

二重鋼矢板補強工法による海岸堤防の耐震対策事例

三重県桑名建設事務所 西川 英希

株式会社建設技術研究所 山口 進祐, 野田 渉, 正会員 坂本 達俊, ○吉邑 一平

1. はじめに

中部地方において南海トラフ巨大地震は、近年その切迫性が指摘されており、その地震動および津波に対し海岸堤防の耐震性能を確保することが喫緊の課題となっている。海岸堤防の耐震対策として、地盤改良により液状化の発生を抑える工法と、矢板等を用い液状化に伴う変形を抑制し、堤防の沈下を軽減する工法がある。従来、矢板を用いる二重鋼矢板補強工法では、地下水の流動を遮断してしまう点が課題となっていた。

本稿では、堤内地の地下水利用に配慮し、透水性鋼矢板による地下水流動への影響軽減効果を評価した耐震補強の設計事例について報告する。



図-1 設計対象位置

2. 現地状況, 地盤特性

(1) 現地状況

城南第一地区海岸は、伊勢湾沿岸の三重県桑名市に位置する。揖斐川右岸の河口域は、昭和年代に干拓され、海拔ゼロメートル地帯が広がる地域である。現況堤防は海側護岸が大型ブロック、陸側被覆工が連節ブロックで構成されている三面張りの海岸堤防(土堤)である。(写真-1 参照)

周辺には、堤防沿いに漁協や水産会社、温泉施設等が隣接し、地下水を介して海水を利用したハマグリ(ハマグリ)の養殖が行われている。また、海側の海域では海苔が養殖されている。



写真-1 現地状況

(2) 地質状況

地質は、堤防縦断方向での大きな変化はない。

堤体は図-2のように伊勢湾台風以前の旧堤防（B2層）と伊勢湾台風後の現堤防（B1層）により構成され、その基礎地盤は、上層から緩い砂質土（As層）と粘性土（Ac層）および砂礫（Ag層）の互層となっている。液

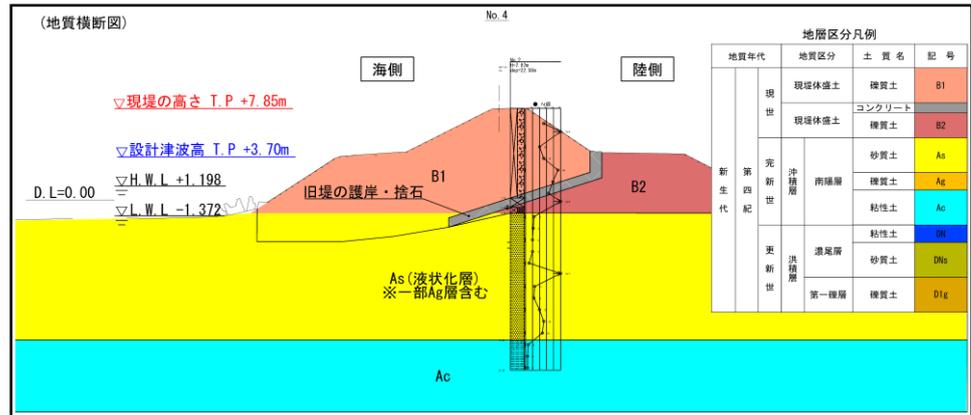


図-2 想定地質横断面図

状化判定を実施すると As 層の安全率 (F_L 値) が 1 を下回るため、液状化の可能性が高いと判断された。なお、B2 層の前面には、旧堤の護岸や捨石があることが確認されている。

3.設計条件

(1) 耐震対策設計方針

耐震照査は、『海岸保全施設の技術上の基準・同解説 平成 30 年 8 月』に基づき行った。耐震対策の手順を、図-3 に示す。最初に、現況耐震性評価（レベル 1 地震動）として液状化判定、液状化を考慮した安定性照査を行い対策工の必要性を確認する。次に、対策工の設計（レベル 1 地震動）として経済性・施工性・環境面を考慮してレベル 1 地震動に対する対策工の選定を行う。最後に、対策工の設計（レベル 2 地震動）としてレベル 2 地震動に対する対策効果の確認を行うものである。

