

四国臨海部の液状化対策について

大川 大一*・福岡 正**・高尾 俊輝***・小椋 卓実****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省 四国地方整備局 港湾空港部 港湾物流企画室 課長補佐

**** 国土交通省 四国地方整備局 港湾空港部 港湾物流企画室係長

四国沿岸域は、切迫する東南海・南海地震による危険に晒されていることから、港湾施設等の耐震化が課題となっている。また、臨海部には、火力発電所やLNGタンク等重要施設が数多く立地しており、近い将来の発生が懸念されている大規模地震時に、本州から陸路による物資輸送が困難となるリスクを考慮すると、臨海部の地震被害予測と適切な対策について検討しておく必要がある。

本稿は、四国における臨海部の液状化予測とその対策に関する検討について報告するものである。

キーワード：液状化対策、二次被害、事前対策、事後対策

1. はじめに

四国は、周囲を海に囲まれ、人口や産業、エネルギー供給拠点が沿岸部に集中している地域であり、生活、経済、産業を支える重要な役割を港湾が担っている。臨海部の生命・財産を守り、災害時の緊急輸送を支えるため、更には、経済活動を支える海上輸送機能の維持を図ることにより地域の雇用とくらしを守るために、港湾において地震・津波対策を実施することが重要である。

地域別に被害状況を見たとき、四国の太平洋側における被害は、避難のための時間を確保できない可能性があるなど、巨大津波により人命・財産が失われることが想定される。

他方、瀬戸内海側等の臨海部においては、埋立地の土質性状等をもとに検討すると、液状化が大きく生じると予想されている。このことから、太平洋側に比べると津波の高さは低いものの、地震の揺れや臨海部の液状化による港湾施設や海岸保全施設の損傷・倒壊、それに伴う浸水被害の拡大等が懸念される。特に、臨海部の埋立地に多く立地している物流ターミナルや工場など、物流・産業において重要な施設への液状化による被害が生じるおそれがある。さらに、陸上からの輸送ができない瀬戸内海の離島においては、港湾施設の被害により船舶が着岸できず海上輸送に支障が生じること等が危惧される。

このような状況において、平成23年3月11日発生の東日本大震災の後、平成23年7月6日に交通政策審議会港湾分科会防災部会にて「港湾における総合的な津波対策のあり方」(中間とりまとめ)の公表、また、平成23年7月25日には四国東南海・南海地震対策戦

略会議において「四国地震防災基本戦略」(中間とりまとめ)が公表された。これを受けて『四国の港湾における地震・津波対策検討会議』を設置し、平成25年3月29日に「四国の港湾における地震・津波対策に関する基本方針」がとりまとめられ、アクションプログラムが公表された。

本稿は、『四国の港湾における地震・津波対策検討会議』の作業部会である「四国臨海部液状化対策検討ワーキンググループ」において検討を行った、四国臨海部における液状化予測とその対策について報告するものである。

2. 液状化予測による被害想定

2.1 液状化予測をする港湾及び施設について

災害時において、港湾に求められる機能としては、①緊急物資を一刻も早く搬入する。②エネルギーの供給を確保する。③港湾の安全性を確保する。ことが考えられる。このような観点から、液状化予測を行う箇所について、以下の施設のある港湾を検討対象とする。

①フェリー岸壁・耐震岸壁：

緊急物資輸送機関として期待されており、岸壁及び埋立地は災害時の様々な機能を期待されている。

②エネルギー関連施設(護岸、背後用地等)：

港湾施設や航路周辺に立地し、被災により航行船舶等への影響や当該施設の機能を損なうと背後圏住民への生活に重大な影響をあたえる。

③臨港道路：

緊急物資輸送として海上からの物資を目的地である背後圏へつなぐ施設としての機能を期待されている。

上記を考慮し、検討対象港湾を表-1に示す。

表-1 検討対象港湾

港湾	施設	形式	特徴
A港	岸壁-8.5m	重力式	フェール岸壁
B港	精油所護岸	重力式	背後にエネルギー施設有り
C港	岸壁-7.0m	重力式(HB)	背後にエネルギー施設有り
D港	岸壁-5.5m	控え矢板式	フェール岸壁
E港	護岸	傾斜式護岸	背後にエネルギー施設有り

