

## 8. 課題の整理

### 8-1 被災原因のまとめ

前章までの検討結果を基に今回の地震により被災を受けた主要な港湾施設、マリーナ栈橋、承水路の被災原因についてとりまとめると以下ようになる。

#### (1) 港湾施設

港湾施設の被災は、相対震度と法線移動量に相関関係が見られ、その相関関係は構造型式により相違が見られた。また、堤体、エプロンの沈下が見られた全ての施設において液状化が再現されており、沈下の要因が液状化であることが推測でき、概ね液状化層厚に対する沈下量の割合が1%~5%の範囲に分布していた。

また、被災の変形量は地震動の加震方向と岸壁等構造物の法線方向との位置関係に相関がある。

#### (2) マリーナ施設

当該施設は1号~3号栈橋までであるが、それぞれの地盤条件が異なることから被災の原因は、以下ようになる。

##### 1) 1号栈橋

地盤は液状化していない可能性が高く、栈橋の標準照査震度で求められる程度の慣性力が作用し、この作用力が杭の耐力以上となったため倒壊した。

##### 2) 2号栈橋

地盤の中層部が液状化した可能性が高く、その結果、地表面の加速度が減衰し、慣性力が低減した。そのため、作用力と杭の耐力が均衡し、倒壊したブロックと倒壊しなかったブロックが生じた。

##### 3) 3号栈橋

地盤の表層部が液状化した可能性が高く、杭の突出長が長くなり杭の耐力が減少した。また、地盤の表層部が液状化したことにより慣性力も低減したが、杭の突出長が長くなったことによる杭の耐力の低下の方が影響が大きく作用力の方が杭の耐力を上回ったため倒壊した。

#### (3) 承水路

地盤の表層部が液状化しなくて中層部が液状化した可能性が高く、設計荷重以上の慣性力が作用するとともに基礎地盤の支持力が不足したため、矢板が水平移動し、石積部が円形滑りを起こした。

地盤の中層部の液状化が広範囲に生じたため土砂が河床部に回り込み、河床を隆起させた可能性が高い。

## 8-2 再発防止策に関する整理

被災原因を基に被災の再発防止策を検討する。

被災の再発防止策としては、大きく分けて①地盤改良工法（主として液状化対策）及び②構造物の補強又は改良工法の2通りが考えられるが、今回の地震による被災原因は、地盤の液状化が主な原因であると考えられることから液状化対策工法について検討する。

現在、施工されている一般的な液状化対策工法としては以下の工法が挙げられる。

### (1) 締固め

- ・ サンドコンパクションパイル工法
- ・ ロッドコンパクションパイル工法
- ・ 動圧密工法
- ・ バイプロタンパー工法
- ・ 静的圧入締固工法

### (2) 固結

- ・ 深層混合処理工法
- ・ 薬液注入工法
- ・ 生石灰パイル工法
- ・ 事前混合処理工法

### (3) 置換

- ・ 置換工法

### (4) 地下水位低下法

- ・ ディープウエル工法
- ・ 排水溝工法

### (5) 間隙水圧消散工法

- ・ グラベルドレーン工法
- ・ (人工材料による) ドレーン工法
- ・ (周辺巻き立て) ドレーン工法

### (6) せん断変形抑制工法

- ・ シートパイル工法
- ・ 地中連続壁工法

表-8.1.1 に上記の各工法の概要、特徴及び既設工作物への適用性等について整理したものを示す。

表-8.1.1 液状化対策工法比較表 (1/2)

