地震・津波の複合災害に耐える鋼矢板堤防補強法に関する研究

古市 秀雄¹, 原 忠², 谷 美宏³, 西 剛整⁴, 乙志 和孝⁵, 戸田 和秀⁵

- 1 (株) 技研製作所 工法事業部
- 2 高知大学 総合研究センター防災部門
- 3 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科
- 4 (株) CPC 東京支社
- 5 新日鐵住金(株)建材開発技術部

概 要

2011年の東北地方太平洋沖地震以降,発生確率の高い南海トラフ地震等の巨大地震への備えとして各種土 木構造物の防災・減災技術に関する研究開発が進められている。海岸保全施設には強い揺れと津波の複合 災害に対応可能な構造安定性が求められており,既設施設の補強を迅速に行うためには,限られた予算の 範囲内で迅速に施工できる合理的な対策工法を確立する必要がある。著者らは,堤防補強の一手法である 二重鋼矢板構造に着目し,数値解析から耐震・耐津波性能を検証した。一連の研究結果から,液状化により 地盤中の過剰間隙水圧が残存する条件下での越流津波作用時の構造挙動を分析し,地震と津波が連続的に 作用する場合に対する対策工としての有効性を示した。また,二重鋼矢板構造による堤防補強法の構造安 定性を照査する項目を整理し,発災直後から復旧に至る過程での堤防天端の活用法の具体策を提示した。

キーワード:地震,津波,堤防,鋼矢板,複合災害

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震以降,発生確率の高い南 海トラフ地震等の巨大地震への備えとして各種土木構造 物の防災・減災技術に関する研究開発が進められている。 海岸保全施設には、地震と津波の複合災害に対応可能な構 造安定性が求められており1),発生頻度の高い津波に対し ては可能な限り構造物で人命と財産を守る防災を,発生頻 度の高い津波の規模を越える津波に対しても粘り強く減 災効果を発揮できる構造物の必要性が耐津波設計ガイド ライン等に示されている23)。特に,南海トラフ地震により, 強い揺れと津波による被災が予測される高知県沿岸部で は、海岸保全施設の耐震・耐津波化は喫緊の課題ではある が,発生頻度の高い津波に対して堤防高さが不足する施設 の総延長は約145km(県管理堤防全長の約73%)との結果 も公表されており4)、既設施設の補強を迅速に行うために は、複合災害に対する性能を満足しながら、限られた予算 の範囲内で迅速に施工できる合理的な対策工法を確立す る必要がある。

先般の東北地方太平洋沖地震においても沿岸域に位置 する海岸・河川堤防に甚大な被害が生じており⁵),これら 経験を基に河川堤防での被害の特徴や被災要因,適切な復 旧工法等が纏められている⁶。特に,2011年東北地方太平 洋沖地震以降,揺れによる液状化に起因する被災事例解析 が複数の研究機関で進められ⁷⁾⁸,津波被害に関しても盛土 構造や立地条件との関係,洗掘による影響等が検証されて いる⁹⁾¹⁰⁾。さらに,被災要因の分析を基に地震や津波の複 合災害に対応可能な堤防保全の考え方についても研究が 進められており¹¹⁾¹²⁾,粘り強い構造体の性能評価法も提案 されている¹³⁾。

著者らは,揺れによる液状化や津波の複合災害に対応可 能な粘り強い海岸堤防の具体策として,優れた靭性を有す る鋼材料を活用した二重鋼矢板構造に着目し, 地震時の堤 体変状を抑制し, 地震後の高潮・津波に対しても遮水機能 が維持され,かつ想定外の津波に対して越流を許容した場 合にも崩壊せず堤内地の被害抑制が可能な補強法につい て研究を進めている。本構造は、二重鋼矢板で締め切られ た土堤との複合構造として地震や津波外力に抵抗するも ので、海岸堤防等の補強工法として既に供用されている14)。 本構造に関していくつかの研究が報告されており, 例えば 盛土構造物の液状化対策として矢板締切り工法に関する 研究が行われている15)。液状化地盤上の二重鋼矢板で補強 された堤防挙動については, 地震時に矢板が沈下せず天端 高さが維持されることが報告されている¹⁰。また、地震時 から高水時まで連続した模型実験により, 地震時や高水時 における本構造の対策効果と加振履歴が浸透特性に与え



a) 岩手県釜石市唐丹地区水門工事



b) 岩手県山田町織笠地区水門工事
 写真1 東北地方太平洋沖地震で被災を免れた
 二重矢板壁構造の事例²²⁾

る影響について検証されている17)。東北地方太平洋沖地震 以降, 主に海岸堤防を対象とした本構造に関する研究が行 われている。例えば巨大地震に対する構造挙動と対策効果 について、模型実験および有効応力解析 (code: LIOCA)を 用いた実験再現解析による検証が行われ,加速度振幅が大 きく継続時間が長い地震波形に対しても地震後に構造が 倒壊せず, 地震後に津波が到来した場合にも堤防機能が期 待されるとの知見が示されている18)19)20)21)。実際,写真1 に示すように岩手県内の仮締切り用途として供用されて いた二重矢板壁構造に関して, 天端高さを遥かに超える想 定津波高さ9mの津波被害を津波直交方向に受けた場合で あっても機能を維持し、倒壊せずに残存していたことが報 告されている22)。両地点での鋼矢板材料は一般的に用いら れるハット形鋼矢板や U 形鋼矢板であり、津波による中 詰土の流出や矢板前面地盤の洗掘が見られるものの鋼矢 板や頭部を接続するタイ材は健全な状態を保持していた。 その後の調査と数値解析による津波外力に対する再現計 算から、津波に対する構造安定性が概略評価されている。