2.2 岸壁・護岸の変形量の想定

(1) チャート式耐震診断システムによる評価

今回の液状化予測は、チャート式耐震診断システム¹⁾を用いて、南海トラフの巨大地震モデル検討会で検討されている新しい地震動により評価する。適用する地震動（速度のPSI）は、東日本大震災（M9.0相当）に基づいて、独立行政法人港湾空港技術研究所 野津チームリーダーにより作成されたSPGAモデルの非超過確率50%となる地震動を入力地震動²⁾とする。

(2) 計算結果

表-2の通り、液状化の影響により、C港、D港、E港で大きな残留変形が想定される。このうちC港とE港の背後には、エネルギー施設（タンク等）が有り、特に護岸に近いE港の石油タンクについては影響が大きい事が想定される。なお、チャート式耐震診断システムは、変形量が大きくなったり、誤差が大きい場合もあり、一般的に安全サイド（大きめの変形量）の値を示す傾向にある。よって、下記の計算結果についてさらなる精度を求める場合には、FLIPによる詳細検討が必要である。

表-2 チャート式耐震診断システムの結果

港湾	沈下量* X	水平変位量 Y
A港	X < 50cm	Y < 100cm
B港	X < 50cm	Y < 100cm
C港	50cm ≤ X	100cm ≤ Y
D港	X < 50cm	100cm ≤ Y
E港	50cm ≤ X	

※：沈下量は地震による沈下量と排水沈下量を合計した値。

2.3 臨港道路に沈下量の想定

(1) 沈下量の推定

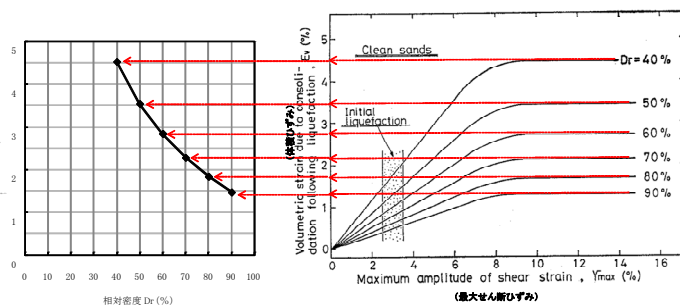
臨港道路の沈下量は、別途実施された【高松港等における埋立地の液状化予測手法検討会】（国土交通省高松港湾空港技術調査事務所）の資料をもとに液状化の沈下量を用いて評価する。液状化による沈下量は、液状化時の体積ひずみと液状化層厚から算出する。

$$\text{沈下量} = \text{体積ひずみ} \times \text{液状化層厚}$$

液状化層の液状化による体積ひずみ量は、(図-2 右側)に示す石原らの研究成果³⁾より相対密度 Dr に対する体積ひずみ量を整理し設定する。設定では、安全側に液状化時の最大せん断ひずみ10%程度の体積ひずみを抽出し、相対密度-体積ひずみ関係をプロットした(図-1 左側)。なお、相対密度 Dr は以下の式を用いて N 値と有効上載圧から換算した。

$$Dr = 0.16 \sqrt{(170N) / (70 + \sigma_v')}$$

N : N 値 σ_v' : 有効上載厚 (kPa)

図-1 相対密度 Dr と体積ひずみの関係¹⁾

(2) 計算結果

液状化による沈下量を推定した結果(表-3)、E港以外は想定沈下量が25cm以上と推定された。

臨港道路は重要な輸送経路であり、かつ、発災時には避難経路にもなるため、重要な施設である。

応急復旧として考えられる土嚢や敷き鉄板による対応により事後対策を行うことが基本となるが、50cm以上と想定されるC港とD港は特に液状化による被害は大きいと想定されるため、事前対策による検討が必要と考えられる。