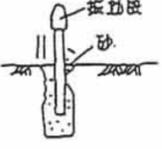
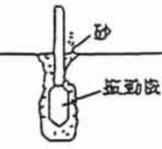
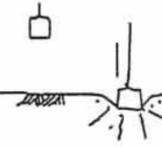
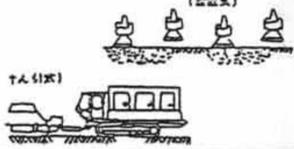
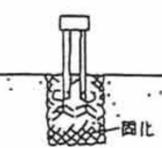
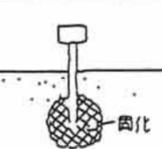
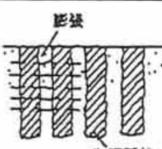
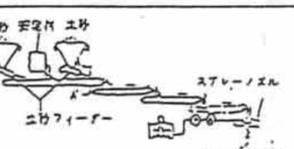
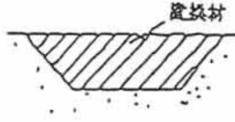
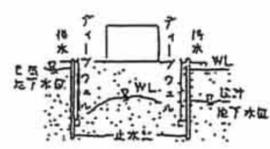
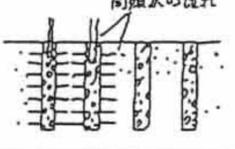
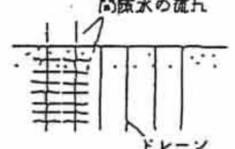
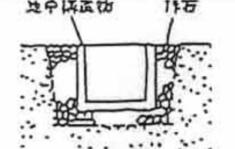
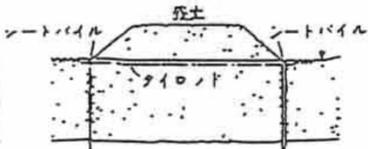
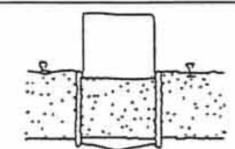
方法	工法名	工法の概要	特徴	既設工作物への適用性
締固め	1) サンドコンパクションパイル工法	振動による原地盤の締固めと原地盤への砂柱の圧入の両者により、地盤を締固めるものである。砂柱の圧入・締固めは、鋼管ケーシングを用いて行う。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>施工実績が最も多く、改良効果(液状化)に対する信頼性が高い工法である。</li> <li>締固めにより地震時発生する過剰間隙水圧が小さくなるので、締固め対策後の地盤に「ねばり」(材料靱性)が期待できる。</li> <li>6)を除いては、施工時、騒音、振動をとまなうため、周辺環境に及ぼす影響が比較的大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工機械が大規模となり、既設堤体の運用形態(交通など)への支障が大きい。</li> <li>振動・騒音が大きい。</li> </ul>
	2) ロッドコンパクション工法	種々の形状からなる鋼製ロッドを原地盤に振動圧入することにより緩い砂質地盤を締固めるものである。地表から砂をロッド周辺に補給することにより補給砂も地盤中に圧入される。ロッドには鋼管あるいはH鋼を使用。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>静的圧入締固め工法は、振動機を用いずに低振動・低騒音で締固めを行うため、既設構造物の近接での施工に適している。</li> <li>地盤中に砂や碎石からなる柱を形成するサンドコンパクションパイル工法、ロッドコンパクション工法、パイプフローテーション工法のような工法は、比較的大きな深さの改良が可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロッドを地盤中に振動圧入する工法であるため、振動・騒音が大きく、既設堤体への影響がある。</li> </ul>
	3) パイプフローテーション工法	振動体(パイプ・ワット)を先端に取り付けた鋼管を原地盤に圧入し振動と水締め効果を利用し地盤を締固めるものである。地表から碎石や砂利を補給することにより、補給材も地盤中に圧入される。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>地表面に重錘やタンパーを落下させることにより、地表面を締固める動圧密工法やパイプタンパー工法のような工法は、比較的安価に施工できるが、改良深度とともに改良効果が減少する傾向にある。</li> <li>動圧密工法は、細粒分含有率が高いほど、改良効果が減少する。</li> <li>最近では、締固め効果の向上を図った、新しい下記のような工法が開発、施工されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水平振動および水締めによる締固めを主体とするため、既設堤体への影響がある。</li> </ul>