既往の一連の研究により,地震や津波・高水など個別の 災害に対する本構造の有効性は示されてきた。一方,実構 造物の総合的な防災・減災性能の評価には,地震被害が生 じた後,盛土構造物の復旧が行われる前に津波が来襲する など,複合災害についても考慮する必要がある。

本研究では二重鋼矢板構造を用いた海岸堤防補強法の 耐震・耐津波性能を検証するため、代表的な堤防構造を抽 出した上で、地震から津波までの一連の被災要因を数値解 析で再現する。さらに、複合災害に対する二重鋼矢板構造 の補強効果(粘り強さ)と照査するための項目を堤体や鋼 矢板の変形の観点で整理し、発災直後から復旧に至る過程 での堤防天端の活用法の具体策を提示する。

2. 対象構造の抽出と本研究の流れ

2.1 海岸堤防の分類

既存の海岸堤防,護岸を対象とした調査により,構造様 式や法部構造形式,盛土形状など諸元毎にグルーピングさ れ分析された結果が纏められている。

a) 構造形式 (図1)

構造様式は前面水深との関連性が見られるも、表法部は 直立型が、裏法部は傾斜型形式が用いられることが多く、 法部についてはコンクリート被覆が施されることが主 流となっている(図2)。

b) 天端高・幅

天端高さは, 越波量あるいは波の打上げ高を考慮して決 定されている。また, 天端幅は, 堤体の安定性, 天端面 の利用状況等を考慮して決定されている。

c) 法面勾配

コンクリート被覆式の傾斜堤構造では,表法面勾配1:1.0 ~3.0, 裏法面勾配1:1.0~1.5 とされることが多い。





584

2.2 対象構造の抽出

本研究では、地震による液状化および津波の複合災害に よる影響を評価することに主眼を置き、出来る限り構造を 簡略化して不確定要因を排除することとし、表法部・裏部 ともに法面勾配 1:1.5 の左右対称な傾斜堤構造を検討対象 として設定した。これは、護岸・直立壁構造では陸側から の偏土圧が作用し挙動が複雑となることや、傾斜堤を対象 とした耐震照査などの各方面での研究が進んでおり、従来 知見も活用の上、津波・複合災害に対する挙動評価を考え たためである。

2.3 検討フロー

2.3.1 性能照査フロー

本研究での性能照査フローを図3に示す。一般的な実務 設計では^{例えば25}),はじめに構造の要求性能を整理し限界状 態を明確にした上で照査項目としての工学的指標が設定 される。次に,構造物の変形を予測し事前に設定した工学 的指標から無対策時における耐震・耐津波性能照査が行わ れる。ここで変形等が大きく堤体に求められる性能が満足 されない場合には,合理的な対策工の準備が必要となる。 対策工を講じた場合の構造性能照査について,構造挙動と 対策効果,経済性等の複数の観点を検証し工法が決定され る。本研究では,提案する対策工の効果と構造挙動の検証 に着目し,地震から津波まで一貫した構造性能評価手法を 検討した。

2.3.2 本研究での解析評価手法

本研究における地震から津波までの一連の複合災害を 対象とする解析評価手法を以下に示す。

a) 液状化予測

揺れによる地盤液状化予測のために全応力条件で動的 解析(code:Soil+²⁶)を行い,地盤内の地震時せん断応力 を算出した。ここで算出されるせん断応力と,技術指針²⁷⁾ に基づくせん断強度の比から液状化抵抗係数 *FL* 値を算出 し,地盤内の液状化分布として設定した。また,この液状 化分布より静的解析(流動変形解析 code:ALID²⁸⁾)を用い て流動変位予測を行い,一次的に本研究で提案する二重鋼 矢板による対策工法の適用性に関する評価を行った。

b) 水圧消散過程の地盤剛性の回復評価

地震発生直後から津波到来が予測されるまでの時間経 過で想定される過剰間隙水圧の消散に伴う地盤剛性の回 復を求めた。津波到来までの時間が十分確保される場合に は,堤体や基礎地盤内に発生した過剰間隙水圧が消散する ことが予想される。一方,過剰間隙水圧が残存する状態で 津波が到来する場合には,地盤剛性の回復状況等を適切に 評価した上で津波作用力に対する構造挙動を検証する必 要がある。動的有効応力解析(code: LIQCA2D11²⁹⁾)によ り地震後の過剰間隙水圧消散による地盤剛性の変化を検 証した。



図3 性能照査フロー

c) 津波波力に対する影響評価

先に検討した地盤内 FL 値分布とそれによる流動変位が 生じた堤体に,予測される津波到来までの時間を考慮した 水圧消散による影響を加え,揺れによる被災履歴を受けた 構造に対して津波外力を作用させるステップ解析を行い, 地震から津波まで一連の複合災害に対する構造の安定性 を評価した。

3. 地震時の構造挙動検証

3.1 液状化予測解析

液状化抵抗係数 FL 値算出のために動的解析を実施した。 今回検討の地震波形を図4に示す。地震動は中央防災会議 (2003)で想定された2連動東南海・南海地震波形(高知 県モデル)³⁰⁾であり,高知市の国分川河口周辺で想定され る地震動である。動的解析では、この地震動加速度波形を 入射波としてモデル基盤面に作用させた。加速度応答スペ クトルを図5 に示す。ここでは比較のために道路橋示方 書・同解説(V 耐震設計編)²⁷⁾に示される設計用標準加 速度応答スペクトル(I種地盤,以下道示波とする)を同 時に示した。図5より,検討に用いた地震動は、1秒以下 の周期では道示波よりも小さいが、1秒以上の長周期側で は道示波に比較して応答が大きくなる傾向が窺える。つま り,対象地震動は液状化の発生が懸念されるような軟弱な 地盤に対して被害を拡大させるような長周期成分を含ん でいる³¹⁾。

