

鋼材を用いた河川堤防の液状化対策工法

—L2地震動に対する河川堤防の耐震性能評価における鋼材を用いた工法の検討手法確立に貢献—

鋼管杭・鋼矢板技術協会 鋼矢板技術委員会

1. これまでの経緯

わが国では、これまで河川堤防の耐震化に関する多くの研究・施策が進められてきた。特に液状化対策に関しては、旧建設省土木研究所より平成9年10月に「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)」¹⁾、平成11年3月に「液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)」(共同研究報告書第186号)が策定され、L1地震動を想定した対策が着実に推進される中、鋼材を用いた工法も多数採用されてきた。

その道半ばとも言える平成23年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、河川堤防も多大な被害を受けたが、対策済み区間では未対策区間のような大規模な変状が確認されなかった。このことにより、これまで実施されてきたL1地震動対策が、L2地震動にも効果があり、耐震性向上に寄与することが証明された。

2. 土研資料の発刊

このことを踏まえ、L2地震動に対する河川堤防の液状化対策の効率的な設計法整備を目的に、(国研)土木研究所主導の下、液状化に関する有識者らによる「河川堤防の液状化対策の設計手法検討委員会」が設置され、(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会も参画し、共同で検討を進めてきた。ここでは、既存のマニュアルを踏襲し、河川堤防の液状化対策の設計をL1地震動に対して行うこととしながらも、堤防本来の機

能である治水安全性がL2地震動に対しても確保できるよう、堤体の許容沈下量に基づいた照査方法の確立について議論してきた。

この取り組みの成果として、平成28年3月に「河川堤防の液状化対策の手引き」²⁾が、次いで平成29年8月には、「河川堤防の液状化対策の手引き<設計計算例>」³⁾が発刊された。

これらは耐震性能を満足しないと判定された河川堤防で液状化対策を実施する場合に適用される。ここには、基礎地盤の液状化対策として、締固め工法、固結工法、鋼材を用いた工法が記載されており、その中でも鋼材を用いた工法に関して、大要を以下に纏める。

3. 鋼材を用いた工法の考え方

(1) 対策原理

鋼材を用いた工法の対策原理は、図1のように、地震で生じる堤体直下の液状化層の側方流動を、鋼材の剛性と根入れ部の地盤抵抗で抑止し、堤体変形を低減するものである。従って、液状化を許容しつつも堤体の一定程度の

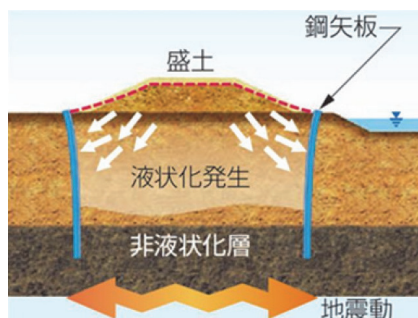


図1 鋼材を用いた工法の対策原理

安定性確保が可能である。

さらに排水機能付き鋼材とした場合、上記の補強効果に加え、鋼材周辺の過剰間隙水圧を低減することにより、対策効果の向上が期待される。また、他工法に対して比較的省スペースでの対策となるため、狭隘地等での対策工法として優れている。

なお、河川堤防の液状化対策に適用する鋼材は、JIS A 5523に準拠する溶接用熱間圧延鋼矢板、またはJIS A 5530に準拠する鋼管矢板とする。

(2) 設計手順

鋼材を用いた工法の設計手順は、図2の設計フローを標準とし、従来の円

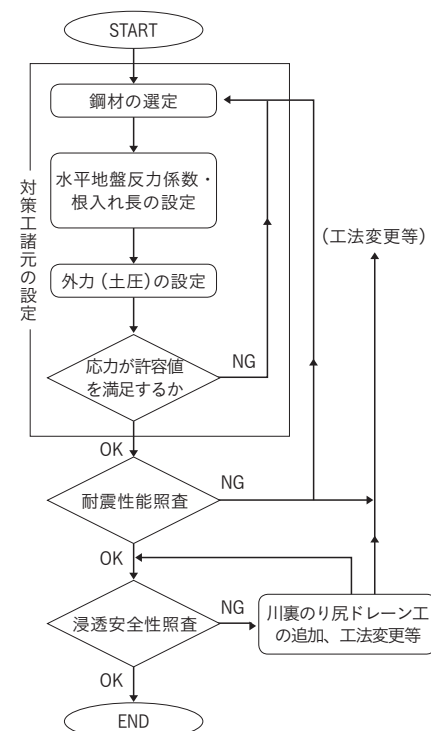


図2 設計および耐震性能照査フロー²⁾

弧すべり法による堤防全体の安定性の検討は廃止されている。

鋼材は、液状化層最下端より非(準)液状化層に対して、その仕様および地盤条件に応じて十分な根入れを確保した上で、図3のモデル断面においてフレーム解析を実施し、対策工諸元設定用震度となるL1地震動に相当する外力(土圧)に対して発生する鋼材の応力度が所定の許容値以内となることを照査する(以下、L1設計)。ここまでは、従来の液状化対策マニュアルと同様の手順となっている。