	4) 動圧密工法	数十トンの重錘を10~40mの高さから地表面に繰返し落下させることにより発生する衝撃力で地盤を締固めるものである。(一般に深度10~15mまでを締固めるものである。)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>① 施工時の振動・騒音対策、側方変位、隣接既設構造物への影響の低減をはかるもの。(サンドコンパクション：セーブコンポーザー)</li> <li>② 施工時における過剰間隙水圧の除去を行って締固め効果の向上を図るもの。(ロッドコンパクション：テラシステム)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>振動及び衝撃が大きく既設堤体への影響がある。</li> </ul>
	5) パイプタンパー工法	強力な振動機とタンパーとの組み合わせにより、表面地盤を締固める工法である。		<ul style="list-style-type: none"> <li>振動が大きく既設堤体への影響がある。</li> </ul>
	6) 静的圧入締固め工法	静的な圧入により原地盤を締固める工法である。動的な締固め工法と比較して騒音・振動が小さくなる。		<ul style="list-style-type: none"> <li>施工機械が小規模となり低振動・低騒音で施工が可能である。</li> </ul>
固結	7) 深層混合処理工法	セメント・石灰などの固化材を原地盤と攪拌混合し、地盤を固結するものである。液状化する地盤をブロック状に改良する方法と地中壁を形成する部分的な改良などがある。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>固結した部分の改良効果(液状化)に対する信頼性は、一般に高い確実な工法である。</li> <li>低騒音・低振動の施工が可能である。</li> <li>セメント等の改良材の周辺に及ぼす影響については、事前に検討・留意しておく必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>狭い敷地でも施工可能。</li> <li>攪拌混合系改良は既設堤体直上からの施工となり、既存の運用形態(交通など)への支障が大きい。</li> <li>高圧噴射系改良は、スライム濁水の発生を伴い、周辺環境に与える影響が大きい。</li> </ul>
	8) 注入固化工法(薬液注入工法)	注入管を用いて、原地盤中にグラウトを注入し、地盤を固結するものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>改良材の経済性についても留意しておく必要がある。</li> <li>改良材と土を地盤中で攪拌混合する深層混合処理工法は、改良体自体は液状化に対する信頼性は高い。また、格子状改良のように地盤を部分的に改良する場合、改良体で囲まれた未改良部分については、せん断変形抑制効果により、液状化が生じにくくなることが期待できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的細い注入管を用いるため、既設堤体の復旧が容易である。</li> <li>振動・騒音は少ない。</li> </ul>
	9) 生石灰パイル工法	生石灰杭を原地盤中に形成し、硬化後における杭としての抵抗に期待するとともに、吸水硬化時に体積膨張する性質を利用して原地盤の密度増加を期待するものである。		<ul style="list-style-type: none"> <li>既設堤体直上からの施工となり、既存の運用形態(交通など)への支障が大きい。</li> </ul>
	10) 事前混合処理工法	埋立て土砂に事前にセメントなどの改良材を混合した改良土をそのまま運搬搬入し埋立てを行うものである。そのため、埋立て後の液状化対策が不要となる。		<ul style="list-style-type: none"> <li>既設堤体撤去が必要となる。</li> </ul>