表-3 想定沈下量の結果

港湾	地区(想定箇所)	推定沈下量 X
A港	O地区	25cm ≤ X < 50cm
B港	B地区	50cm ≤ X
C港	T地区	50cm ≤ X
D港	M地区	X < 25cm
E港	T地区	25cm ≤ X < 50cm

3. 液状化による二次被害の影響について

過去の地震において、液状化の影響と思われる二次災害により、安全性の低下、物流の停滞、経済性の低下について、分類し整理をしたものを表-4に示す。

表-4 二次被害の概要

項目	直接被害, 原因	二次被害
安全性の低下	タンクの損傷による危険物の漏洩	全施設の安全性確認に時間を要する
	石油等の流出	拡散防止・撤去まで周辺海域の航行禁止
	貨物等の水没・流出・浮遊	船舶航行の禁止
	通信不能	船舶待避行動の遅れ
物流の停滞	岸壁の損傷	緊急物資輸送船舶の接岸不可
	エプロンの陥没	荷役作業の不可
	幹線道路の陥没	陸上輸送の停止
	代替港の利用	代替港での急激な貨物量増加により、物流が停滞し、輸送が遅れる
経済性の低下	代替港の利用	他港利用により輸送ルートの変更、積替え等によるコストアップ

よって、上記より二次被害対策として、物流への対応及びエネルギー関連施設の安全対策等のために、係留施設及び護岸の耐震強化対策が、必要と考えられる。

4. 液状化への事前対策工法について

構造物に近接した地盤の液状化対策には、留意する事項が多い。締め固め工法は、施工時に地盤内に振動を与えるため、矢板付近では悪影響を及ぼす危険性がある。過剰間隙水圧消散工法は、安価で施工実績も多いが、主に圧密沈下への対策が主流である。深層混合処理工法は、固結工法としては比較的安価で施工実績も多く、改良効率も良好であるが、機械攪拌のため既設構造物への影響が大きいため、近接施工は困難である。

近年では、液状化対策工法として新しい技術が開発され、そのひとつに液状化層内に空気を送り込み地盤を不飽和化する空気注入不飽和化工法が挙げられる。原理は液状化が発生する可能性がある地盤に空気を直接注入する事によって、地盤を不飽和化させ、注入終了後、残留する空気により地盤の液状化強度を増加させる事で液状化を抑制する。図-2は、そのイメージである。

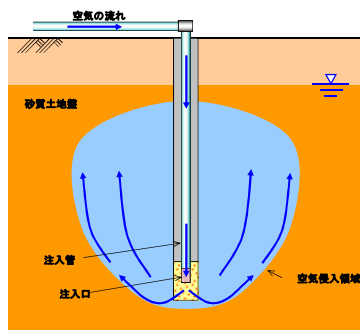


図-2 空気注入不飽和化工法のイメージ

4.1 事後の迅速な復旧対策について

液状化による局所的な大変形（段差、陥没、ひび割れなど）に対する緊急対応としては、図-3のように土

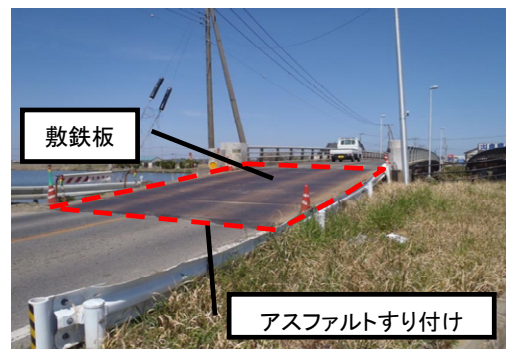
のう、盛土や敷鉄板などによる対応により迅速な利用再開が可能である。



三陸道における対応（東北地方太平洋沖地震）

出典：国交省仙台河川国道事務所

三陸道維持出張所HP



利根川沿い田浦橋の対応（東日本大震災）

出典：水郷BASSHP

図-3 事後対策状況

4.2 迅速・確実な資材調達方法について

(1) 迅速な事後対策が必要な地点の把握

重要な荷捌き地や臨港道路（橋梁との取り合い部、埋設管など）などで局所的に大変形しやすい危険箇所を事前に把握（リストアップ）しておくとともに、対策について想定しておく必要がある。