次に、液状化対策を施した鋼材を含む堤防全体にL2地震動を作用させ、地震後の堤防高さが、耐震性能において考慮する外水位を下回らないことを照査する(以下、L2照査)。これにより、鋼材が変形することによる堤防の変形(沈下)を考慮した設計が可能となる。

最後に、液状化対策工を有する堤体の浸透に対する安全性が有意に低下しないことを照査する。浸透安全性を示す円弧すべり安全率、局所動水勾配、G/W等の指標への対策工の有無が及ぼす影響について評価し、基準値を満足しない場合は、補助工法の併用や対策工自体の変更を検討する。

(3) ALIDを用いた耐震性能照査

L2地震動に対する耐震性能照査で

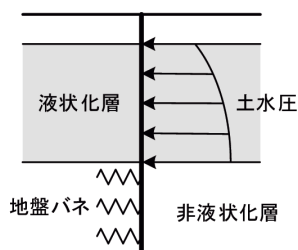


図3 L1設計におけるフレーム解析モデル²⁾

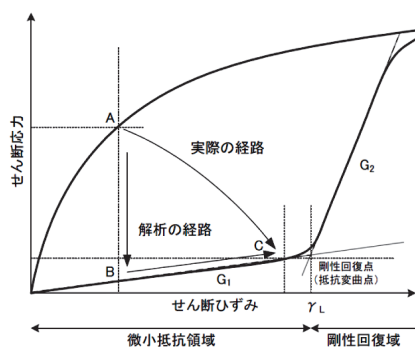


図4 液状化地盤要素の応力ひずみ関係²⁾

は、有限要素法による静的自重変形解析(ALID)が広く用いられている。

地盤要素のモデルについては、液状化時の応力ひずみ関係が、図4のように単調増加のバイリニアモデルで表現されるが、この剛性回復域の剛性 G_2 および剛性回復点のせん断ひずみ γ_L の導出に微小抵抗領域の剛性 G_1 の推定が重要となる。従来、 G_1 の推定方法としては安田・稲垣式が用いられてきたが、その適用範囲が $F_L \geq 0.8$ に限られた。そこで、図5のように兵庫県南部地震や北海道南西沖地震による河川堤防の被災事例を基に、 $F_L < 0.8$ における G_1 を推定し、安田・稲垣式の拡張がなされている。さらに、東北地方太平洋沖地震による被災事例から、被災程度に及ぼす影響が比較的小さいことが分かった深い液状化層では、沈下量の過大評価を避け、次の G_1 補正が行われる。