解析モデルを図6に、物性値を表1及び表2に示す。図 6に示すとおり鋼矢板を堤体内に5.0m間隔で2列に配置 し、頭部をタイ材で連結した。鋼矢板の型式はIVw型とし 非液状化層まで根入れした。なお、解析対象ケースはa) 無対策,b)二重鋼矢板による対策工の2ケースとした。

動的解析に用いた物性値を表1に示す。せん断弾性波速 度 *Vs* は今井ら³²⁾による*N* 値と *Vs* の相関式から設定した。

また,動的解析では R-O (Ramberg-Osgood) モデル³³⁾ により地盤の非線形特性を考慮した。動的解析モデルの境 界条件は側方,底面に対して粘性境界を適用した。

静的解析に用いた物性値を表2に示す。表中に示す表土 と盛土は、Duncanらによる双曲線モデル(DCモデル)³⁴⁾ により非線形性を表現した。また、液状化層は図6に示す 沖積砂とし、安田ら²⁸⁾による液状化時の剛性低下率を考慮 した。盛土材と表土についてはモール・クーロンの基準に より、バイ・リニア型の非線形モデルを用いた。降伏後の 二次勾配は初期勾配の1/10を仮定した。





図6 液状化時の解析モデル

表1 動的解析に用いた物性値

	ポアソン		弾性波速	初期せん断	単位体積 重量 y(kN/m ³)	非線形特性パラメータ	
名称	比 v	N值	度 Vs(m/s)	剛性率 G ₀ (kN/m ²)		基準ひずみ 7r	最大減衰率 h _{max}
洪積砂	0.490	30.0	292	165,196	19.0	5.00E-04	0.25
沖積粘土	0.490	5.0	163	46,058	17.0	1.50E-03	0.14
沖積砂	0.490	10.0	173	54,934	18.0	3.00E-04	0.26
表土 (水位下)	0.490	5.0	163	<mark>46,</mark> 058	17.0	4.80E-04	0.14
表土 (水位上)	0.450	5.0	163	46,058	17.0	4.00E-04	0.14
盛土	0.450	10.0	173	54,934	18.0	2.50E-04	0.27
鋼矢板IVw	0.300			76,923,077	77.0		
タイ材	0.300	-	1.00	76,923,077	77.0	-	

表2 静的(流動変形)解析に用いた物性値

	ポアソン		Jose Hills	単位体積 重量 7(kN/m ³)	強度定数		
名称	比 v	N值	$E(kN/m^3)$		粘着力 c(kN/m ²)	内部摩擦角 @(°)	非線形モデル
洪積砂	0.330	30.0	84,000	10.0	0	36.2	
沖積粘土	0.330	5.0	14,000	8.0	24	0	
沖積砂	0.330	10.0	28,000	9.0	0	33.5	0
表土 (水位下)	0.330	5.0	14,000	8.0	20	10	DC モデル ^{楽[]}
表土 (水位上)	0.330	5.0	14,000	17.0	20	10	D Cモデル ^{楽1)}
盛土	0.330	10.0	28,000	18.0	3	36	DCモデル ^{※1)}
鋼矢板IVw	0.300	2	200,000,000	77.0	1	0	弾塑性モデル ^{※2)}
タイ材	0.300	- <u>C</u>	200,000,000	77.0	2	0	

※1)DCモデル: Dancan-Changによる双曲線モデル採用。 ※2)図7に示す載荷試験結果より設定。

※2)四川ー小 外戦何與戦船末より収定。

矢板は一般的に用いられるIVw 型を弾塑性梁要素でモ デル化した。変形特性は、写真2に示す実大鋼矢板に対す る室内4点曲げ載荷試験による載荷重Pと変形量 δ の関係 から、曲げモーメントMと曲率 φ の関係を算定し設定し た。室内試験による $P-\delta$ 関係を図7に、実大実験結果よ り設定した矢板の物性値を表3にそれぞれ示す。



写真2 室内4点曲げ載荷試験状況





仕様	鋼矢板Ⅳw型
断面積(m ²)	0.02255
断面二次モーメント(m ⁴)	0.000709
降伏曲げモーメント <i>M</i> _w (kN·m)	511.0
	0.60
全塑性曲げモーメント M _p (kN・m)	973.0
三次勾配率	0.15
最大耐荷力 Mu(kN・m)	1100.0

表3 鋼矢板の物性値

動的解析による最大地盤内せん断ひずみ (p_{xy}) の分布を 図 8 に示す。これより、矢板で囲まれた内部地盤では、無 対策と比較してせん断ひずみが低減されている。 F_L 値の分 布を図 9 に示す。無対策の条件では、一般的に堤防直下は、 鉛直方向は上載圧、水平方向は自由地盤での水平全応力の 応力境界条件となるため軸差応力が保たれる。その結果、 応力経路は原点に向かわず破壊線に到達することで過剰 間隙水圧の上昇が抑制される傾向にある³⁵⁾。これより、堤 体直下地盤では F_L 値がやや大きくなるのに対し、対策後 は矢板により側方地盤が拘束されるため、過剰間隙水圧は 上昇することから堤防直下の地表面付近ではむしろ F_L 値 が小さくなった。一方、深部になると矢板内は矢板による 変形が拘束されたことより無対策よりも F_L 値は大きくな る傾向が窺える。

FL値の分布に基づく流動変位分布を図 10 に示す。ここでは、初期に設定したせん断剛性を、FL値に基づいて低減 させる手法で流動変位を発生させた後、地震後の過剰間隙 水圧消散に伴う沈下挙動を Ishihara and Yoshimine による推 定法³⁰に基づき計算された変形解析結果を示している。