(2) 事後対策資材の調達可能量の把握

通常、資材を調達している企業等へのヒアリングなどにより、必要資材（砂、砕石、鉄板、土のう袋など）の調達可能量を把握しておくとともに、緊急時に対応可能であるかを確認しておくことが必要である。また、事後対応や資材調達に関し企業間で災害協定等の締結、協議を事前にしておく必要がある。

(3) 緊急時対応としての備蓄等の検討

緊急時に、必要資材の調達が見込めない場合は、周辺の状況を考慮し、必要資材の備蓄などの対応を検討しておくことも必要だと思われる。また、他の部局（道路部局等）と事前に資材情報を情報共有し、連携を常に行うとともに、発災時の必要資材の融通等の迅速な事後対策を想定し、関係機関と調整しておくことも必要と考えられる。

5. 液状化対策の優先度の考え方について

5.1 液状化対策の優先度の考え方について

液状化対策については、施設の災害発生後の復旧の優先度に応じ、方針を検討する。南海トラフの巨大地震モデル検討会によると、四国の臨海部は全域にわたり液状化の危険があるとされることから、災害発生後の海上輸送において重要な埠頭の全てを対象に検討を行う必要がある。この考え方をまとめたものを図-4に示す。

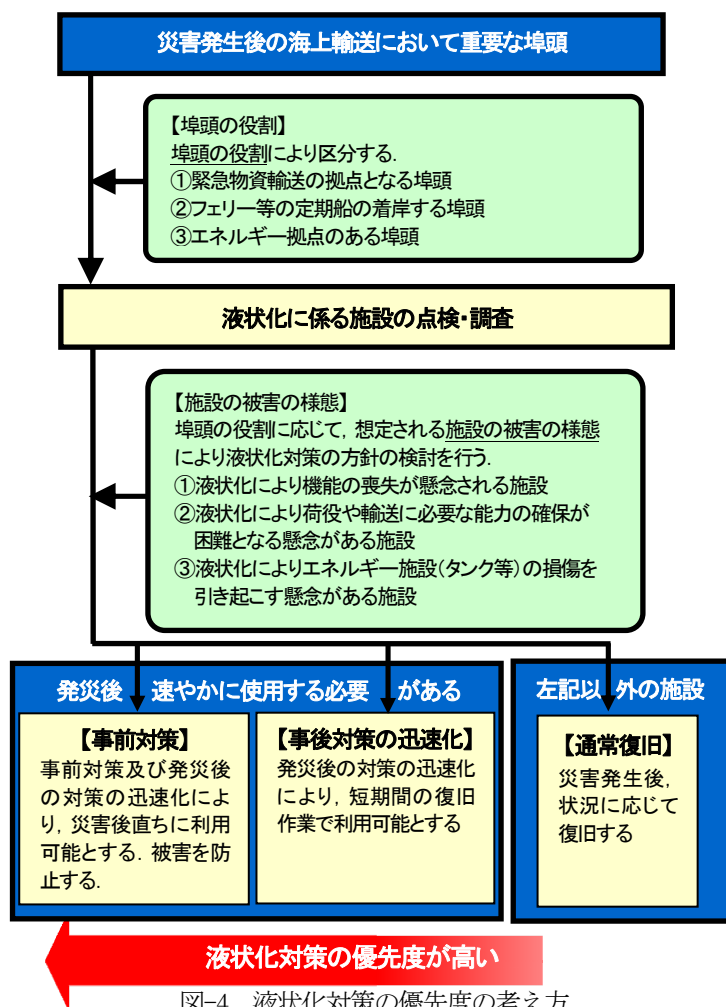


図-4 液状化対策の優先度の考え方

5.2 液状化対策の検討フローの考え方について

埠頭の役割により①緊急物資輸送の拠点となる埠頭、②フェリー等の定期船の着岸する埠頭、③エネルギー拠点のある埠頭に区分した検討フローの考え方をイメージ(案)を以下に示す。