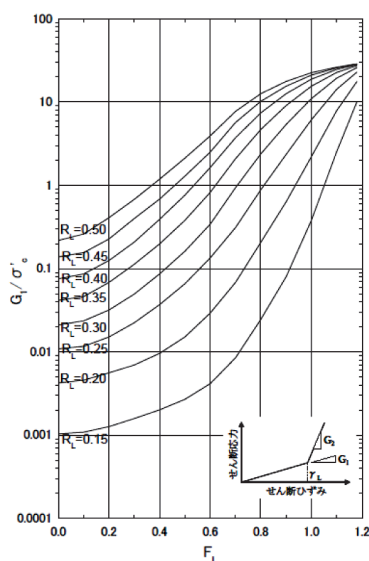


図5 拡張後の安田・稲垣式²⁾

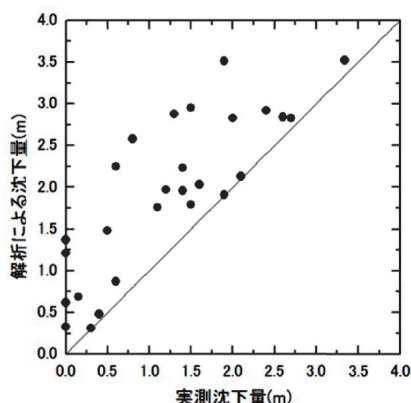


図6 G_1 補正後のALIDによる堤体沈下量の評価²⁾

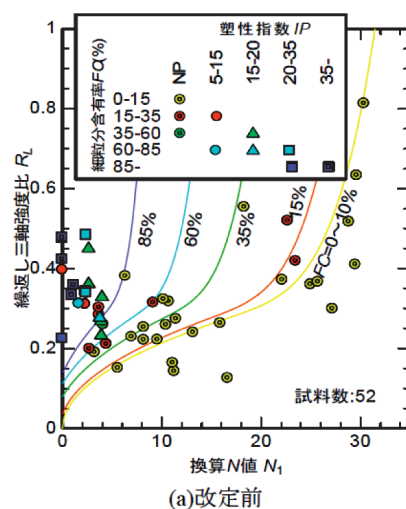
$$G_1' = c_{cp} G_1 \quad (1)$$

$$c_{cp} = \begin{cases} 1 & (\sigma_v' < \sigma_{v0}') \\ (\sigma_v' / \sigma_{v0}')^n & (\sigma_v' \geq \sigma_{v0}') \end{cases} \quad (2)$$

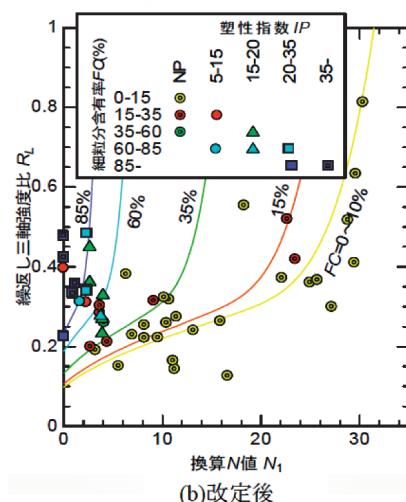
ここに、 $\sigma_{v0}' = 75 \text{ kN/m}^2$ 、 $n = 2$ のとき、図6のように安全側の評価が可能となる。

液状化した地盤要素の変形し易さに影響する繰返し三軸強度比 R_L は、これまでの知見に加え、東北地方太平洋沖地震で被災した河川堤防から採集した細粒分を多く含む地盤試料によるデータを取り込むことで、N値による R_L の推定式の補正係数が見直されている。これにより、例えば粘性土に分類される細粒分を多く含む地盤では、図7のように従来より R_L が過少評価され難くなった。

地下水位の設定については、従来L1設計と同等にしていたが、東北地方太平洋沖地震による被災箇所の再現解析結果に基づいて、従来よりも一律0.5m高く



(a)改定前



(b)改定後

図7 改訂前後におけるN値による R_L 推定式の変化²⁾

設定することとされた。これは、表層の非液状化層でも地下水位近傍では飽和度が高く、液状化層からの排水の影響を受けることにより、変形に寄与すると考えられること等に対応したものである。

また、液状化による基礎地盤の変形により堤体が液状化層にめり込む場合、実現象としてその比重の違いにより浮力が作用するため、堤体高75%以上の沈下は発生しないことが経験的に分かっている。従って、解析上の堤体高75%以上の沈下となった場合は、浮力を補正する仮想バネのモデル化が許されている。

鋼材のモデルについては、弾性線形梁要素とし、堤体天端の沈下量を適切に求めるため、鋼材と地盤を繋ぐジョイント要素は設置しない。鋼材の諸元は、L1設計で設定された仕様を最低限必要なものとし、堤体天端の沈下量が規定値を満足しない場合や、震度が増大した際に液状化層の範囲変更された場合に、その型式や長さを増大させることができる。

これらが設定されたALIDにより、L2地震動に対する河川堤防の耐震性能を適切に評価することができる。なお、鋼材の応力度照査は常にL1設計で行うものとし、L2照査では不要とされている。

4. ALIDを組込んだ設計計算例

鋼材を用いた工法を適用した河川堤防に対し、ALIDによる耐震性能照査事例として、次の計算例①～⑤について、表1および以下に概要を示す。

まず、前述の土研資料³⁾には、一般的な条件を模擬した断面について、2つの耐震性能照査事例（計算例①、②）の方法・手順が紹介されている。

次に、（一社）鋼管杭・鋼矢板技術協会から平成30年1月に発刊している、鋼材を用いた工法に関する更なる知見の拡充を目的とした「鋼材を用いた河川堤防の液状化対策工法 技術資料」⁴⁾では、3つの耐震性能照査事例（計算例③、④、⑤）の補填に加え、実務者向けQ&Aの取り纏めを行っている。