(2) 潮位条件等

設計津波高は広域地盤沈降量を考慮し、T.P.+3.7m とした。設計に用いた諸元を表-1 に示す。

表-1 諸元一覧表

項目	諸元
現堤の高さ	T.P.+7.85m
計画潮位	D.H.W.L.+4.52m
朔望平均満潮位	H.W.L.+1.20m
台風期平均満潮位	H.W.L.+0.97m
朔望平均干潮位	H.W.L.-1.37m
設計津波高	T.P.+3.7m(設計津波の打ち上げ高 T.P.+3.1m+広域地盤沈下0.52m)
5年確率波高	T.P.+4.03m
堤内地盤高	T.P.+0.28m

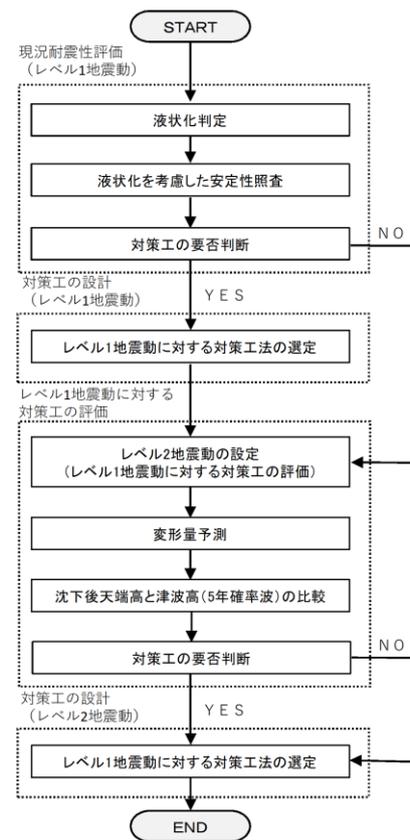


図-3 耐震対策検討フロー

(3) 目標とする耐震性能

レベル1地震動，設計津波を生じさせる地震動（レベル2-1地震動），レベル2-2地震動に対する耐震性能は，以下のように海岸堤防の主な機能を損なわないことを照査する。

①レベル1地震動

- 照査方針：所要の構造の安全を確保
- 照査基準：震度法（慣性力，液状化）
- 照査方法：【現況堤防：土堤】

『河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（H9.2）』に準拠し過剰間隙水圧を考慮した円弧すべり解析により照査

- 照査方法：【対策後】

各種対策工の設計基準により安全性を照査¹⁾

②設計津波を生じさせる地震動（レベル2-1地震動）

- 照査方針：地震動及び地震後に来襲する津波（設計津波）に対して所要の構造の安全性を確保
- 照査基準：天端高が設計津波もしくは地震後の応急対策期間中に発生する高潮・波浪の高い方に対し，所定の高さを確保
- 照査方法：【対策後】

有限要素法による動的解析 FLIP により照査

③レベル2-2地震動

- 照査方針：地震動及び地震後の高潮・波浪に対して所要の構造の安全性を確保
- 照査基準：天端高が地震後の応急対策期間中に発生する高潮・波浪に対し，所定の高さを確保
- 照査方法：【対策後】

有限要素法による動的解析 FLIP により照査

4. 現況耐震性評価（レベル1地震動）

本設計対象区間の現況堤防の耐震性の評価を実施した。

表-2 照査結果一覧

(表-2 参照)

照査方法は，地震時の堤防の安全率の算定において過剰間隙水圧と慣性力は同時生起しないものと考え，過剰間隙水圧のみを考慮した安定計算（ Δu 法）と慣性力のみを考慮した安定計算（kh法）を行った。²⁾

照査の結果，過剰間隙水圧（ Δu 法）を考慮した円弧すべり解析において安全率は基準値（許容安全率 1.0）を満足しない結果となった。

断面	照査位置	安全率 (Δu 法)	安全率 (kh法)
No.4	堤外(海側)	0.180	1.043
	堤内(陸側)	0.121	1.082
No.8	堤外(海側)	0.387	1.340
	堤内(陸側)	2.241	1.425
No.10	堤外(海側)	0.370	1.342
	堤内(陸側)	0.408	1.386