(1) 緊急物資輸送の拠点となる埠頭

緊急物資輸送の拠点となる埠頭における判定フローを図-5に示す。

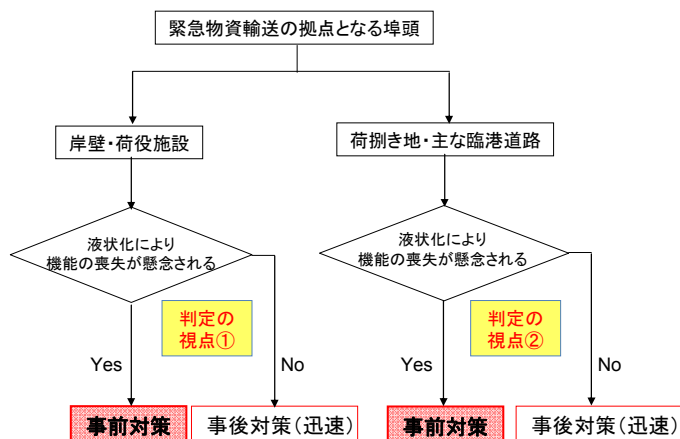


図-5 緊急物資輸送の拠点となる埠頭の判定フロー

・判定の視点①

(事前対策)：係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が大きく係船や荷役作業が期待できない被害が想定される場合。

(事後対策(迅速))：係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が小さく応急復旧などの対応で係船や荷役作業が行えると想定される場合。

・判定の視点②

(事前対策)：エプロン上の段差が大きく、広範囲に被害の影響を受け、落橋や段差、陥没が大きく応急復旧で対応できない被害が想定される場合。

(事後対策(迅速))：エプロン上の段差や陥没などの被害は発生するが応急復旧での対応が可能と想定される場合。

(2) フェリー等の定期船の着岸する埠頭

フェリー等の定期船の着岸する埠頭(緊急物資輸送の拠点でない)における判定フローを図-6に示す。

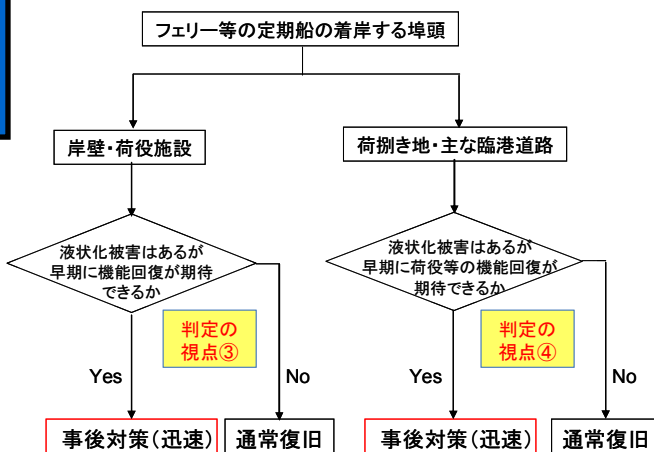


図-6 フェリー等定期船の着岸する埠頭の判定フロー

・判定の視点③

(事後対策(迅速))：係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が小さく、応急復旧による対応で係船や荷役作業が期待できる程度の被害が想定される場合。

