都北区赤羽北3-26-4-309)

³正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0831 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 広島大学大学院 (〒739-8527 東広島市鏡山1丁目4-1)

本稿は、2011年東北地方太平洋沖地震の際に地震動により被災した港湾構造物のうち、控え矢板式岸壁に着目して、その再現解析を試みたものであり、控え矢板式岸壁を対象とした有効応力解析を実施する上で、最適なモデル化についての検証を行った。また、当該地震ではその継続時間が非常に長いことから、透水を考慮できるカクテルグラス系のひずみ空間多重せん断モデルを用いた解析を実施すると共に、岸壁背面に存在する岩ズリの揺り込み沈下の影響評価についても、同モデルを用いて検討した。今回、解析の対象とした岸壁は、仙台塩釜港区高砂埠頭2号岸壁と相馬港2号埠頭岸壁である。

Key Words : *effective stress analysis, liquifaction, finite element method, strain space multiple mechanism model, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震規模がM9.0と巨大であった上、地震後に発生した津波が沿岸を襲ったこともあり、港湾構造物は地震動と津波による複合的な被災状況を呈した。このうち、地震動による被害形態としては、地盤の液状化が原因と思われる事例が多く見られた¹⁾。特に津波による被害を拡大させた原因が、津波の襲来前に発生した液状化によって被害を受けたことによるものであることを考えると、今回のように継続時間の長い地震動の場合に液状化がどの程度発生し、それにより津波が到達する前に構造物にどの程度の被害をもたらしたかを解明することは、今後起こりうる南海トラフ地震などの巨大地震に対する被害予測を適切に行う上でも重要である。

今回のように地震動の継続時間が長い場合を鑑みると、地盤の液状化を考慮した構造物の被害予測にあたっては、地震時に発生する過剰間隙水圧の透水を考慮する必要がある。港湾の分野においては、有効応力法に基づく地震応答解析プログラムFLIP²³⁾が広く用いられているが、透水を考慮できる構成則としてはカクテルグラス系のひず

み空間多重せん断モデル³⁾(以下、「カクテルグラスモデル」と称す)がある。

従来は設計地震動の継続時間が比較的短く、非排水条件下で定式化されたひずみ空間多重せん断モデル「東畑・石原モデル+井合モデル」²⁾(以下、「マルチスプリングモデル」と称す)が用いられてきた。マルチスプリングモデルでは、地震時の透水を考慮できないが、過剰間隙水圧上昇に伴う地盤剛性の低減を適切に考慮できる。また既往の研究において地震被害を再現した事例⁴⁾⁵⁾⁶⁾が多数あることなどから、当該モデルによる被害予測に対する適用性は十分検証されているといえる。

一方、カクテルグラスモデルでは、地震時の透水を考慮できるが、まだ当該モデルが提案されて間もないこともあり、模型実験や被災事例の再現性に関する検証が行われているものの設計実務にはまだ浸透していない状況である。また地震動の継続時間が比較的短い場合の再現事例はあるものの、今回の地震のように継続時間の長い場合の被害を再現した事例は、本再現解析を含めまだ少ない状況にある。また、岸壁背面の液状化対策として施工された岩ズリが地震による揺すり込みによる影響により沈下した可能性が報告されているが、カクテルグラス

モデルによる揺すり込み沈下の再現性を確認しておくことも必要である。以上のような背景のもと、ここでは控え矢板式岸壁を対象に、解析方法の違い、土層構造の違い、岩ズリの揺すり込み、控え矢板式岸壁のモデル化の違い等に着目し、カクテルグラスモデルの適用性を検証するための再現解析を試みた。今回、解析対象とした岸壁は、仙台塩釜港区高砂埠頭2号岸壁（以下、高砂2号岸壁）と相馬港2号埠頭岸壁（以下、相馬2号岸壁）であり、図-1に検討対象港湾の位置を示す。

2. 検討対象構造物とその被災状況

各岸壁の詳細な位置、入力地震動、標準断面図および被害の状況を以下に示す。

(1) 高砂2号岸壁

図-2に高砂2号岸壁の位置を示す。図-3は、当該岸壁における事後推定波⁷⁾のNS成分とEW成分から岸壁法線直角方向に合成した波形であり、この波形を再現計算の入力地震動として採用した。図-4は岸壁の標準断面図であり、構造形式は、控え組杭の鋼管矢板式岸壁となっている。矢板周辺を若干掘削した後、矢板背後に裏込石と液状化対策としての岩ズリを埋立てて築造されている。図-5に地震後に測定された岸壁法線の水平変位量を示す。変位量は岸壁法線上のある点を基点にとった値であるが、

区で平均26cm、区で一部約68cmの箇所があるが全体的には平均29cmである。なお、区において変位量が突出している箇所は、後述の土層構造で示すように他の一般部と若干異なっている。ここでは、この土層構造の違いが変位に影響を及ぼしたのかどうかについても検討するものとした。図-6は岸壁における地震後の沈下量の実測値である。矢板天端およびレール基礎天端は全体的に60cm程沈下しているが、これは地殻変動に伴う広域的な地盤沈下によるものと考えられるため、再現解析にあたっては矢板天端およびレール基礎天端と地盤表面の段差60～70cm程度に着目するものとした。