表-8.1.1 液状化対策工法比較表 (2/2)

方法	工法名	工法の概要	特徴	既設工作物への適用性
置換	11) 置換工法	液状化が発生しにくい材料(碎石、セメントを混合した砂等)により、原地盤を置き換えるものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・新設の場合、比較的簡単に施工ができる。</li> <li>・良質の置換材料が改良体積と同程度必要となるため、液状化対象域が比較的浅く局所的な場合に用いられる。</li> <li>・置換した材料には転圧が必要な場合がある。</li> <li>・施工時、地下水位が高い場合、止水する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既設堤体撤去が必要となる。</li> </ul> <p style="text-align: right;">×</p>
地下水位低下法	12) 地下水位低下工法 (ディープウェル工法)	構造物の周囲を止水壁で囲い、その内部の地下水位をディープウェルなどにより低下させるものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・施工場所の条件が良ければ、比較的広い領域の改良ができる反面、地下水位低下にともなう生じる地盤沈下に留意する必要がある。</li> <li>・ディープウェル工法と止水工を併用して排水ポンプを用いる方法は、 <ul style="list-style-type: none"> <li>① 対象とする砂層下の不透水層まで対象範囲周辺を止水壁(セメント系固化が多い)を形成する必要がある。</li> <li>② 長期間地下水位を維持するためのポンプの維持管理が必要である。</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・沈下変形を生じ、既設堤体への影響が大きい。</li> </ul> <p style="text-align: right;">△</p>
	13) 排水溝工法	トレンチ暗渠を利用し、自然流下による地下水位を低下させるものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設堤体直下の液状化層内に暗渠を設ける必要がある。</li> </ul> <p style="text-align: right;">×</p>	
間隙水圧消散工法	14) グラベルドレーン工法	ケーシングオーガーを用いて柱状に碎石柱(碎石パイル)を原地盤に形成し、地盤全体としての透水性を高めることをねらったものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・過剰間隙水圧消散工法は、密度増大工法による締め固めに比べ密度増加を伴わない為、地盤の「ねばり」が期待できない。</li> <li>→ グラベルドレーン打設地盤の「ねばり」に関し、ケーシングより排出される碎石を締め固めると同時に周辺地盤をも締め固めることにより、地盤密度をある程度増加させる工法も開発され、「ねばり」を高める試みがなされている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震時に沈下変形を生じる可能性がある。</li> <li>・既設堤体の上から密の改良が必要となり、運用形態(交通など)への支障が大きい。</li> </ul> <p style="text-align: right;">△</p>
	15) 人工材料によるドレーン工法	プラスチックなどの人工材料によるドレーンを原地盤中に圧入して排水柱を形成し、これにより地盤全体としての透水性を高めることをねらったものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・液状化防止に際し、ある程度の地盤沈下の生ずる可能性がある。</li> <li>・低振動、低騒音での施工が可能である。</li> <li>・ドレーンを地盤中に柱状、壁状にほぼ等間隔に設置して地盤の液状化防止をする場合、地盤の透水係数が小さ過ぎると、液状化防止効果が期待できない場合があり得る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震時に沈下変形を生じる可能性がある。</li> <li>・既設堤体の上から密の改良が必要となり、運用形態(交通など)への支障が大きい。</li> </ul> <p style="text-align: right;">△</p>
	16) 周辺巻き立てドレーン工法	地中構造物の周辺埋戻しに礫・碎石材料を用いて構造物直下の地震時の過剰間隙水圧の上昇を抑制し、浮き上がりを防止するものである。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設撤去が必要となる。</li> </ul> <p style="text-align: right;">×</p>	
せん断変形抑制工法	17) シートパイル工法	液状化による盛土直下および周辺地盤の強度低下にともなう側方流動をタイロッドとシートパイルにより防ぐことにより、盛土の沈下変形を抑制する。	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・単独の液状化対策工法として用いられる事は殆ど無く、地下水位低下工法と併用したり、また、液状化時の被害を低減させる効果を期待して適用する 경우가一般に多い。</li> <li>・改良効果(液状化)の定量的な評価が比較的困難である。(模型実験あるいは数値解析により対策効果の確認要あり)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既設堤体内に、タイロッドを設ける必要がある。</li> </ul> <p style="text-align: right;">×</p>
	18) 地中連続壁工法	建物の外周に剛性の大きい連続地中壁を設置し、せん断変形を抑制するものである。(杭と併用して地震時の変形を抑えることも可能。)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・合理的で実用的な設計手法(簡便な設計法)が確立されていない。</li> <li>・シートパイル工法は、直下の液状化対策が不可能な既存構造物への対策として有利である。</li> <li>・連続地中壁工法は、構造物建設時の止水も可能になる点が有利である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大規模な施工機械と大規模な仮設が必要となる。</li> <li>・河口付近のため、海上施工が困難である。</li> </ul> <p style="text-align: right;">△</p>