※赤字は，許容安全率 1.0 を満足しないものを示す。

5. 対策工の設計（レベル1地震動）

耐震対策工法として，砂圧入静的締固め工法，二重鋼矢板補強工法，鋼管杭工法の3案を表-3に示す通り，比較検討した。

本海岸では，海苔の養殖を行っているため，濁水が発生した場合の影響が懸念されるほか，施工時間が限られている。また，施工ヤードが狭く，小型重機での施工となるため，経済性に優れた工法を採用した。

砂圧入静的締固め工法は，砂杭を貫入し地盤の液状化抵抗力を増大させる工法である。打設する砂杭は透水性があり，地下水の流動に与える影響がほとんどないというメリットはあるが，濁水の発生や，日当たり施工量が少ないことで経済性に劣るため不採用とした。二重鋼矢板補強工法は堤防に鋼矢板を二重に打ち込

み、頭部をタイロッドで拘束させ構造体を造成させることで地震に抵抗する工法である。日当たり施工量が多いことで経済性に優れるというメリットがあるため採用とした。鋼管杭工法は鋼管杭を堤防に連続的に打ち込み、鋼管杭による連続壁を構築し、地震後の津波、高潮に対し防護する。日当たり施工量が多く経済性に優れるというメリットはあるが、連続壁の継手により壁体の一体性を保つことが困難であることや、地震後の管理用通路としての機能の確保が困難であるなど、信頼性に劣るため不採用とした。

表-3 レベル1地震動に対する耐震対策工法の選定表

	案-1 静的締固め(砂圧入式静的締固め工法)	案-2 二重鋼矢板補強工法(透水) 【二重矢板壁による浸水防御】	案-3 鋼管矢板(透水)(堤防天端付近に設置) 【鋼管矢板による浸水防御】
断面図			
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・砂杭を打設し、地盤を締固め、液状化の発生そのものを抑止する ・海水利用の井戸に対しては、砂杭を用いることで、透水性を確保する 	<ul style="list-style-type: none"> ・二列に設置した矢板の頭部をタイロッドで連結した二重矢板壁の剛性で液状化層の側方変位を抑制するとともに、二重矢板壁で津波、波浪の侵入を防ぐ ・海水利用の井戸に対しては、穴あき矢板を用いることで透水性を確保する 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼管矢板を打設し、堤防が変形した後も、鋼管矢板で津波、波浪の侵入を防ぐ ・津波、波浪に対する止水性は、潮望平均満潮位より上を、継手処理(モルタル充填等)することで確保する ・海水利用の井戸に対しては、継手処理をしない、もしくは透水鋼管矢板を用いて、透水性を確保する
構造物の信頼性	信頼性：・地震後の天端の通行機能は確保可	信頼性：・地震後の天端の通行機能は確保可	信頼性：・地震後の天端通行は、状況により一部復旧が必要 ・透水性確保や地中障害物により鋼管杭打設後に連続壁として土圧に抵抗する必要があるが、継手を施工する場合は、壁体の一体性に課題
周辺への影響	○ ・砂杭は透水性があるため、地下水の流動に与える影響はほとんどない	◎ ・背後地の海水井戸に対しては、穴あき鋼管矢板を用いることで、透水性への影響軽減を図り、元の流量に対し、90%以上の地下水の流動性を確保する。	○ ・背後地の海水井戸に対しては、継手に開口を設けることで、透水性への影響軽減を図り、地下水の流動性を確保する
施工条件	△ ・濁水が発生する可能性があるため、漁業期を避けた施工となる ・日進量は比較的長いが、施工期間に制限がある 200mあたりの施工日数173日間(実稼働日数) 日進量1.15(m/day)	○ ・漁業への影響がなく、通年施工が可能 ・日進量は他案に劣る 200mあたりの施工日数173日間(実稼働日数) 日進量1.16(m/day)	◎ ・漁業への影響がなく、通年施工が可能である ・日進量が最も長く、施工期間が短い 100mあたりの施工日数65日間(実稼働日数) 日進量1.5(m/day)
経済性(1.0m当り)	3,271千円/m	3,023千円/m	3,183千円/m