(2) 相馬2号岸壁

図-7に相馬2号岸壁の位置を、図-8に事後推定波⁷⁾のNS成分とEW成分から岸壁法線直角方向に合成した波形を示す。図-9に解析対象とする区間の標準断面図と被災状況を示す。図に示す通り、構造形式は高砂2号岸壁と同様に控え矢板式である。当該構造は支持層が岸壁法線に沿って変化するため3工区に分けられるが、ここでは一般的な工区として陸側に位置する工区を解析対象とした。当該検討区間における岸壁の被災状況としては、岸壁の直線性は保たれているものの全体的に一様に20cm程度海側へ変位し、前面鋼管矢板の直背後で10cm程度

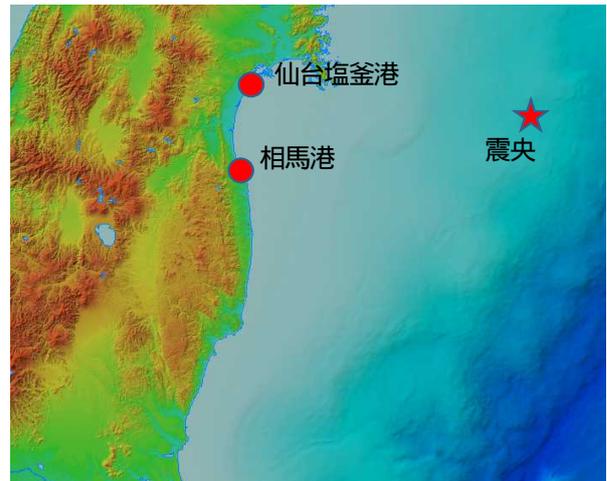


図-1 検討対象港湾の位置



図-2 仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭岸壁の位置

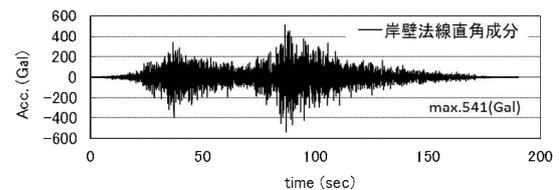


図-3 高砂埠頭における基盤入力加速度波形

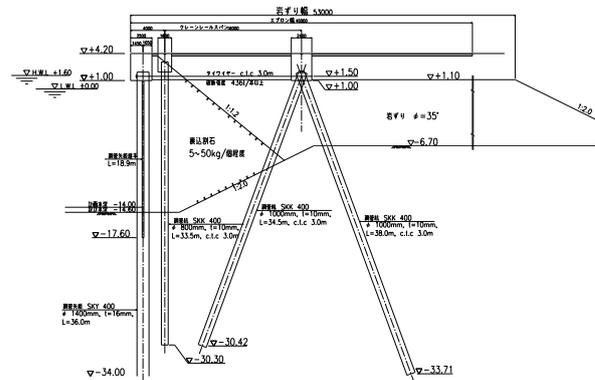


図-4 高砂埠頭2号岸壁 標準断面図

の沈下，岸壁法線から20～25mの位置で30cm程度の沈下が生じている．

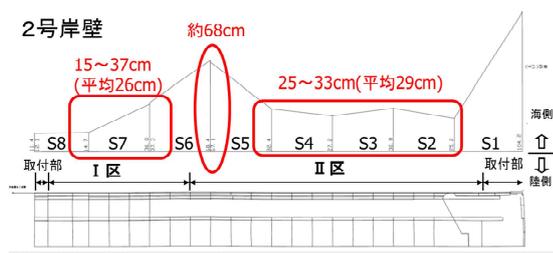


図-5 高砂2号岸壁における水平変位量

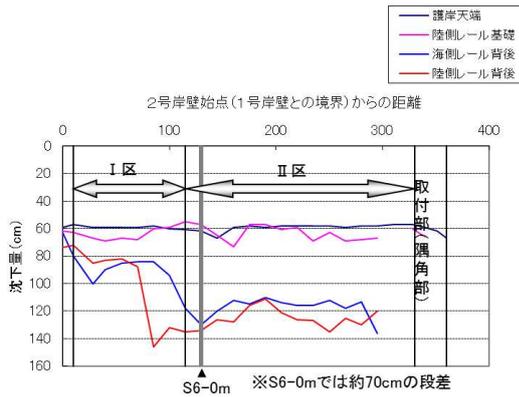


図-6 高砂2号岸壁における沈下量

3. 土層構造および地盤パラメータの設定

各岸壁における土層構造および解析に使用する地盤パラメータは，既往の設計図書および今回の地震前後に実施された土質調査結果等に基づいて設定した．以下，各岸壁について設定した土層構造および地盤パラメータを示す．

(1) 高砂2号岸壁

当該岸壁では，地震後にボーリング調査が実施され，特にせん断波速度構造や液状化強度を調べるため，PS検層や非排水繰返し三軸試験等が実施されている．土層構造は，設計時の土層構造を元に地震後のボーリング調査により得られた土質柱状図を参照し設定した．図-10に設定した土層構造を示す．土層構造が2種類あるが，土層構造Aは岸壁の水平変位が68cm程突出している箇所の土層構造であり，土層構造Bは岸壁の水平変位が平均29cm出ている一般的な区間における土層構造である．