(1) 土研資料³⁾の計算例

計算例①

計算例①は、液状化層5mに対し、L1設計で求めた鋼材仕様が、L2照査での耐震性能を十分確保できるケースである。

はじめに、ALIDを用いて現況の無対策堤防に対するL2照査を実施したところ、地震後の堤防高さがいずれも照査外水位を下回るため、対策工が必要となった。

対策工として使用する鋼材は、従来のU形鋼矢板より経済性に優れたハット形鋼矢板のうち最も断面が小さなSP-10Hとし、液状化層最下端の直下に位置する根入層（準液状化層もしくは非液状化層）への鋼矢板の根入長を $2/\beta$ 以上確保している。 β は次式に従って、鋼矢板の剛性、および地盤の剛性（水平方向地盤反力係数）の逆数に対し、根入長が比例するように設定される。

$$\beta = \sqrt[4]{(k_H \cdot D/4EI)} \quad \text{..... (3)}$$

ここに、 β ：特性値 (m^{-1})、 k_H ：水平方向地盤反力係数 (kN/m^3)、 D ：鋼矢板の単位幅 (m)、 E ：鋼矢板の弾性係数 (kN/m^2)、 I ： D あたりの鋼矢板の断面二次モーメント（腐食無し、継手効率1.0） (m^4/m) である。

L1設計時に鋼矢板に作用する荷重は、漸増成分荷重 P_s と振動成分荷重 P_d である。 P_s は漸増成分荷重の基本分布関数 $F(z)$ に、盛土下の液状化程度に関する a_1 、鋼矢板の相対剛性に関する a_2 、盛土形状に関する a_3 を、 P_d は振動成分荷重の最大値 P_{dmax} に、相対剛性に関する a_d を、それぞれ乗じたものとして与えられる。

L1設計で求めた鋼矢板諸元に対し、ALIDによるL2照査を行った結果、地震後の堤防高さがいずれも照査外水位を上回るため、耐震性能を満たすと判定された。

計算例②

計算例②は、計算例①と同様の液状化層5mに加え、L2時限定の液状化層が存在するため、L1設計で求めた鋼矢板仕様がL2照査で増大させることで、耐震性能を確保するケースである。

ALIDを用いて現況の無対策堤防に対するL2照査を実施したところ、地震

後の堤防高さが、いずれも照査外水位を下回るため、計算例①と同様にSP-10Hを対策工として用い、ALIDを用いたL2照査を行ったところ、地震後の堤防高さが、照査外水位を下回り、所定の耐震性能を満たさなかった。

そこで、鋼矢板型式・根入長を増大し、再度L2照査を行った結果、照査外水位を上回ったため、耐震性能を満たすと判定された。なお、ここではL2照査時に根入長を3m確保し、打込長増大に対する施工性確保のため型式をSP-25Hとした。

(2) JASPP版設計の手引き⁴⁾の計算例

計算例③

計算例③は、液状化判定上限の深さ20mまで液状化が見込まれる断面である。3層ある液状化層のうち上方の2層はL1設計から、下方の1層はL2照査で液状化層と判定され、それぞれ薄い粘性土を挟み互層を形成している。

これに対し、計算例②と同様にL1設計で求めた鋼矢板仕様をL2照査で増大させ、鋼矢板最大型式のSP-VIIで、所定の耐震性能が確保された。

計算例④

計算例④は、L1設計で対象となる液状化層が存在せず、従来無対策とされてきたが、L2照査ではじめて液状化し対策が必要となった断面である。

ここでは、先行的にL2照査を実施し、SP-10Hを段階的に根入れさせ、所定の耐震性能が確保される長さを確認した。その後L1設計に戻り、鋼矢板の応力度に対する健全性が確保されているか確認した。このとき、L2地震動による F_L から A_{sl} 層を液状化層、 D_g 層を根入層と設定し、鋼矢板の作用荷重は対策工諸元設定用震度から算出した。なお、矢板下端中心の回転モーメントの釣合いが成立しない場合は、荷重の低減が許される。

なお、最終的に D_g 層に対する根入れ長は1mであった。

計算例⑤

計算例⑤は、法肩に二重鋼矢板構造を設置して堤体内を補強する「特殊提」に属する断面であり、海岸分野などで適用事例がある。本構造は「鋼矢板芯

壁堤」⁵⁾とも呼ばれ、堤体内に打設した鋼矢板壁及びタイロッドで堤体を拘束し安定性を保持することで、洪水・高潮・津波等による越流や、地震による液状化に対し、堤防高さまで打設された二重鋼矢板により堤体の天端高を確保し、破堤に至るのを効果的に防止する機能を有している。