### 8-3 今後の施設建設・維持管理

本業務の検討結果を踏まえて、今後の施設建設・維持管理について以下の留意点が考えられる。

#### (1) 液状化対策

- ・ 港湾区域内、特に埋立地での施設については、施設の規模に関わらず地盤の応答解析を実施し、液状化の予測・判定を行い、地震の規模に対する液状化の可能性及びその程度を把握しておく。
- ・ 液状化の予測・判定結果に基づき施設の重要度に合わせた液状化対策工法の必要性和その規模を検討する。その際、液状化対策にかかる費用、液状化による被災変形量、被災を復旧する際の費用等を比較検討し、総合的に対応策を決定する必要がある。

具体的には、①小規模又はあまり重要でない施設については、地盤が液状化した時の被災状態を想定し、復旧対策が容易な構造とする。②耐震強化施設以外の港湾施設についても主要なものを選定し、被災時に機能維持ができる程度の地盤の液状化対策を講じておく。

#### (2) 構造物対策

- ・ 栈橋については、基礎杭として鋼管を使用し、設計荷重以上の水平力が作用しても全面的に倒壊しないような構造形式とする。
- ・ 構造形式によっては、地震の規模、種類（直下型、プレート型）により被災の程度が異なることが予想されることから、今後は多種多様な構造形式による施設建設を行い、地震の規模、種類に応じた被災量の軽減を図っていく必要がある。
- ・ 対象となる断層の向きから地震動の加震方向を想定し、岸壁等の施設法線の向きとの位置関係を考慮した対策工法の検討を行う必要がある。

## 港湾空港技術研究センター指導議事録

## 設計打合せ・協議記録簿

第 1 回				追 番	—	第 1 頁	
発注者印	監査員		担当者	受注者印	照査技術者	管理技術者	担 当 者
発注者名	沿岸開発技術センター			受注者名	パシフィックコンサルタンツ株式会社		
件 名	港湾施設地震被害解析調査委託 鳥取県西部地震に関する調査整理業務			Job #			
日 時	平成13年 7月23日 (月)			10時00分 ~ 15時00分			
場 所	港湾空港技術研究所			打合せ方式	会議		
出席者	研究所側	港湾空港技術研究所 動土質研究室 山崎室長、井合特別研究官 (防災)					
	発注者側	沿岸開発技術センター 小竹技師					
	受注者側	新井 稲井 森崎 西村 大池					
<p>※業務のとりまとめにあたり、港湾空港技術研究所にて打合せを行い指導を受けた。内容は以下のとおり。</p> <p>1. 動土質研究室 山崎室長</p> <p>(1) 入力地震動について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地表面波形を基盤に戻す作業を構造振動研究室 野津室長の方で行っている可能性があるため、ヒアリングすること。</li> </ul> <p>(2) 港湾施設の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・米子港旗ヶ崎岸壁の再現解析ではエプロン部が液状化せず、実際の被災状況とあわないため、せん断波速度が小さい洪積粘性土についてひずみ依存曲線を変更したり、簡易推定法より検討を行うこと。</li> <li>(阪神淡路大震災を対象とした再現解析においても加速度が大きく減衰し、実際の加速度記録と合わなかったことから、ひずみ依存曲線を変更した。SHAKEによる解析では、ひずみが大きくなると実状と合わなくなる点に留意すること。)</li> </ul> <p>(3) 承水路の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・再現解析では地表面は液状化せず、実際の被災状況と合わないため、簡易推定法、石原の図を参考に検討すること。</li> </ul> <p>(4) マリーナ栈橋の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・PC杭の検討を構造強度研究室の横田室長のところで行っている可能性があるため、ヒアリングすること。</li> </ul> <p>2. 井合特別研究官 (防災)</p> <p>(1) 入力地震動について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・業務の目的を明確にすること。業務の目的が再現解析であれば、大船渡波、八戸波、P I 波による解析は参考扱いとするなど区別すること。</li> <li>・入力地震動を見直すこと。</li> </ul> <p>(2) 港湾施設の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・解析対象となる施設の管轄を整理し、必要であれば管理者に了承をとっておくこと。</li> <li>・P. 16の土質断面図に高さを表記すること。</li> <li>・BP-1を対象とした次元解析モデルで、下層にBP-2のデータを用いた旨を示すこと。</li> <li>・岸壁法線方向の被災変形量の分布を平面図上に示すこと。</li> <li>・被災変形量の算出は、重力式岸壁については簡易耐震性能照査による方法でよいが、その他の施設については適用しないこと。下水道指針の方法および時松・シードの方法は、水平成層地盤を対象としているため、適用する際には注意すること。</li> </ul>							