マルチスプリングモデルに用いる地盤パラメータは，PS検層結果および非排水繰返し三軸試験結果等を用いて標準設定法⁸⁾に従って設定した．ただし，液状化対象土層のうち，埋立土については非排水繰返し三軸試験が実施されていないことからN値と細粒分含油率から簡易設定法⁹⁾に従って液状化強度を推定した．図-11に液状化



図-7 相馬2号岸壁の位置

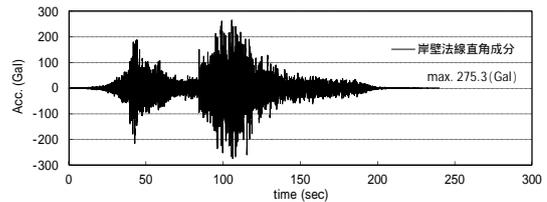


図-8 相馬2号岸壁における基礎入力加速度波形

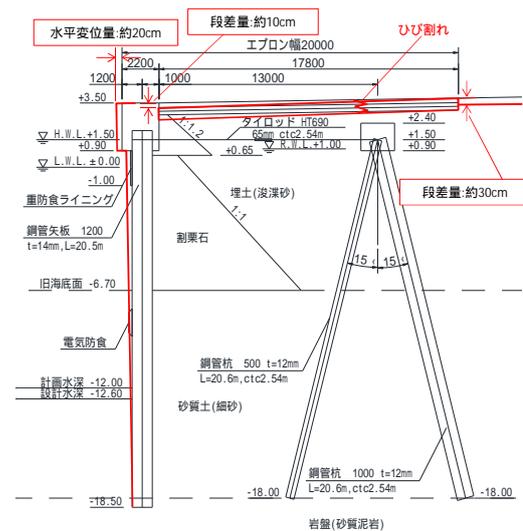


図-9 相馬2号岸壁の標準断面図と被災状況

対象土層について設定した液状化強度を，推定値または試験値と比較して示す．カクテルグラスモデルに用いる地盤パラメータのうち，ダイレイタンスに関するパラメータはマルチスプリングモデルで設定した液状化強度をターゲットとして要素シミュレーションにより設定した．マルチスプリングモデルおよびカクテルグラスモデルに用いた地盤パラメータを表-1に示す．

一方，高砂2号岸壁では岸壁背後において60～70cm程度の沈下が生じたが，これは岩ズリの揺すり込みによる影響が考えられている．そのため，現場から採取した岩ズリ等を用いた排水繰返し三軸試験が実施されている¹⁰⁾．本再現解析においても，岩ズリの揺すり込みによる

初期応力状態を再現するための自重解析は、井合ら¹¹⁾の方法に従った。

基盤層（凝灰岩：Tf層）の適用要素については、基盤層にマルチスプリング要素を適用すると基盤層の変形が大きくなり、岸壁付近の変形に影響をもたらすことが判ったため、線形平面要素でモデル化した（図-15参照）。

鋼材関係のモデル化については、鋼管矢板および控え杭は非線形はり要素、タイロッドは非線形ばね要素でモデル化した。なお、タイロッドは圧縮力を伝達させないように圧縮側の剛性をゼロとしている。また、控え杭の杭軸直角方向については、杭 - 地盤相互作用ばね要素^例

え¹²⁾を適用し、杭周辺地盤の剛性を考慮して杭のすり抜けができるようにした。

(3) 控え組杭の杭軸方向に関するモデル化

図-16に控え組杭に関する地盤 - 構造連成系のモデル概念図を示す。控え組杭の杭軸方向に関しては、モデル化手法が解析結果に影響することが考えられる。

従来の手法は、杭下端を地盤に固定するケースが一般的であり（杭下端節点と対応する地盤節点を水平・鉛直方向変位自由度で拘束する方法、以下、杭下端固定モデル）、杭の周面摩擦力を無視し、地震時に作用する杭先端支持力が極限支持力を上回らないことを前提としている。従って、杭の周面摩擦力が無視できない条件や先端支持力が極限を上回る場合では、地震時挙動を精度良く再現することが難しいと考えられる。一方、杭と地盤の間にジョイント要素（接触面積は杭周面積を考慮して奥行幅を調節）を挿入するとともに、杭下端は圧縮のみ受け持ち引張を受け持たない非線形ばね要素を挿入することで、杭の周面摩擦力および杭下端の極限耐力を考慮したモデル（以下、摩擦杭モデル）も提案されている¹³⁾。

本検討では、控え杭の杭軸方向のモデル化について、杭下端固定杭モデルと摩擦杭モデルの2ケースを検討し、被災状況の再現性が良い手法を今後の再現計算に用いることとした。