ここでは、L1設計で「鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル」⁶⁾を適用し、適切な鋼矢板仕様等の対策工諸元を決定の上、他計算例と同様にL2照査を実施した。このとき鋼矢板頭部は沈下せず、堤体天端の沈下量も0.1m以下となり、耐震性能が非常に高い水準で確保されることを確認した。

5. まとめ

本文では、河川堤防の液状化対策として用いられる鋼材を用いた工法に関して、これまでの経緯や土研資料^{2,3)}発刊に伴う設計技術環境の変化を整理・解説した。また、ALIDを導入した新たな耐震性能評価手法について、土研資料³⁾の2例に加え、(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会⁴⁾で取り纏めた3例の検討概要⁴⁾について紹介し、鋼材を用いた工法が実務レベルにおける様々な条件での適用が可能であることを示した。ただし、これらはあくまで一例であるため、記載の無い条件への鋼材を用いた工法の適用・検討に際しては、(一社)

鋼管杭・鋼矢板技術協会まで問合せを頂きたい。

鋼矢板による河川堤防法尻対策をはじめ、鋼材を用いた工法が河川堤防の耐震性能向上に貢献できることを期待する。

【参考文献】

- 1) (国研) 土木研究所：土木研究所資料第3153号 河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル (案), 1997, 1998 (部分改定)。
- 2) (国研) 土木研究所：土木研究所資料第4332号 河川堤防の液状化対策の手引き, 2016。
- 3) (国研) 土木研究所：土木研究所資料第4346号 河川堤防の液状化対策の手引き (設計計算例), 2017。
- 4) (一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：鋼材を用いた河川堤防の液状化対策工法 技術資料, 2018。
- 5) (一社) 鋼管杭協会：鋼矢板芯壁堤鋼矢板による河川堤防補強工法設計の手引き (案), 2002。
- 6) (一財) 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, 2001。