なお、施工は、Ⅰ期施工とⅡ期施工の段階整備とし、Ⅰ期施工として、海側の矢板のみ先行して施工し、対策効果を早期に発現させる計画とした。Ⅱ期施工で耐震性能および高潮に対する必要な機能を確保させるため、二重矢板およびタイロッド、波返工を施工する。標準断面図を図-4に示す。

6. レベル2地震動に対する照査

耐震対策工として採用した二重鋼矢板補強工法についてレベル2地震動に対する照査を行った。レベル2地震動に対する変形量評価は、図-5のように有限要素法による動的解析(FLIP)より実施した。

結果、表-4に示すとおり、沈下後の堤防高は必要高を満足しており、矢板に発生する断面力および変位も許容値を満足しており、レベル2地震動に対する追加対策を不要である。また、Ⅰ期施工時の地震後の津波・高潮に対する一重矢板の照査結果を表-5に示すが、一重矢板により、沈下後も津波・5年確率波高波浪に対し安全性を確保でき、耐震性能を発揮することが可能であった。

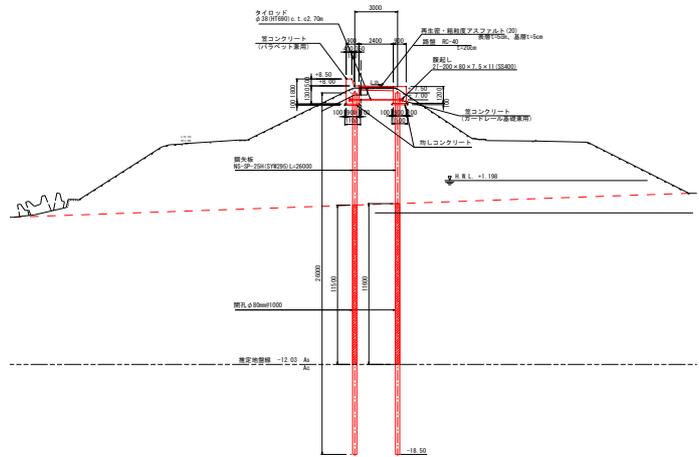


図-4 二重鋼矢板補強工法標準断面図

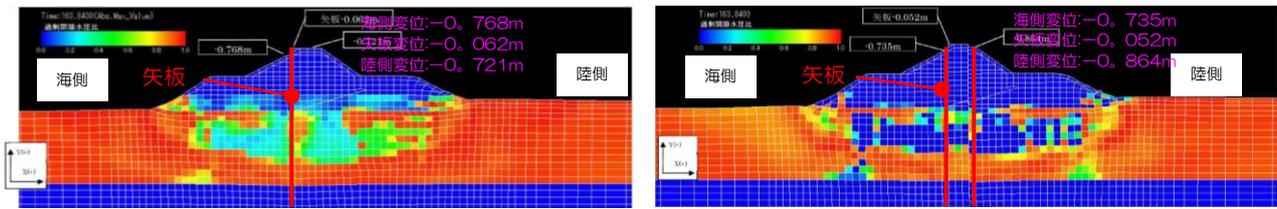


図-5 FLIPによる解析結果の一例（左：I期施工後，右：II期施工後）

表-4 照査結果(堤防沈下量，矢板応力照査)

地震動	施工段階	沈下後堤防高 (土堤)(T.P.m)	照査外水位 (T.P.m)	鋼矢板応力(壁体本体)(N/mm ²) 上段：曲げ、下段：せん断		変位 (mm)	照査 結果
				海側	陸側		
レベル 2-1	I 期施工	+7.26	+4.03	—	185.30 ≤ 354.00 111.46 ≤ 1486.25	62 ≤ 75	OK
	II 期施工	+7.21		89.86 ≤ 354.00 73.76 ≤ 1486.25	212.10 ≤ 354.00 113.10 ≤ 1486.25	52 ≤ 75	OK
レベル 2-2	I 期施工	+7.21	+4.03	—	260.40 ≤ 354.00 123.30 ≤ 1486.25	62 ≤ 75	OK
	II 期施工	+7.13		135.20 ≤ 354.00 155.40 ≤ 1486.25	310.90 ≤ 354.00 253.90 ≤ 1486.25	52 ≤ 75	OK