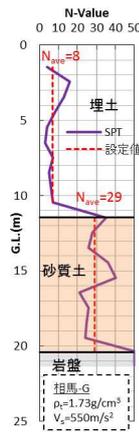


図-12 相馬2号岸壁における土層構造

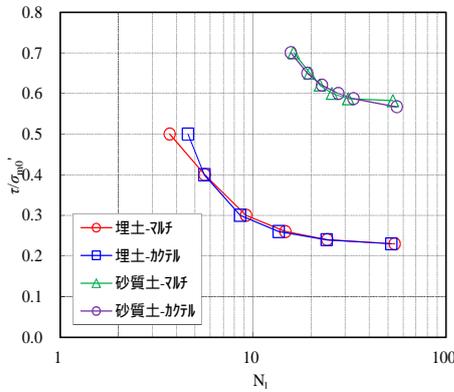


図-13 相馬2号岸壁における液状化強度

表-2 相馬港2号埠頭における地盤パラメータ

記号	土質	γ (t/m ³)	m (kN/m ²)	V_s (m/s)	G_{max} (kN/m ²)	m_0	K_{vm} (kN/m ²)	m_k	c (kN/m ²)	r	h_{max}	n	k (m/sec)	
B	埋土 (浪深砂)	1.80	98	162	75246	0.5	196230	0.5	0.0	39.38	0.24	0.45	1.00E-04	
		2.00	98	162	75246	0.5	196230	0.5	0.0	39.38	0.24	0.45	1.00E-04	
		マルチスプリングモデル												
		カクテルグラスモデル												
As	砂質土 (細砂)	28.0	0.005	6.038	0.20	0.95	1.20	8.00	0.70	0.24	2.00	-	-	
		0.500	0.847	2.514	0.500	0.500	0.005	2.560	1.0	0.1	0.5	-	-	
		マルチスプリングモデル												
		カクテルグラスモデル												
R	岩盤 (砂質凝灰岩)	2.00	98	269	125095	0.5	326228	0.5	0.0	41.33	0.24	0.45	1.00E-04	
		1.73	1392000	1.00E-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		マルチスプリングモデル												
		カクテルグラスモデル												
記号	土質	γ (t/m ³)	m (kN/m ²)	V_s (m/s)	G_{max} (kN/m ²)	m_0	K_{vm} (kN/m ²)	m_k	c (kN/m ²)	r	h_{max}	n	k (m/sec)	
		2.00	98	162	75246	0.5	196230	0.5	0.0	39.38	0.24	0.45	1.00E-04	
		マルチスプリングモデル												
		カクテルグラスモデル												
記号	土質	28.0	0.005	11.750	0.15	1.40	0.60	1.00	0.80	0.24	2.00	-	-	
		0.500	0.736	6.508	0.500	0.500	0.005	8.290	1.0	0.1	0.5	-	-	
		マルチスプリングモデル												
		カクテルグラスモデル												

表-3 控え組杭モデルの検討ケース

検討ケース	地盤モデル	地盤の排水条件	控え杭モデル	ジョイントの摩擦角	備考
case1	カクテルグラスモデル	排水	摩擦杭モデル	B: 39.38° As: 41.33°	摩擦角: せん断抵抗角
case2	カクテルグラスモデル	排水	摩擦杭モデル	B: 30° As: 30°	
case3	カクテルグラスモデル	排水	摩擦杭モデル	B: 15° As: 15°	
case4	カクテルグラスモデル	排水	固定杭モデル	-	