表1 各計算例の概要

計算例① (土研資料 ³⁾ 掲載ケース)																	
概要図	変形図 (対策後)	コンセプト															
L1 緒元: SP-10H x L7.5m (SYW295) L2 緒元: SP-10H x L7.5m (SYW295)		・液状化層5mのオーソドックスなケース ・地盤種別 II種 ・L1 緒元で決定 耐震性能照査結果 <table border="1"> <tr> <td>堤防天端沈下量</td><td>対策工無</td><td>3.05m (沈下率 0.61)</td></tr> <tr> <td></td><td>対策工有</td><td>2.47m (沈下率 0.49)</td></tr> <tr> <td>沈下後の堤防高さ (A)</td><td></td><td>EL. + 2.53m</td></tr> <tr> <td>照査外水位 (B)</td><td></td><td>EL. + 2.50m</td></tr> <tr> <td>判定</td><td></td><td>OK (A > B)</td></tr> </table>	堤防天端沈下量	対策工無	3.05m (沈下率 0.61)		対策工有	2.47m (沈下率 0.49)	沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.53m	照査外水位 (B)		EL. + 2.50m	判定		OK (A > B)
堤防天端沈下量	対策工無	3.05m (沈下率 0.61)															
	対策工有	2.47m (沈下率 0.49)															
沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.53m															
照査外水位 (B)		EL. + 2.50m															
判定		OK (A > B)															
計算例② (土研資料 ³⁾ 掲載ケース)																	
概要図	変形図 (対策後)	コンセプト															
L1 緒元: SP-10H x L10.0m (SYW295) L2 緒元: SP-25H x L16.0m (SYW295)		・液状化層の間に粘性土があるケース (下部はL2のみ液状化) ・地盤種別 III種 ・L2 緒元で決定 耐震性能照査結果 <table border="1"> <tr> <td>堤防天端沈下量</td><td>対策工無</td><td>2.96m (沈下率 0.59)</td></tr> <tr> <td></td><td>対策工有</td><td>2.42m (沈下率 0.48)</td></tr> <tr> <td>沈下後の堤防高さ (A)</td><td></td><td>EL. + 2.58m</td></tr> <tr> <td>照査外水位 (B)</td><td></td><td>EL. + 2.50m</td></tr> <tr> <td>判定</td><td></td><td>OK (A > B)</td></tr> </table>	堤防天端沈下量	対策工無	2.96m (沈下率 0.59)		対策工有	2.42m (沈下率 0.48)	沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.58m	照査外水位 (B)		EL. + 2.50m	判定		OK (A > B)
堤防天端沈下量	対策工無	2.96m (沈下率 0.59)															
	対策工有	2.42m (沈下率 0.48)															
沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.58m															
照査外水位 (B)		EL. + 2.50m															
判定		OK (A > B)															
計算例③																	
概要図	変形図 (対策後)	コンセプト															
L1 緒元: SP-VL x L16.5m (SYW390) L2 緒元: SP-VL x L21.0m (SYW390)		・液状化判定上限の液状化層20mのケース ・地盤種別 II種 ・L2 緒元で決定 耐震性能照査結果 <table border="1"> <tr> <td>堤防天端沈下量</td><td>対策工無</td><td>2.88m (沈下率 0.58)</td></tr> <tr> <td></td><td>対策工有</td><td>2.47m (沈下率 0.49)</td></tr> <tr> <td>沈下後の堤防高さ (A)</td><td></td><td>EL. + 2.53m</td></tr> <tr> <td>照査外水位 (B)</td><td></td><td>EL. + 2.50m</td></tr> <tr> <td>判定</td><td></td><td>OK (A > B)</td></tr> </table>	堤防天端沈下量	対策工無	2.88m (沈下率 0.58)		対策工有	2.47m (沈下率 0.49)	沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.53m	照査外水位 (B)		EL. + 2.50m	判定		OK (A > B)
堤防天端沈下量	対策工無	2.88m (沈下率 0.58)															
	対策工有	2.47m (沈下率 0.49)															
沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 2.53m															
照査外水位 (B)		EL. + 2.50m															
判定		OK (A > B)															
計算例④																	
概要図	変形図 (対策後)	コンセプト															
L1 緒元: - L2 緒元: SP-10H x L9.0m (SYW295)		・L1では液状化が発生しない、今まで無対策としていたケース ・地盤種別 II種 ・L2 緒元でL1設計OK 耐震性能照査結果 <table border="1"> <tr> <td>堤防天端沈下量</td><td>対策工無</td><td>1.14m (沈下率 0.23)</td></tr> <tr> <td></td><td>対策工有</td><td>0.78m (沈下率 0.16)</td></tr> <tr> <td>沈下後の堤防高さ (A)</td><td></td><td>EL. + 4.22m</td></tr> <tr> <td>照査外水位 (B)</td><td></td><td>EL. + 4.00m</td></tr> <tr> <td>判定</td><td></td><td>OK (A > B)</td></tr> </table>	堤防天端沈下量	対策工無	1.14m (沈下率 0.23)		対策工有	0.78m (沈下率 0.16)	沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 4.22m	照査外水位 (B)		EL. + 4.00m	判定		OK (A > B)
堤防天端沈下量	対策工無	1.14m (沈下率 0.23)															
	対策工有	0.78m (沈下率 0.16)															
沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 4.22m															
照査外水位 (B)		EL. + 4.00m															
判定		OK (A > B)															
計算例⑤																	
概要図	変形図 (対策後)	コンセプト															
L1 緒元: SP-VL x L21.0m (SYW390) L2 緒元: SP-VL x L21.0m (SYW390)		・堤体内を鋼矢板で補強する特殊堤のケース ・地盤種別 II種 ・L2 緒元で決定 耐震性能照査結果 <table border="1"> <tr> <td>堤防天端沈下量</td><td>対策工無</td><td>3.34m (沈下率 0.67)</td></tr> <tr> <td></td><td>対策工有</td><td>0.06m (沈下率 0.01)</td></tr> <tr> <td>沈下後の堤防高さ (A)</td><td></td><td>EL. + 4.94m</td></tr> <tr> <td>照査外水位 (B)</td><td></td><td>EL. + 2.50m</td></tr> <tr> <td>判定</td><td></td><td>OK (A > B)</td></tr> </table>	堤防天端沈下量	対策工無	3.34m (沈下率 0.67)		対策工有	0.06m (沈下率 0.01)	沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 4.94m	照査外水位 (B)		EL. + 2.50m	判定		OK (A > B)
堤防天端沈下量	対策工無	3.34m (沈下率 0.67)															
	対策工有	0.06m (沈下率 0.01)															
沈下後の堤防高さ (A)		EL. + 4.94m															
照査外水位 (B)		EL. + 2.50m															
判定		OK (A > B)															