鉛直変位で比較すると、無対策では堤防天端で約 1.3m である。



図8 動的解析による最大せん断ひずみ分布

一方,対策を施したケースでは堤防法肩部で1.8mの沈 下が生じるものの矢板に囲まれた天端部は50cm 程度であ る。また,矢板自体は0.2cmとほとんど沈下せず,この箇 所では堤体の高さは確保されている。水平変位は,法肩部 の沈下が影響する対策工を施した場合の方が大きい。ここ で,矢板内部の地盤の沈下量はa)に示した無対策の半分 以下であることや,矢板自体の沈下量は僅かで地震後も継 続して天端高さを保持する可能性が大きいことから,対策 工を施したケースは,地震後の津波来襲時も二重鋼矢板で 囲まれた部分が一定の機能を維持すると判断される。



b)二重鋼矢板構造







3.2 過剰間隙水圧消散に関する解析的検討

提案補強法では,矢板を支持層まで根入れさせ地震や津 波の外力に抵抗する機構を有することから,実務的には矢 板が地盤からの反力をどれだけ期待できるかが構造の安 定性を検証する上で重要である。地震, 津波の複合災害に 対する構造性能を評価するにあたり, 地震後津波が到来す るまでに地盤に生じた過剰間隙水圧が消散し地盤剛性が 回復することによる影響を,動的有効応力解析 (code: LIQCA 2D11) により検証した。

1) 解析条件

変形解析には、二次元有効応力解析コード LIOCA2D11 を用いた。LIQCA はこれまでにも多数の液状化問題の解 析に適用されており、多くの実績を有する解析コードであ る。LIQCA では Biot の 2 相混合体理論³⁷⁾に基づき, 固相 の変位 u と間隙水圧 p を未知数として扱った u-p formulation によって場の方程式を定式化しており,有限要 素法と差分法を用いてこれを空間離散化している。つりあ い式の空間離散化には有限要素法,連続式の間隙水圧項の 離散化には差分法を適用し,要素積分には重心位置での次 数低減積分を適用することにより自由度数の低減と Shear locking の防止を図っている。時間離散化には Newmark の β 法を用いている。砂の構成則としては、Oka et al. ³⁸⁾によ る非線形移動硬化則を用いた砂の繰返し弾塑性モデルを 用い,粘土層及び支持層には R-O モデルを用いた。

2) 解析諸元

解析対象構造は,前項で設定した液状化地盤上に設置さ れる実大規模の海岸傾斜堤を基にした実大仮想モデルで ある。解析モデルとして,液状化地盤には砂の繰返し弾塑 性モデル,粘性土層および矢板が根入れされる非液状化層 には R-O モデル,盛土については液状化層と同等のモデ ルを適用した。矢板は3.1節で用いた弾塑性梁要素でモデ ル化し、矢板と地盤間にはジョイント要素を配して滑りを 考慮できるようにし,頭部をタイ材で結合した。側方境界

表4 解析に用いた地盤4	勿性バフメータ	(浟状化層) 37
単位体積重量(kN/m ³)	γt	18.0
初期間隙比	е	0.76
透水係数(cm/sec)	k _s	1.0×10 ⁻³
圧縮指数	λ	0.0087
膨潤指数	κ	0.00087
疑似過圧密比	OCR*	1.20
初期せん断係数比	G ₀ /σ' _{m0}	1473
変相応力比	M^*_{m}	1.001
破壊応力比	$M^*{}_{ m f}$	1.197
価化問粉山の	B_0	6000
"欧门L因数"[10]	B_1	60
N 79-4	C_{f}	0
h A A WAL IT *	D_0^*	1.2
9 101920 ⁻¹ 休致	n	1.0
規準ひずみ(塑性)	γ^{P*}_{r}	0.004
規準ひずみ(弾性)	$\gamma^{E^*}r$	0.013
異方性パラメータ	C_d	2000

表4	解析に用いた地盤物性パラメータ	(液状化層) ³⁷⁾
----	-----------------	-----------------------



は側面の影響を無視できる程度の広い範囲に水平地盤を 設け,その側部を疑似自由地盤境界²⁹⁾とし,底面は粘性境 界とした。解析対象ケースは、a)無対策、b)二重鋼矢板 構造とし,解析に用いた地震動は,3.1節のとおりである。

液状化層に用いた地盤物性パラメータ一覧を表 4 に示 す。これは、事前に実施した砂質土の室内要素試験結果 (Dr=60%)に対して、要素シミュレーションを繰返し行い設 定したものである(図11)。地盤が液状化に至るまでの変 形解析を対象とすることから,変相線到達後のひずみ挙動 の再現を最重視し, 主に応力-ひずみ関係, 有効応力経路 の挙動再現を重視した。

3) 解析結果

地震動終了時の堤体変形と過剰間隙水圧比(Ru=Δu/σvo) の分布を図 12 に、堤体天端中央の鉛直変位の時刻歴を図 13 に示す。強い加速度振幅と振動継続時間の長い地震波 形で基礎地盤が液状化し、堤体直下ではほぼ Ru=1.0 近く まで過剰間隙水圧の上昇が見られた。加速度振幅が大きく なる地震開始 20 秒付近から堤体の沈下が見られ、無対策 では約 1.4m, 二重鋼矢板構造では約 0.25m の鉛直変位が 生じた。ここで、二重鋼矢板構造では、矢板が締切り内地 盤の側方変形を抑制するため堤体沈下を大きく抑制する ことができ、さらに、矢板自体はほとんど沈下せずに天端 高さが維持されることから、地震後の津波到来時にも堤防 機能が保持されると考えられる。ここで、3.1節で示した 解析結果と変形量等に若干の差異は生じているが, ここで は水圧消散過程を検証することを主眼としているため,堤 体,対策工の変形状態が概ね表現されていることから,本 結果を4章の津波解析に活用することとした。



b) 二重鋼矢板構造(地震終了時)