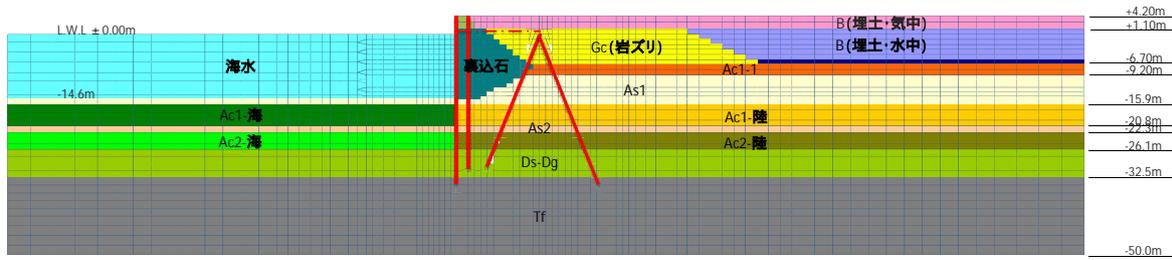


図-14 解析モデル

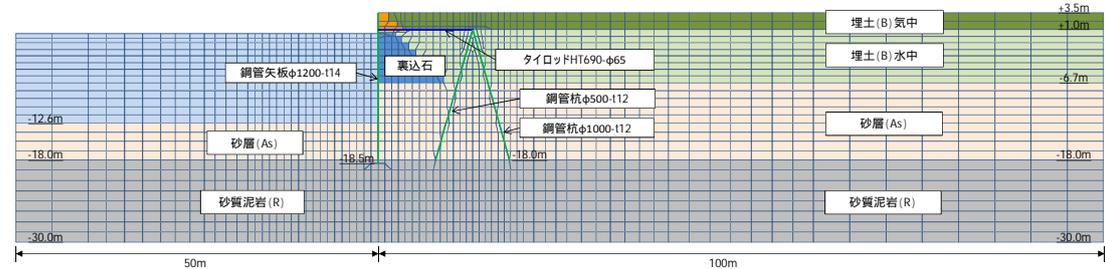


図-15 基礎層 (Tf) の適用要素による基礎変形の違い

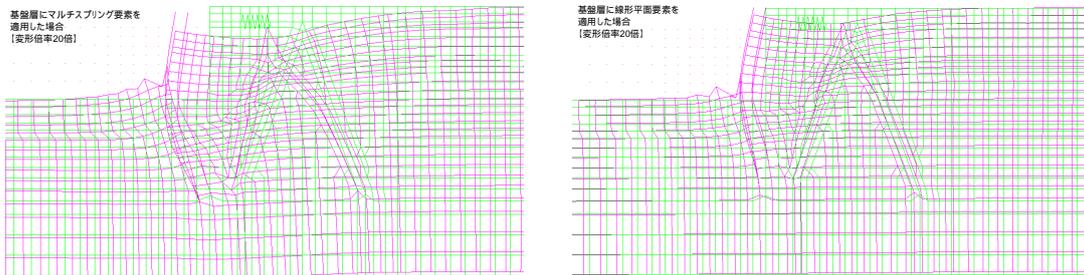


図-16 控え組杭に関する地盤 - 構造連成系のモデル概念図

(b) 検証結果

図-17に鋼管矢板の水平変位標高分布，図-18に鋼管矢板天端と背後地盤の段差量の時系列データ，図-19に岸壁背面の地表面沈下分布を示す．なお，図中には被災後の調査から得られた実測値を併記している．これらの結果から，ジョイント要素の摩擦角に地盤のせん断抵抗角相当を設定した摩擦杭モデルであるcase1が被災状況との整合性が高いことがわかる．また，鋼管矢板天端の水平変位量および鋼管矢板天端と背後地盤の段差量を摩擦杭モデルと杭下端固定杭モデルと比較すると，杭下端固定杭モデルは変形を過小評価していることがわかる．

図-20にタイロッドに生じた最大軸力を示す．なお，図中の赤線は破断軸力を示している．摩擦杭モデルの最大軸力は破断に至らないが，杭下端固定杭モデルは破断軸力に至ることが確認できる．図-21に控え組杭天端部の鉛直変位量の時系列データを示す．摩擦杭モデルは控

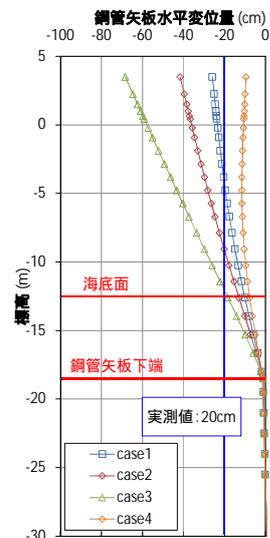


図-17 鋼管矢板の水平変位標高分布

え組杭天端部が上向きに変位しているのに対して、杭下端固定杭モデルはほぼ鉛直変位が生じないことがわかる。これらのことから、固定杭モデルは控え杭の引抜き挙動を再現することができず、岸壁の変形をタイロッドが拘束するため破断に至る最大軸力が生じたものと考えられる。一方、摩擦杭モデルは岸壁の変形に対して周面摩擦力に応じた控え杭の引抜き挙動が再現されており、タイロッドに過剰な軸力が生じなかったと考えられる。

