

地震・津波外力に対する二重鋼矢板堤防の簡易設計手法の検証

その2：耐津波性能に関する評価

地震, 津波, 鋼矢板

株式会社 CPC 正会員 ○谷 美宏, 西 剛整
 高知大学 国際会員 原 忠
 新日鐵住金株式会社 正会員 及川 森, 乙志 和孝
 株式会社技研製作所 正会員 宮之原 朋子, 古市 秀雄, 弘瀬 智隆

1. はじめに

巨大地震を対象とした海岸堤防の合理的な補強技術として、二重鋼矢板による堤体補強策を提案し、本構造の耐震・耐津波性能を数値解析にて検証してきた¹⁾。地震と津波の連続作用が考慮できる簡易設計手法の確立に取り組んでおり、別報²⁾では既往の技術基準³⁾により設計した補強形状に対して、数値解析により提案補強法の耐震性を照査した。ここでは同形状の断面に対し、従来用いられている比較的簡易な設計手法⁴⁾を用いて、津波に対する安全性を確認した。さらに、地震後早期に津波が来襲する条件を考慮した数値解析を行い、地震・津波の連続作用に対する安全性を照査するとともに、ここで適用した設計手法の妥当性について検証した。

2. 二重鋼矢板堤防の耐津波設計

耐震設計で健全性が検証された構造諸元を基に、鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル⁴⁾に従い津波外力に対する構造安定性照査（せん断変形，滑動，基礎地盤の支持力）を実施した。図1に照査対象断面を示す。想定する断面形状と対策工の仕様は別報²⁾と同様である。堤体法面については、地震時の被災により水平抵抗が期待できない厳しい条件を想定した。津波高さは堤体高さと同じ5.0mとし、津波波圧については、海岸堤防に対する津波の衝撃力を考慮した谷本式⁵⁾による波圧を堤防側面に作用させた。安定性照査に用いた式を、式(1)~(4)に示す。

(a)せん断変形に対する照査

$$FS \cdot M_d \leq M_r \quad \dots (1)$$

$$M_r = M_{r0} \cdot (1 + d / H) + M_{sp} \quad \dots (2)$$

FS: 安全率 (1.0 ≤ FS)

M_d: 照査面におけるせん断変形モーメント

M_r: 照査面におけるせん断抵抗モーメント

M_{r0}: 締切り内中詰土の基準せん断抵抗モーメント

d: 現地盤面からの照査面深さ

H: 計地盤面からの突出高さ

M_{sp}: 2列の矢板が発揮する抵抗モーメント

(b)滑動に対する照査

$$FS \cdot F_d \leq F_r \quad \dots (3)$$

F_d: 壁体に作用する水平外力の総和

F_r: 滑動抵抗力の総和

(c)基礎地盤の支持力に対する照査

$$FS \cdot Q_d \leq Q_r \quad \dots (4)$$

Q_d: 照査面に作用する鉛直合力

Q_r: 荷重の偏心を考慮した基礎地盤の支持力

表1に設計照査結果を示す。本研究で照査対象とした断面形状では、地表面から二重鋼矢板が突出するような厳しい条件下であっても、津波外力に抵抗できるものと判断される。

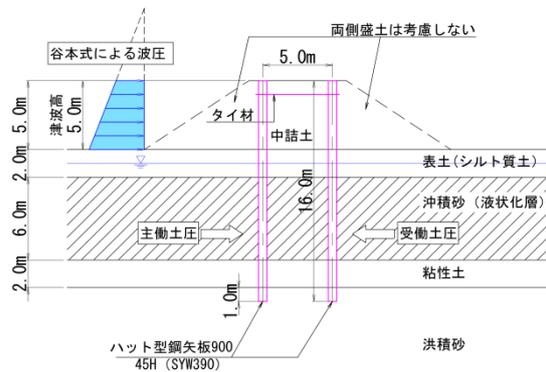


図1 津波作用時の検討断面

表1(a) せん断変形に対する照査

せん断変形モーメント M _d (kN・m)	せん断抵抗モーメント M _r (kN・m)	安全率 M _r /M _d
2160.7	2309.6	1.1 ≥ 1.0

表1(b) 滑動に対する照査

壁体に作用する 水平外力の総和 F _d (kN)	滑動抵抗力の総和 F _r (kN)	安全率 F _r /F _d
658.4	2559.1	3.9 ≥ 1.0

表1(c) 基礎地盤の支持力に対する照査

照査面に作用する 鉛直合力 Q _d (kN)	荷重の偏心を考慮した 基礎地盤の支持力 Q _r (kN)	安全率 Q _r /Q _d
24520.3	450.0	54.5 ≥ 1.0

3. 津波外力作用時の数値解析による検証

以上の通り、耐震性能及び耐津波性能が確認された構造諸元にに基づき、地震被害を受けた後に時間を置かず津波が来襲すると仮定した場合の数値解析を実施した。別報²⁾の耐震解析結果によれば、鋼矢板に挟まれた堤体直下では過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 まで上昇するが、鋼矢板の外側では地震終了直後でもある程度の水圧消散傾向があることが示されている。また、既報¹⁾では津波時の解析に対して 20%程度の有効応力の回復を見込んだ検討を行っている。本検討では、過剰間隙水圧に対して地震動規模や地盤条件等の影響はあるものの、津波時にはある程度の消散は見込めるものと考え、既報と同様に津波来襲時に有効応力が常時の 20%程度発揮される条件として液状化層の地盤剛性を評価した。地盤の変形剛性は、有効拘束圧 σ_c の 1/2 乗に比例すると考える⁹⁾。初期状態の変形係数 E_0 を $E_0=28000$ 、液状化層の $N=10$ より $E_0=28000\text{kN/m}^2$ とすると、有効応力回復後のヤング率は以下ようになる。