図 12 堤体の変形状況と過剰間隙水圧比のコンター









図 14 過剰間隙水圧の時刻歴

二重鋼矢板構造の,堤体直下および矢板締切り外近傍位 置での過剰間隙水圧の時刻歴を図14に示す。本論文では, 抽出した要素以外の全ての地盤に対しても、過剰間隙水圧 の消散を再現している。締切り内地盤では主要動付近で Ru=1.0に到達するも地震終了直後から水圧の消散が進み, 地震終了10分後にはRu=0.8程度,4時間経過後にはRu=0.4



程度,8時間経過後にはRu=0.2以下とほぼ逸散した。矢板 の撓みや構造の転倒・滑動に影響を及ぼす締切り外側の矢 板近傍地盤に着目すると,主要動終了付近および地震終了 時にはRu=0.6程度まで上昇し,その後時々刻々と水圧消 散が進み4時間後,8時間後には締切り内地盤と同等の値 を示した。

つまり, 地震終了直後であっても矢板周辺地盤には有効 応力が残存することで, 水平方向に変形する鋼矢板壁の挙 動に対して残存有効応力に応じた地盤からの反力が期待 できると考えられる。

矢板に生じる水平変位,応答曲げモーメントの深度分布 を図15,図16に示す。地震終了時と水圧消散後との比較 から,地震後の水圧消散過程では矢板のたわみ,矢板に生 じる曲げモーメントは増幅することなく若干の低減が見 られた。これは,水圧消散に伴い地盤剛性が回復し地盤か らの反力が増加することが要因と考えられる³⁹⁾。これより, 鋼矢板で補強された構造は地震後の津波や高潮等の外力 に対しても抵抗可能と推察される。

4. 複合災害を考慮した耐津波性能検証

4.1 耐津波性能の解析的検証

3章で示した流動変形解析結果に対して、その後の津波 の来襲を予測し、過剰間隙水圧消散後に2波の津波荷重を 作用させ、被災履歴に追随したステップ解析を実施した。



図17 津波時の解析モデル

本解析では津波高さを 5.5m とし, 津波外力については, 谷本式 ²⁵⁾による波圧を作用させた(図 17)。

波圧強度は式(1)~(4)で求めた。

$p_1 = 2$	2p ₀ ga		(1)
	*	* \	

- $p_2 = \left(I h / \eta \right) p_1 \tag{2}$
- $\begin{aligned} \eta &= 3 a \\ h^* &= \min\left(h_a, \eta^*\right) \end{aligned} \tag{3}$

$$= \min\{n_c, \eta\}$$

- *p*₁,*p*₂:静水面及び堤体上端部における波圧強度 (kN/m²)
- ρ₀g:水の単位体積重量(kN/m³)

η^{*}:静水面上の波圧作用高さ(m)

a:入射津波の静水面上の高さ(振幅)(m)

h_c:静水面から堤体上端部までの高さ(m)

津波荷重の載荷条件について,対策ケースにおける矢板 側方の盛土については,作用側(海側)は波力の衝撃によ り,背面側は越流した波の洗掘により流動していると仮定 し,矢板側方の盛土を除去した条件で波力を載荷させた。

解析上の地盤物性値は表 2 と基本的には同じであるが, 地盤液状化層である沖積砂層の地盤剛性については以下 のとおり設定した。

二重鋼矢板で補強された盛土の直下および締切り外側 の矢板周辺地盤の地震動終了直後の地盤内の過剰間隙水 圧の消散状態については、地盤条件や地震後の津波到来ま での時間によって変化する。ここでは、あくまで一解析例 として、津波断層域近傍の短時間で津波が来襲する条件を 想定し、3.2節で得られた解析結果で、津波到達時点での 堤体内部の過剰間隙水圧が消散初期の過程である地震終 了後10分の過剰間隙水圧比を Ru=0.8 を仮定し、有効拘束 圧が初期の 20%程度残存する条件として液状化層の地盤 剛性を評価した。

地盤の変形剛性と有効拘束圧の関係は、ここでは地盤の 変形剛性が有効拘束圧σ。'の1/2 乗に比例するとした⁴⁰。 液状化層の地盤のヤング率は、液状化層をN=10 とし て初期状態の変形係数を28000kN/m²とすると、式(5)で計 算される。

 $E = (1.0-0.8)^{-0.5} \times 28000 = 12522 \text{kN/m}^2$ (5)

津波外力作用時の変形挙動を無対策, 鋼矢板による対策 後に対してそれぞれ表5に示す。津波による波力は, 所定 の値に対して10分割して作用させており,表5に示す無 対策の結果は, その3ステップ目, すなわち全津波荷重に 対して30%の作用力での結果を示している。表5上段に示 した無対策時には解析が発散した状態となり盛土は完全 に崩壊した。

一方,津波の作用に係る特性として,引き波側が危険側 の条件になり得ることや第2波以降の津波が最大規模に なり得ることが文献²⁾³⁾等で指摘されている。二重鋼矢板 による対策工を施したケースについては,押し波,引き波 が繰返し発生すると仮定して押し波・引き波それぞれ2波 を考慮し,さらに津波による洗掘で矢板周辺の盛土法面が 流出し地盤からの反力が期待できない状態を初期条件に 設定し変形解析を実施した。表5の結果より,押し波時に やや大きい変形が生じるが,2波の津波の後でも鋼矢板で 囲まれた盛土の変形は最小限に留まり,破堤には至らず堤 頂部は平坦が保たれている。これは,矢板で囲まれた地盤 のせん断抵抗と,矢板の剛性および強度が津波外力に対し て抵抗したためであると考えられる⁴¹⁾⁴²。