以上のように、解析値と実測値の整合性や控え組杭の挙動を考えれば、ジョイント要素の摩擦角に地盤のせん断抵抗角相当を設定した摩擦杭モデルが、実際の被災状

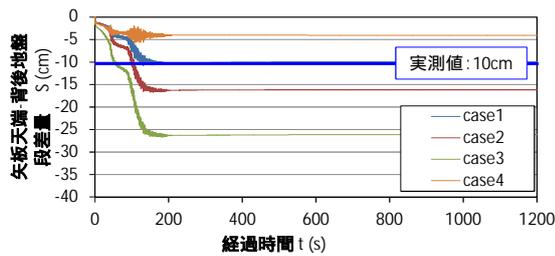


図-18 鋼管矢板天端と背後地盤の段差量

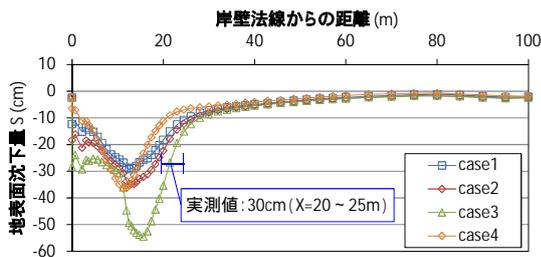


図-19 岸壁背面の地表面沈下分布

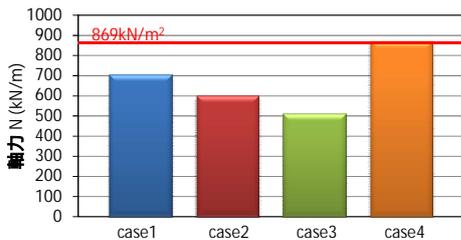


図-20 タイロッドに生じる最大軸力

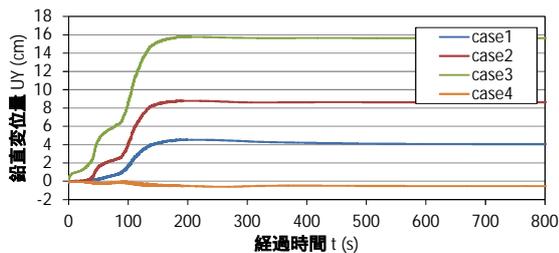


図-21 控え組杭天端部の鉛直変位量

況を再現した控え杭の杭軸方向のモデル化と考え、再現解析では本モデル化手法を採用した。

5. 解析方法と土層構造の違いによる再現解析

(1) 検討ケース

解析方法と土層構造の影響を調べるため、高砂2号岸

表-4 解析方法・土層構造の影響に関する検討ケース

ケース名	解析方法		土層構造
	液状化対象要素	透水	
MU-JS-A	マルチスプリング	非排水	土層構造 A
CU-JS-A	カクテルグラス	非排水	土層構造 A
CD-JS-A		排水	土層構造 A
CD-JS-B			土層構造 B

壁を対象に表-4に示すケースについて解析を実施した。前章の検討結果から控え組杭のモデル化は、摩擦杭モデルとした。

(2) 解析方法と土層構造による影響

図-22～図-24に、土層構造Aに対する各解析方法（ケースMU-JS-A、CU-JS-A、CD-JS-A）について加振後（時刻190秒）の過剰間隙水圧比分布と変形図を示す。また、図-25に土層構造Bに対するカクテルグラスモデル（排水）のケースについて同加振後の過剰間隙水圧比分布と変形図を示す。また、各ケースの岸壁天端における残留水平変位を表-5に示す。これらの図表より、土層構造Aについては、どの解析方法でも前面矢板天端の水平変位には影響しないが、解析方法の違いにより過剰間隙水圧の発生程度が異なることがわかる。またカクテルグラスモデル（排水）を用いた場合、土層構造AとBの違いに依らず前面矢板天端の水平変位には影響しないが、液状化対象層の間に不透水層が存在する場合（土層構造A）と存在しない場合（土層構造B）で過剰間隙水圧比の上昇程度に違いがあることが確認できる。今回のような条件の場合、岸壁の水平変位は液状化対象層の剛性にはあまり依存しないが、透水を考慮したカクテルグラスモデ

表-5 岸壁天端の残留水平変位

ケース名	MU-JS-A	CU-JS-A	CD-JS-A	CD-JS-B
水平変位	18.7cm	20.2cm	18.2cm	19.4cm

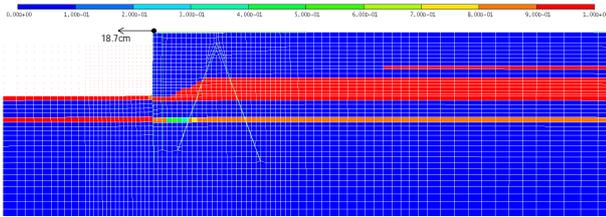
実測A：68cm、実測B：29cm

ルにより、地震動の継続時間や土層構造の違いが過剰間隙水圧の上昇にどの程度の影響を及ぼすかを適切に評価できることが明らかになった。

6. 岩ズリの揺り込みの影響を考慮した再現解析

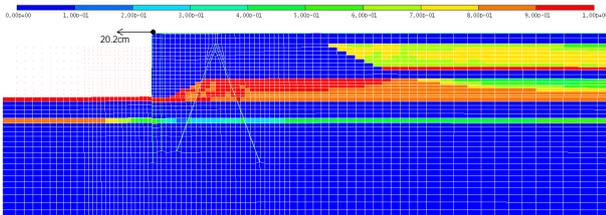
(1) 検討ケース

前章の解析ケースのうち、CD-JS-AとCD-JS-Bについて、



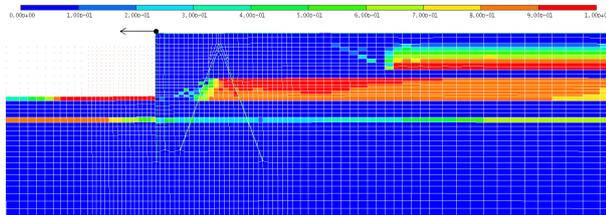
(変位スケール: 1倍)

図-22 加振後の過剰間隙水圧比と変形図 (MU-JS-A)



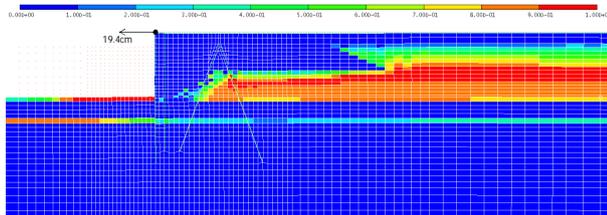
(変位スケール: 1倍)

図-23 加振後の過剰間隙水圧比と変形図 (CU-JS-A)