(3) 承水路の再現解析について

- ・液状化判定に用いた粒径加積曲線図を示すこと。
- ・竹内工業団地の土質試験データを収集・整理・吟味し、土質定数を設定すること。

(4) マリーナ棧橋の再現解析について

- ・棧橋の作用水平震度は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示す“標準照査震度”から算定すること。
- ・動的解析を実施すること。

## 設計打合せ・協議記録簿

第 2 回				追 番	—	第 1 頁	
発注者印	監査員		担当者	受注者印	照査技術者	管理技術者	担 当 者
発注者名	沿岸開発技術センター			受注者名	パシフィックコンサルタンツ株式会社		
件 名	港湾施設地震被害解析調査委託 鳥取県西部地震に関する調査整理業務			Job #			
日 時	平成13年 9月18日 (火)			13時00分 ~ 16時00分			
場 所	港湾空港技術研究所			打合せ方式	会議		
出席者	研究所側	港湾空港技術研究所 動土質研究室 山崎室長、井合特別研究官 (防災)					
	発注者側	沿岸開発技術センター 小竹技師					
	受注者側	稲井 森崎 西村 大池					
<p>※業務のとりまとめにあたり、港湾空港技術研究所にて打合せを行い指導を受けた。内容は以下のとおり。</p> <p>1. 動土質研究室 山崎室長</p> <p>(1) 港湾施設の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・液状化層厚と作用震度の関係をグラフ化することもできたのではないと思われる。</li> </ul> <p>(2) マリーナ栈橋の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・P. 38について、表の内容と文章に書かれていることが異なる。まとめ直す必要がある。</li> </ul> <p>(3) 港空研での協議の位置づけ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・議事録として残すの方法がいいのではないと思われる。特に本文にコメントは行わない方がよいと思われる。</li> </ul> <p>2. 井合特別研究官 (防災)</p> <p>(1) 港湾施設の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・荒島の観測点では地表面最大加速度は300gal程度が観測されており、現在検討されている境港の地表面最大加速度では値が小さい。</li> <li>・この修正方法としては、現在の検討に用いている入力地震動を、気象庁観測所と荒島観測所の基盤に入力してSHAKEの検討を行い、地表面最大加速度がどの程度の値になるか検討を行う。その値が今検討されている境港の値と合わない場合は、修正を行うものとし、修正方法としては以下の3パターンが考えられる。</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 考察に地表面最大加速度が小さい旨を記述する。</li> <li>② 粘性土が厚い場合、強振観測地点の値を用いる。</li> <li>③ ひずみ・依存カーブを変えて再検討する。 (特に加速度が大きく減衰しているところについて)</li> </ol> <p>(2) マリーナ栈橋の再現解析について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・3号栈橋について海底面の地盤が液状化したのなら、もっと深い場所で栈橋が折れているはずである。</li> </ul> <p>(3) 港空研での協議の位置づけ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本文に残しても構わない。沿岸センターの部長に再度確認する必要がある。</li> </ul>							