(通常復旧)：係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、

傾斜角が大きく、応急復旧で対応できない程度の被害が想定される場合。

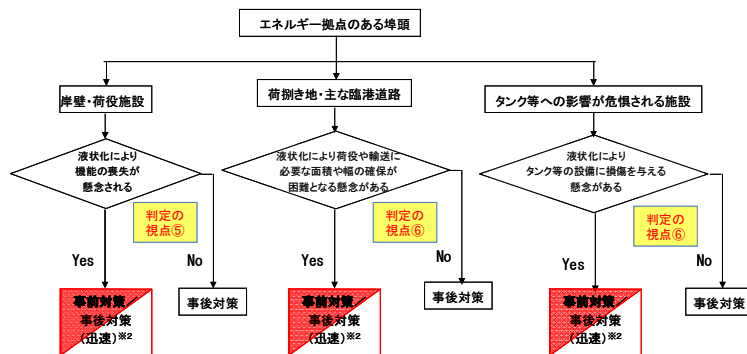
・判定の視点④

(事後対策 (迅速)) : エプロン上の段差や陥没などの被害は発生するが、応急復旧による対応が想定される場合。

(通常復旧) : エプロン上の段差や陥没など応急復旧で対応できない程度の被害が想定される場合。

(3) エネルギー拠点のある埠頭

エネルギー拠点のある埠頭における判定フローを図-7に示す。また、エネルギー拠点のある埠頭については、エネルギーの供給エリアなど影響力の大きさにより施設の対策を考慮する必要が考えられる。



※2 液状化による被害程度や施設の重要度等に応じて判断

図-7 エネルギー拠点のある埠頭の判定フロー

・判定の視点⑤

(事前対策/事後対策 (迅速)) : 係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が大きく、係船やエネルギー関連設備への供給作業が行えない被害が想定される場合。

(事後対策) : 係留施設の残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が小さく、応急復旧などの対応で係船や荷役作業が行えると想定される場合。

・判定の視点⑥

(事前対策/事後対策 (迅速)) : 落橋や荷捌き地の段差や陥没が大きく応急復旧で対応できない被害が想定される場合。

(事後対策) : 段差などの被害が発生するが応急復旧での対応が可能と想定される場合。

・判定の視点⑦

(事前対策/事後対策 (迅速)) : 施設が残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が大きく、被害を受けることで、背後のエネルギー施設への破損や影響が想定され、周辺への二次被害などが想定される場合。

(事後対策) : 施設が残留水平変位や残留鉛直変位、傾斜角が小さく、被害を受けても応急復旧などの対応で背後のエネルギー施設への影響の心配が無い場合。

また、液状化の被害による施設利用の可否を判断する目安の一例を表-5に示す。表-5はあくまで、使用性

能・復旧性能から考えられる施設変形の目安である。

(重力式構造の場合)

表-5 施設変形量の目安の一例

地震後に求められる性能	照査項目	変位量の限界値	備考
①船舶接岸の安全性	・残留水平変位	85cm～160cm	日本地震工学シンポジウム1998(地震時における重力式岸壁の許容被災変形量の評価)
②荷役作業の安全性	・残留鉛直変位 ・傾斜角 ・エプロン上の段差	20cm～30cm 3°～5° 3cm～10cm	沿岸ライブラリーNo.26(港湾の施設の維持管理マニュアルH19)
③荷役機械の走行性	・エプロン上の段差	3cm～10cm	

6. おわりに

本稿は、国土交通省四国地方整備局港湾空港部発注の四国臨海部液状化対策検討業務の成果の一部をまとめたものである。本調査は、港湾管理者が施設の液状化対策を実施する上での方針を示し、更に対策を検討する上での、個別施設の優先度の考え方をフロー形式で示したものである。ただし、液状化対策を実施する個別施設の優先度には、このフローだけでは判断できない液状化の被害程度や施設の重要度等に応じて個別に判断する必要がある。今後は、液状化対策が着実に前に進むよう適宜見直し、我が国の液状化災害の低減の一助になることを切に願う。

謝辞

本調査にあたっては、四国臨海部液状化対策検討ワーキンググループ(座長:徳島大学 渦岡教授)の各委員、四国地方整備局 港湾空港部、高松港湾空港技術調査事務所の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 国土交通省港湾局: チャート式耐震診断システムの概要(ホームページ)
- 港湾空港技術研究所地震動研究チーム: 南海トラフの地震(Mw9.0)を対象としたSPGAモデルによる地震動の評価(ホームページ)
- Kenji Ishihara and Mitsutoshi Yoshimine: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soil AND FOUNDATIONS, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188, Mar, 1992, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- 関谷千尋・福岡正・小泉勝彦・岡田克寛: 地震時不飽和化による液状化対策工法(Air-des工法)について, 沿岸技術研究センター論文集No.12, pp61～64, 2012.