(変位スケール: 1倍)

図-24 加振後の過剰間隙水圧比と変形図 (CD-JS-A)



(変位スケール: 1倍)

図-25 加振後の過剰間隙水圧比と変形図 (T2-CD-JS-B)

岩ズリの揺り込み沈下の影響についての再現性を検討するために、岩ズりにダイレイタンスーを考慮した解析を実施した。表-8に解析ケースを示す。

(2) 岩ズリの要素シミュレーション

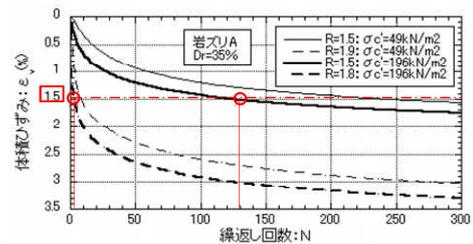
岩ズリについては、先にも少し触れたように現場から採取した試料を用いた排水繰返し三軸試験が実施されている。本再現解析においては、岩ズリの揺り込みによる影響を検討するため、この試験結果を用いてダイレイタンスーに関するパラメータを設定し、排水条件下のカクテルグラスモデルによる解析を実施した。この時に用いた岩ズリのダイレイタンスーに関するパラメータを表-9に示す。また当該パラメータを用いた場合の要素シミュ

表-6 揺り込みの影響に関する検討ケース

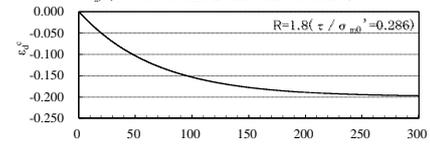
ケース名	岩ズリのダイレイタンスー	土層構造
CD-JS-A	なし	土層構造 A
CD-JS-B	なし	土層構造 B
CD-JS-AD	考慮	土層構造 A
CD-JS-BD	考慮	土層構造 B

表-9 岩ズリのダイレイタンスーに関するパラメータ

記号	土質	カクテルグラスモデル						
		α_{vm}	β_{vm}	β_{vm}	q_1	q_2	H_{max}	h_c
Gc	岩ズリ	0.20	1.00	1.82	1.00	0.00	0.24	2.00
		r_v	r_v^*	S_1	c_1	q_4	r_1	r_{mp}
		0.100	0.100	0.005	1.000	1.0	0.5	0.5



(a)排水繰返し三軸試験結果



(b)要素シミュレーション結果

図-26 岩ズリの排水繰返し三軸試験結果と要素シミュレーション

レーション結果と試験結果を並べて図-26に示す。図よりわかるように、すべての繰返し回数に対して収縮ひずみを一致させることは難しいので、ここでは繰返し回数5回程程度の収縮ひずみに着目してパラメータを設定している。

(3) 岩ズリの揺り込みによる影響

岩ズリのダイレイタンスーによる影響を調べたケースについて、前面矢板の変形図を比較した図を図-27に、岸壁背後地表面の沈下量を比較した図を図-28に示す。ここでも土層構造による影響は見られないが、岩ズリによる影響は顕著であり、特に沈下量については実測60~70cmに対して約2倍の沈下が生じた。これは、岩ズリの室内試験結果と完全に整合するようなパラメータではなかったためと考えられるが、適切なパラメータを設定できれば、透水を考慮したカクテルグラスモデルを用い

てダイレイタンスを考慮することで実際の被災状況を再現できるとことが期待される。

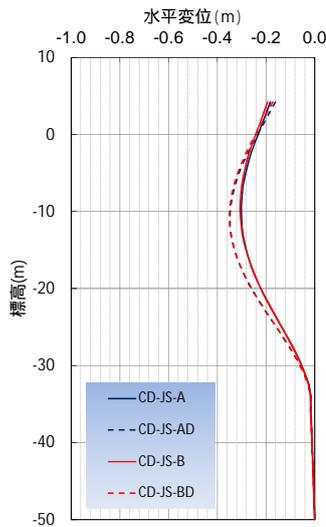


図-27 岸壁法線における水平変位の比較

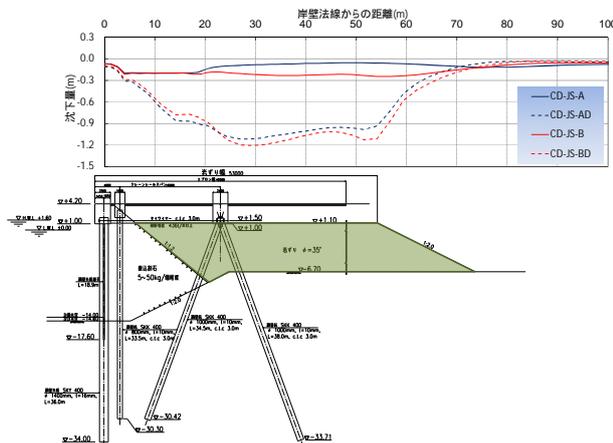


図-28 岸壁背後地表面における沈下の比較

6. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震において地震動により被災した控え矢板式岸壁を対象として、地震動の継続時間の長い事例に対して透水を考慮したカクテルグラスモデルの適用性を検証することを目的として、入力地震動および地震の揺れによる被災状況が明らかな2つの岸壁を対象としてFLIPによる再現解析を試みた。その結果、控え矢板式岸壁のモデル化および透水を考慮したカクテルグラスモデルの適用性について、以下の通り、明らかになった。