なお,表土や前面地盤が洗掘されるような更に厳しい条件については,被災事例や水理実験等での知見²⁰などを参考に今後の検討を行う予定である。

図 18 は津波外力作用前の状態として,動的解析(LIOCA) による最終ステップの曲げモーメントと静的解析 (ALID) の流動沈下後の結果を比較したものである。両者はほぼ同 様の傾向を示しており,ここで示す静的解析結果を津波作 用前の初期状態としても問題ないものと考えた。図19は、 津波外力作用時の曲げモーメント分布を示したものであ る。図中の流動沈下後の結果は図 18 に示す ALID 結果を 示している。この図及び表5より、1波目の押し波作用時 には、堤内方向へ 0.9m 程度の水平変位が生じるも矢板の 降伏には至らなかった。その後,引き波作用により堤外方 向へ0.45m 程度の水平変位が生じ、堤外側矢板の液状化層 付近および堤内側矢板の液状化層上端付近で矢板の降伏 が見られた。さらに、2波目の押し波作用時には矢板周辺 地盤の変状が顕著となり、堤内側への水平変位は 1.4m 程 度に達し堤外側、堤内側それぞれの矢板で降伏に至った。 その後の引き波作用時には、1波目と同箇所で矢板の降伏 が確認された。

今回の解析では、津波作用を繰り返し受けることで矢板 周辺地盤の変状が進み堤体の変形が累積する傾向が見ら れた。発生曲げモーメントが大きくなる位置では矢板の降 伏が見られるも全塑性には至らなかったことで急激に変 形が進んでも倒壊するまでには至らず、構造上の安定性が 確保され堤防機能が維持される結果であったと考えられ る。



4.2 複合災害を想定した構造安定性照査項目の提案

一連の数値解析結果から、二重鋼矢板構造を用いた堤防 補強は、強い揺れと基礎地盤の液状化、越流を伴うような 津波外力の作用など、複合災害を受ける可能性の高い場合 であっても、堤体の天端高さが保持され倒壊には至らない 「粘り強い」構造としての補強効果が確認された。さらに、 揺れや津波が連続して作用する状態の、堤体と矢板壁それ ぞれの変形モードが明らかになった。このような地震災害 の状態について、構造物に要求される性能を基に堤体およ び対策工の変状を規定する工学的指標を設けることで、複 合災害を対象とした構造安定性に関する照査が可能とな る。ここでは、今回の解析的検証で得られた知見から、複 合災害を対象とした堤防補強法としての本構造の実用化 を見据え、堤体および対策工の照査項目を整理する。

a) 堤体の変状

3章で示したように、揺れによる堤体の鉛直方向の変状 は地殻変動量と地盤の液状化に起因する沈下等が挙げら れるが, 地震後の堤防天端高が想定津波の水位高を上回れ ば, 鋼矢板同士の連続性が担保される場合に遮水機能が維 持される。水平方向の変状は、今回の解析では法面勾配が 左右対称な堤防形状を対象としたことから変状量は比較 的小さかったが、堤内・堤外法面が非対称、もしくは地盤 高が異なる場合等,一方向に地盤のひずみ・変形が累積す るような条件下においては、周辺環境への影響や地震後の 堤防の使用性等の観点から許容できる変状量を規定する 必要がある。特に,東北地方太平洋沖地震で被災が顕著で あった断面変化部での局所的な損傷や破堤®による堤防の 不連続性を防止することが重要である。一方,4.1 で示し たように、津波越流時には第1波である押し波だけに留ま らず,押し波による堤体法面の洗掘や流出を考慮した引き 波に対する照査,更には余震に伴う第2波に対する構造照 査など,想定津波に応じた堤体安定性の照査を行うことが 必要であり、引き続き検討を進めるべき課題の一つである。

b) 鋼矢板の変状

鋼矢板は支持層に根入れされることから鋼矢板自体の 沈下はほとんど生じないことが示された。基礎地盤液状化 や法面崩壊が生じても鋼矢板倒壊せずに天端高さを維持 していればその後の津波越流に対して遮水機能が期待で きる。水平変位の観点からは、3.2 で示したように、矢板 に生じる曲げ変形を鋼材の降伏応力以下に収まるよう諸 元を設定しておくことで,壁体としての水平抵抗が保持さ れ局所的な継手離脱による断面欠損も防止でき堤防法線 の連続性が担保されると考えられる。巨大地震や堤防高を 大幅に上回る様な越流津波を対象とする場合には,変形性 能に優れる鋼材の利点を最大限活用することで,降伏後の 塑性領域までの健全性が評価できれば,構造の合理化が図 れる。また、鋼材自体の曲げ変形だけでなく、鋼材で締め 切られた土堤との複合構造の観点から,堤体の滑動や転倒 についての安定性や壁体の根入れ長さの照査を検討する 必要がある。



写真3 二重鋼矢板堤防による補強事例



図 20 緊急輸送道路としての活用イメージ



図 21 排水作業基地としての活用イメージ

鋼材の腐食に対しては,既往の研究等から設計時に所定 の腐食代を見込むなどの対応が考えられる。

南海トラフ地震対策として高知県内の実対策として供 用された事例を写真3に示す。本構造は、2列の鋼矢板頭 部をタイ材で結合するものであり、鋼矢板材が健全な状態 であってもタイ材や鋼矢板との結合部が破損した場合に は、二重鋼矢板構造として期待する構造強度は発揮されず 堤体の決壊が懸念される。タイ材や矢板との結合部の諸元 や恒久的な機能維持についても検討する必要がある。

c) 複合災害

地震や津波の個別事象に留まらず,地震後の地盤応力状 態等を考慮した上で津波作用を考慮する等,想定される一 連の挙動に応じた性能照査を行うことが重要である。地震 と津波の複合災害に対する構造照査を行うには,時々刻々 と変化する矢板周辺地盤の剛性・強度を把握する必要があ る。地盤条件や地震終了後から津波襲来までの経過時間に より異なる過剰間隙水圧の消散過程を定量的に評価し,矢 板の撓みや補強堤体の変状を適切に予測できる手法を確 立することは今後の研究課題である。