表-5 照査結果(地震後の津波・高潮に対する一重矢板の矢板応力照査)

ケース	曲げ応力度 (N/mm ²)		せん断応力度 (N/mm ²)		杭頭変位 (mm)	
	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値
地震後津波・5年確率波浪時	84.90	≤ 270.00	3.50	≤ 150.00	71.13	≤ 75.00

7.地下水への影響検討

(1) 検討手法

設計区間の堤内地(陸側)では，既設井戸により，地下水を介して海水が利用されており，二重鋼矢板補強工法が採用された場合，海側からの塩水供給が滞り，海水利用に支障が生じる恐れがある。本設計では，開口を設けた透水性鋼矢板を用いることとした。透水性鋼矢板とは写真-2に示すように通常の鋼矢板に対し，穴あけ加工を行い必要な透水性を確保した鋼矢板である。³⁾この透水性鋼矢板を設置した場合の地下水流動解析を行い，矢板の開口の仕様を決定するとともに地下水への影響を評価した。解析モデルを図-6に示す。



写真-2 透水性鋼矢板

(2) 解析条件

解析モデルの境界条件として海側の潮位条件および降雨条件はある程度計測結果があるものの，陸側からの地下水流入量については，不明である。そこで，再現解析の精度を向上させるために，以下に該当する期間として平成27年10月26日を対象とした。

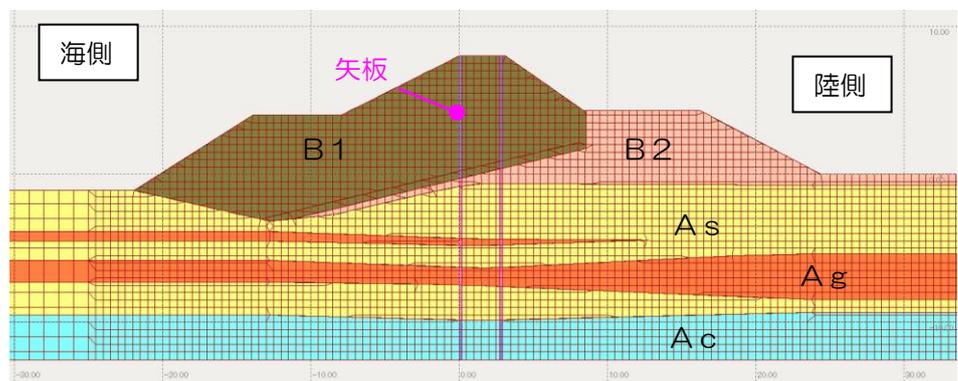


図-6 解析モデル図

- ▶ 陸側からの地下水流入の影響を最小限とするため，前7日間の降雨量が少ない日を選定する

- フラックスの変化を明確にするため、干満の差が大きい日を選定する。
- 周辺で工事が無い日時を選定する。

(3) 検討結果

観測水位を再現するための再現解析を実施した結果を図-7に示す。実績の観測水位との水位差は、±0.1m以内に収まっており、再現性は良好であった。

図-8に透水性鋼矢板の開口率に対する施工前後の流量比率の関係と鋼材材料費と加工費の関係を示す。

これらより、開口率 0.86%以上でほとんどの流量を賄える。開口率をこれ以上上げてコストに対し、効果が薄いことから、開口率は 0.87% (φ100@1000) として設定することとした。

なお、工事当たっては、鋼矢板の施工前後で周辺の井戸の水質に及ぼす影響をモニタリングするため、周辺海域および施工の影響範囲にある既存の観測孔および井戸を対象としてモニタリングを実施する。