(1) 控え矢板式岸壁のモデル化について

従来の控え組杭のモデル化に関しては、杭下端を地盤に固定するケースが一般的であったが、摩擦杭モデルによる結果の方が、実際の被災程度に対して調和的である

ことがわかった。また、基盤層（凝灰岩）へ適用する要素は、基盤層の変形によるモデル全体への影響を最小限にするため、線形平面要素が望ましいと思われる。

(2) 透水を考慮したカクテルグラスモデルの適用性

従来の非排水条件下でのマルチスプリングモデル要素、非排水条件下でのカクテルグラスモデル要素、透水を考慮した排水条件下でのカクテルグラス要素、それぞれの要素を適用した3通りの解析を実施した。その結果、非排水条件下でのカクテルグラスモデルを使用することで、マルチスプリングモデルに比べて過剰間隙水圧の上昇程度がやや小さく、変形量等も小さくなる傾向を示すものの、透水を考慮したカクテルグラスモデルを用いることにより、継続時間の長い地震動に対してどれくらいの透水の影響が生じ、岸壁変位や構造物の損傷にどの程度の影響があるかを明らかにすることができた。具体的には、高砂2号埠頭において液状化対象地盤に不透水層が挟まれている場合とそうでない場合で過剰間隙水圧の上昇程度が異なることを明らかにできたこと、岩ズリの揺すり込みによる影響を明らかにできた。

謝辞：本検討はFLIPの改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立された一般社団法人FLIP コンソーシアムWGの活動の一環として実施されたものである。関係者の方々に謝意を表します。国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所および福島県には、本検討で対象とした港湾構造物の設計図書や被災後に実施された各種調査データ等をご提供いただき、また再現解析結果を評価する上で貴重なご助言をいただきました。独立行政法人港湾空港技術研究所の野津厚氏には、本検討で対象とした岸壁の入力地震動およびサイト増幅特性に関して貴重なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山喜昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二郎, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷺崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二: 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究資料, No.1231, 2011.4.
- 2) Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T :Strain Space Prasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 3) Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. International Journal for Numerical and Analytical Meth-

- ods in Geomechanics, Vol.35, No.3, pp.360-392,2011.
- 4) Iai,S. and Kameoka,T., "Finite Element Analysis of Earthquake Induced Damage to Anchored Sheet Pile Quay Walls", Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.71-91,1993.
 - 5) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y., and Abiko, K. :Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro Oki earthquake, Soil and Foundations, Vo..35, No.1, pp.115-131, 1995.
 - 6) 一井康二, 井合進, 森田年一: 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集(土木学会), pp.397-404, 1996年1月.
 - 7) 野津厚, 若井淳: 東日本大震災で被災した港湾における地震動特性, 港湾空港技術研究資料, No.1244, 2011.11.
 - 8) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.
 - 9) 山崎浩之, 後藤佑介, 小濱栄司, 大矢陽介, 楠謙吾: 繰返し荷重を受ける岩ズリの体積圧縮特性に関する実験, 第47回地盤工学研究発表会, 2012.
 - 10) 榊原務, 田代聡一, 曲伝軍, 大矢陽介, 飛田哲男: 東北地方太平洋沖地震における相馬港2号埠頭岸壁の液状化による被災程度の再現解析, 土木学会全国大会第68回年次学術講演会, 2013.
 - 11) 井合進, 龍田昌毅, 小堤治, 溜幸生, 山本裕司, 森浩章: 地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討, 土木学会第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 809-812, 2001.
 - 12) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
 - 13) 財団法人沿岸技術研究センター: 液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務【事例編】, pp. 3-3-26 - 3-3-398, 2011.

(2013. . 受付)

NUMERICAL SIMULATIONS FOR MARITIME STRUCTURES DAMAGED DUE
TO GROUND MOTION DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF
TOHOKU EARTHQUAKE
- WITH QUAY WALLS ANCHORED STEEL TUBE PILES AS ATARGET -

Keiichi SUMIYA, Tsutomu SAKAKIBARA, Soichi TASHIRO, Dengun KYOKU,
Eiji KOHAMA, Koji ICHII

In order to study the most suitable modeling for effective stress analysis of quay walls with anchored steel tube (or sheet) piles, some numerical simulations of damaged structures in the 2011 off The Pacific Coast of Tohoku Earthquake were conducted. In this case, the following two quay walls were selected as target, the Berth No.2(-14m) of Takasago Quay in Sendai-Shiogama Port and the Berth(-12m) of No.2 Quay in Soma Port.

In the analysis, the cocktail glass model developed from the strain space multiple mechanism model for granular materials was used. This model can consider the drainage effect during and after the shaking. It is important for the case with the ground motion of long duration, which was observed in the abovementioned earthquake. In addition, the settlement of the backfilled gravel layer was able to be assessed by using the model.