d) 被災後の早期復旧

被災後の早期復旧の観点からは,緊急輸送道路の確保に よる資材調達の迅速化,浸水域の早期排水による堤内地の 有効活用が重要である。本解析結果から,天端をわずかに 上回る様な越流津波に対し,来襲後も二重鋼矢板で囲まれ た堤体機能が保持されるような場合には,図 20,21 に示す ように堤防補強として講じた本対策工を復旧時の緊急輸 送道路やポンプ車による排水作業基地として活用するこ とも可能であると考えられる。これは,被災後の二重鋼矢 板に支持機能を期待し,矢板上部に仮設構台を構築し活用 するものである。これら被災後の産業活動の停滞を最小限 に留め経済損失を抑える副次的効果までの性能を満足す るには,復旧作業に必要な堤体および鋼矢板の変状量を事 前に設定し,一連の構造照査に反映させることが望ましい。

5. 結論

二重鋼矢板構造による堤防補強策について,地震から津 波までの一連の複合災害を想定し,傾斜堤を対象とした二 重鋼矢板による補強構造が持つ耐震・耐津波性能を数値解 析により検証した結果から,以下の主要な知見が得られた。

- 1) 地震時解析の結果から,基礎地盤の過剰間隙水圧が上昇し二重鋼矢板で締め切られた内部地盤には沈下が生じるが,矢板近傍地盤は完全液状化には至らず鋼矢板壁の剛性・強度が機能することで矢板の撓みや堤体の変状が抑制されることが示された。また,矢板自体はほとんど沈下せず地震後の天端高さが保持された。
- 2) 揺れと津波の連続した複合災害に対する補強効果の 検証から、地震後に地盤の過剰間隙水圧が完全に消散 する前に津波が到来する厳しい条件においても、変形 性能に優れ降伏後に脆性的に破壊しない矢板の材料 特性が活かされ構造体は倒壊しないことが分かった。
- 3) 津波特性として押し波・引き波が繰り返し作用する構造に厳しい条件下においても、二重鋼矢板構造は倒壊せずねばり強く耐えることが示された。また、津波越流により堤体法面が洗掘される条件下においても同様の機能が示された。
- 4) 複合災害を対象とした二重鋼矢板による堤防補強について、要求性能に応じた構造照査までの検証方法を 提案し、解析的検証法を一例示した。
- 5) 被災後の早期復旧へ向け,二重鋼矢板構造の副次的な 効果として,壁体天端を活用した緊急輸送道路,排水 作業基地としての適用を提案した。

本研究では,比較的堤防形状が単純な傾斜堤を対象に二 重鋼矢板構造の地震・津波の複合災害に対する補強効果を 検証した。今後,偏土圧が作用する直立系構造や天端が狭 い施工制約の考慮が必要な条件など,本研究で得られた知 見を発展させ提案構造の適用範囲を明確化することで,耐 震・耐津波性能を有するより強い海岸堤防補強に実務面で 貢献できるものと考える。

参考文献

- 国土交通省海岸における津波対策検討委員会:平成23年東北地 方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関 する基本的な考え方,2011.
- 2) 国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.
- 国土交通省港湾局:港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計 ガイドライン, 2013.
- 高知県港湾・海岸課:高知県地震・津波防災技術検討会第3回配 布資料,2013.
- http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/175001/tunamicommit3-1.html (2014.2.3閲覧) .
- 5) 国土交通省:東日本大震災における河川・海岸施設の被害及び 復旧,国土交通省東北地方整備局河川部提供資料,2011.
- 6) 国土交通省東北地方整備局:北上川等堤防復旧技術検討会報告書(本編,資料編),2011.
- 7) 今井康雄,鈴木明憲,飛田哲男:2011年東日本大震災で被災した吉田川右岸16kの河川堤防を対象とした事例解析,第48回地盤 工学研究発表会発表講演集,pp.1129-1130,2013.
- 8) 脇中康太,石原雅規,佐々木哲也:東日本大震災による堤体の 液状化による河川堤防の被害事例解析,第48回地盤工学研究発 表会発表講演集,pp.1701-1702,2013.
- 9) 原忠、岡村未対、渦岡良介、石原行博、上野勝利:2011年東北 地方太平洋沖地震における岩手県沿岸中南部の河川堤防の津波 による被害の特徴、地盤工学ジャーナル、Vol.7, No.1, pp.25-36, 2012.
- Hazarika, H., Kasama, K., Suetsugu, D., Kataoka, S and Yasufuku, N.; Damage to geotechnical structure in waterfront areas of northern Tohoku due to the March 11, 2011 tsunami disaster, Indian Geotechnical Journal, Invited paper, Indian Geotechnical Society, Vol. 43, No.2, pp.137-152, 2012.
- 11) 原忠, Hazarika Hemanta, 黒田修一, 栗林健太郎, 西剛整, 古市 秀雄, 竹澤請一郎, 大角恒雄:東北地方太平洋沖地震で複合災 害を受けた河川堤防の被災要因分析, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.645-658, 2014.
- 12) 原忠, Hazarika Hemanta, 黒田修一, 栗林健太郎, 西剛整, 古市 秀雄, 竹澤請一郎, 大角恒雄: 揺れと津波の複合災害を受けた 河川堤防の被災要因, 地盤工学会特別シンポジウムー東日本大 震災を乗り越えて一, pp.755-763, 2014.
- 13) 常田賢一:津波における"粘り強い"に関する考察,第48回地 盤工学研究発表会発表講演集,pp.2131-2132,2013.
- 14) 日経コンストラクション, pp.6-11, 2012.11.26.
- 15) 松尾修,岡村未対,堤達也,斉藤由紀子:盛土液状化対策としての矢板締め切り工法に関する振動台実験報告書,土木研究所 資料第3539号,1998.
- 16) 古関潤一,田中宏征,乙志和孝,永尾直也,金子勝:矢板で補 強した堤防の模型実験,生産研究,東京大学生産技術研究所, Vol.61, No.6, pp.113-116, 2009.
- 17) 乙志和孝,古関潤一,金子勝,田中宏征,永尾直也:鋼矢板を 用いた堤防の補強に関する実験的研究,地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.1, pp.1-14, 2011.
- 18)藤原覚太,沢田和秀,八嶋厚,阿部幸夫,中山裕章,乙志和孝: 巨大地震下における海岸堤防の鋼矢板補強策に関する実験的研究,地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-, pp.417-423,2014.
- 19) Kakuta Fujiwara, Atsushi Yashima, Kazuhide Sawada, Yukio Abe, Kazutaka Otsushi; Analytical study on levees reinforced by double sheet piles with partition walls, 14th IACMAG International Conference, pp.711-717,2014.