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

その他の物性値については、表 2 に示すとおりである。表土及び盛土は Duncan-Chang モデル⁷⁾により非線形特性を考慮した。津波外力は、耐津波設計時と同等のものを作用させた。矢板側方の盛土は堤外側については波力の衝撃により流出していると仮定し、図 2 に示すよう津波作用側の盛土を除去した条件で波力を载荷させた。

表 3 に津波作用時の変形図と矢板及び既設堤防天端の 2 点 (A, B) に作用する変位をそれぞれ示す。既設堤防天端 (B 点) では、津波到達前、矢板に沿った側方滑りにより 1.0m を超える沈下が生じる。この沈下量は津波到達後も大きく変化していない。一方、矢板天端 (A 点) では、津波により堤内側へ 19.6cm の水平変位が生じるが、沈下は最小限に留まり天端高さは保持されている。

図 3 に津波外力作用時の津波波力作用時の矢板に生じる曲げモーメント深度分布を示す。天端高に相当する津波外力の作用により矢板には 467.6kN・m の最大曲げモーメント生じるが、降伏値には至らず、構造上の安定性は確保されている。一連の検討結果から二重鋼矢板堤防は、従来の設計手法により構造上の安全性が確保できる条件であれば、地震・津波の複合災害に抵抗する機能を有することが示された。

4. まとめ

従来の比較的簡易な設計手法で耐震性及び耐津波性を照査した補強形状に対し、数値解析により地震・津波の複合災害に対する検証を行った。その結果、従来の簡易設計手法で設定された補強対策工は、ここで想定した規模の複合災害に対しても十分な耐力を有し、この手法を適用した補強工法の選定が可能であるとの知見が得られた。今後はさらに越流する津波に対する安全性についても検証することが必要である。

【参考文献】1) 古市秀雄, 原 忠, 他: 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, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.583-594, 2015. 2) 及川森, 原 忠, 他: 地震・津波外力に対する二重鋼矢板堤防の簡易設計手法の検証, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016(投稿中). 3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007. 4) (財)国土技術研究センター: 鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル, pp33-51, 2001. 5) 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, pp.237-238, 2007. 6) (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. 7) 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.5M5, pp.1629-1653, 1975.

表 2 解析に用いた材料物性値

名称	ポアソン比 ν	N値	ヤング率 E (kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	強度定数		非線形モデル
					粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	
洪積砂	0.333	30.0	84,000	19.0	0	36.2	
粘性土	0.333	3.0	8,400	17.0	24	0	
沖積砂 (液状化層)	0.333	10.0	12,522	18.0	0	33.5	DCモデル ^{※1)}
表土 (水位下)	0.333	5.0	14,000	17.0	20	10	DCモデル ^{※1)}
表土 (水位上)	0.333	5.0	14,000	17.0	20	10	DCモデル ^{※1)}
盛土	0.333	10.0	28,000	18.0	3	36	MC/DPモデル ^{※2)}
鋼矢板	0.300	-	200,000,000	77.0	-	0	弾塑性モデル
タイ材	0.300	-	200,000,000	77.0	-	0	

※1)DCモデル: Duncan-Chang による双曲線モデル採用

※2)MC/DPモデル: Mohr-Coulombの破壊規準を弾性降伏規準とし、

Drucker-Prager型の塑性ひずみポテンシャル関数を適用した弾・完全塑性モデル

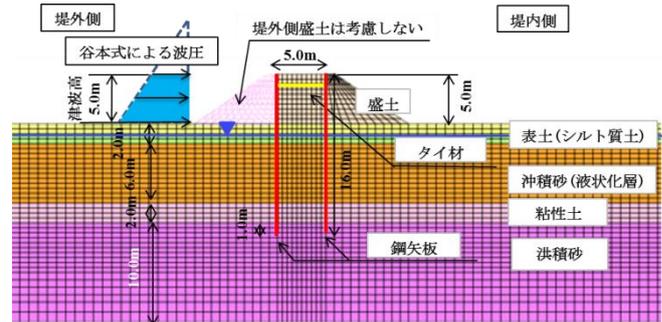


図 2 津波荷重の载荷条件

表 3 津波波力作用時の変形状態

変形図 (実寸法)	A点変位		B点変位	
	沈下量	水平変位	沈下量	水平変位
津波到達前	0.3cm	5.3cm	121.5cm	19.5cm
津波到達後	0.4cm	-19.6cm	119.3cm	-4.5cm

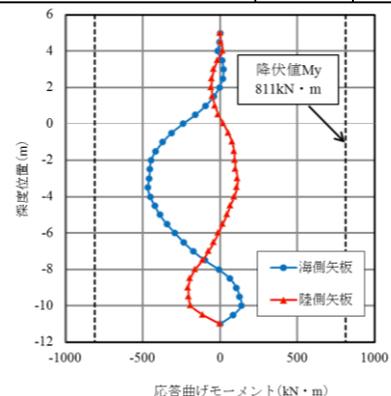


図 6 矢板に生じる曲げモーメント深度分布