モニタリング項目は、表-6に示すとおりである。

8. まとめ

本稿では、海岸堤防の耐震対策工として、地下水利用のある地区における透水性鋼矢板を用いた二重鋼矢板補強工法の設計事例を報告した。本事例により以下の知見を得ることができた。

- 透水性鋼矢板の開口率は、ある程度の割合以上になると効果の上昇が小さくなる。これは、既往の事例でも報告されている。³⁾ 本設計により、透水効果とコスト、矢板強度を踏まえた最適な開口率を設定する手法を提案することができた。
- 二重鋼矢板補強工法は、段階的な施工が可能であり、工事ヤードが限られている地区での施工において効果の早期発現が期待できる。

今後はモニタリングを行い、設計手法の評価、効果を検証する必要がある。

本論文の執筆にあたり、データ提供にご協力いただきました三重県桑名建設事務所の皆様に、この場をお借りし厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人国土技術センター；「鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル」，平成 13 年 5 月
- 2) 財団法人国土技術センター；「河川堤防の構造検討の手引き」，平成 24 年 2 月
- 3) 鋼管杭協会，鋼矢板技術委員会；「鋼矢板 Q&A」，平成 11 年 10 月

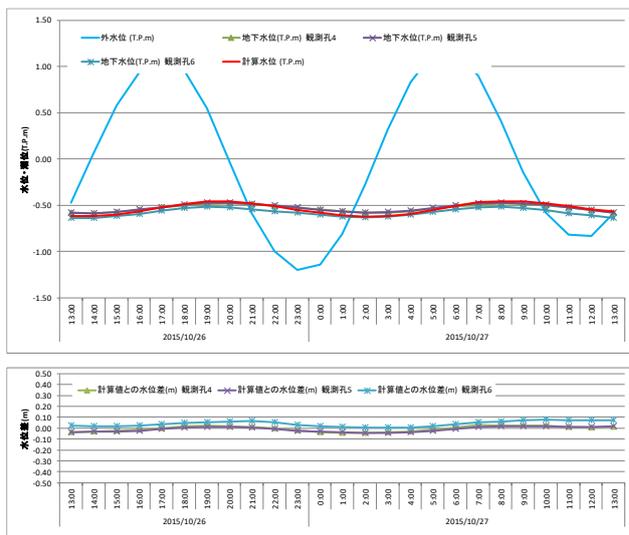


図-7 再現計算結果

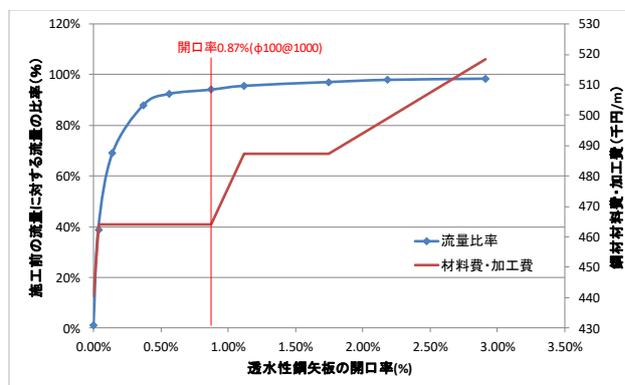


図-8 透水性鋼矢板の開口率と流量比

表-6 モニタリング項目

調査		調査内容	頻度
水位調査		・ 自記水位計等により記録	・ 30 分間隔
水質調査	水産用水	①化学的酸素要求量(COD)アルカリ法 ②全リン，③全窒素，④溶存酸素量(DO) ⑤水素イオン濃度(PH) ⑥浮遊物質(SS)，⑦水温 ⑧大腸菌群数 ⑨ヘキササン抽出物質(油分) ⑩電気伝導率	・ 大潮時 ・ 満潮時 ・ 月 1 日
	水道基準	①一般細菌，②大腸菌 ③塩化物イオン，④有機物(TOC) ⑤水素イオン濃度(PH)，⑥味 ⑦臭気，⑧色度，⑨濁度 ⑩硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素 ⑪亜硝酸態窒素，⑫水温，⑬電気伝導率	・ 既設井戸 6 ・ 大潮時 ・ 満潮時 ・ 月 1 日