- 20) 三戸部佑太、乙志和孝、黒澤辰昭, Mohammad Bagus Adityawan, 盧敏,田中仁:津波越流に対する鋼矢板壁構造の堤防補強効果 に関する実験的検討,土木学会論文集 B2(海洋工学), Vol.70, No.2, 2014, I_976-I_980.
- 21) 乙志和孝,吉原健郎,藤原覚太,安岡博之,古市秀雄:鋼矢板 を用いた盛土構造物の減災技術に関する実験的研究,南海地震 シンポジウム, Vol.7, pp.51-58, 2013.
- 22) 戸田和秀,岡由剛,楠本操,水谷太作,西山輝樹,永尾直也, 恩田邦彦:二重鋼矢板壁の津波作用時における構造評価,地盤 工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-, pp.691-695, 2014.
- 23) 国交省北陸地方整備局設計要領(河川編) 第2章海岸編, 2014.
- 24) 運輸省港湾技術研究所:海岸堤防・護岸構造集覧,港湾技術資料, No.448, pp.384-386, 1983.
- 25) 社団法人日本港湾協会,港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 26) 伊藤忠テクノソリューションズ, Soil Plus 理論マニュアル, 2014.
- 27) 日本道路協会,道路橋示方書·同解説V耐震設計編,2012.
- 28) 安田進,吉田望,安達健司,規矩大義,五瀬伸吾,増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法,土木学会論文集,No.638/III-49, pp.71-89,1999.
- 29) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ:LIQCA2D11(2011年公開 版)資料, 2011.
- 30) 内閣府中央防災会議:東南海,南海地震等に関する専門調査会 第16回資料,2003.
- 31) 例えば、国土交通省国土技術政策総合研究所:平成23年 (2011
 年)東北地方太平洋沖地震による K-NET 観測記録の応答スペクトル, pp.1-4, 2011.
- 32) Imai, T. : P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. IX th ICSMFE, 1977.
- Jennings, P. C.; Periodic Response of General Yielding Structure, ASCE, Vol. 90, No. EM2, pp.131-167, 1964.
- 34) Duncan, J. M. and Chang, C. ; Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653, 1975.
- 35) 渦岡良介:地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解 析手法に関する研究,岐阜大学学位論文,2000.
- 36) Ishihara,K.and Yoshimine,M.:Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes,Soils and Foundations, Vol,32,No.1,pp.173-188,1992
- Biot, M. A.; Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Jounal of Applied physics, Vol. 33, No.4, pp.1482-1498, 1962.
- 38) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.; A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 39) 乙志和孝, 原忠, 古市秀雄, 西剛整, 吉原健郎: 地盤剛性回復 を考慮した鋼矢板補強堤防の動的有効応力解析, 日本地震工学 会第10回年次大会, pp.299-300, 2013.
- 40) (財)沿岸開発技術研究センター:埋立地の液状化対策ハンドブック, 1997.
- 41) 原忠,谷美宏,古市秀雄,西剛整,乙志和孝:二重鋼矢板堤防の耐震・耐津波性能評価,平成26年度地盤工学会四国支部技術研究発表会,pp.35-36,2014.
- 42) 中山知大,古市秀雄,原忠,西剛整:二重鋼矢板で補強された 堤防の津波に対する安定性の検証,第49回地盤工学研究発表会, pp.975-976,2014.

(2015.3.30 受付)

Study on Reinforcement Method of Dykes by Steel Sheet-pile against Earthquake and Tsunami Disasters

Hideo FURUICHI¹, Tadashi HARA², Mihiro TANI³, Tsuyoshi NISHI⁴, Kazutaka OTSUSHI⁵ and Kazuhide TODA⁵

- 1 Construction Solutions Department, GIKEN, LTD.
- 2 Science Research Center, Kochi University
- 3 Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University
- 4 Construction Project Consultants, LTD.
- 5 Construction Products Development Div., Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, LTD.

Abstract

Expeditious seismic countermeasure for coastal infrastructures have been required since the prediction of huge earthquakes and tsunami in the near future throughout Japan. Coastal dykes built on liquefiable layers have a risk of malfunction caused by subsidence due to liquefaction and/or collapse due to overflowing (i.e. tsunami). In this paper, the robust performance of coastal dykes with sheet piles installed at the top of slopes is confirmed by applying FEM analysis. Dykes of this structure would be a reasonable and cost effective method against disasters with continuous earthquakes and tsunami. Also check points on the structural stability of coastal dykes reinforced with sheet piles are presented in this paper together with possible usage of the crown of coastal dykes in the process from the beginning of a disaster to the recovery.

Key words: Earthquake, Tsunami, reinforcement of dykes, sheet pile, analytical study