

河川堤防における耐震対策工（液状化対策）

中日本建設コンサルタント株式会社 ○加藤俊夫，谷川雄哉

1. はじめに

日本各地で大規模な地震が発生し、東海地域では南海トラフ地震が想定されている。河川堤防においても大規模地震によって発生する液状化対策が急務であり、二級河川Y川の液状化対策工の選定と検討を行った。対象範囲の堤防は、制約条件として用地確保が厳しいこと（堤内地には民家、工場、道路が近接しており堤体拡幅や堤内地での施工用地確保が困難）、H9耐震基準の対策工が施工済み（円弧すべり対策としての鋼矢板、鋼管矢板）であることを考慮し、対策効果の確実性、経済性、施工性を総合的に判断して二重矢板工法を選定した。L2地震動への対策工は6区間に分け、地質条件については既往調査結果を補間するように追加調査を行い、地質や遡上水位等の諸条件を設定し、有限要素法（FEM）の鉛直二次元地震応答解析FLIP（Finite Element Analysis Program for Liquefaction Process）を用いて、最適な液状化対策範囲や工法の設計を行った。

2. Y川の耐震設計方針

Y川下流域（埋立地／築堤区間）では、南海トラフ地震による堤防沈下（地震動による沈下、液状化による沈下、広域地盤沈降による沈下）対策と、南海トラフ地震により引き起こされる津波による堤防決壊対策として、堤防の耐震設計および工事を進めている。河川堤防の耐震設計の基本的な考え方は「地震により堤防が変形や沈下しても、堤防の高さは堤防越水をさせない高さを確保することにより、堤防の決壊を防ぎ、堤内地の浸水災害を起こさないこと」とし、具体的には以下を検討した。

- ・L1地震：堤体の安定～堤防の崩壊（円弧すべり）
- ・L2地震：堤体の沈下～液状化の発生による沈下（地盤の流動化解析）

上記検討内容を以下のフロー（図-1）にまとめた。このフローにより耐震性を評価し対策を検討した。

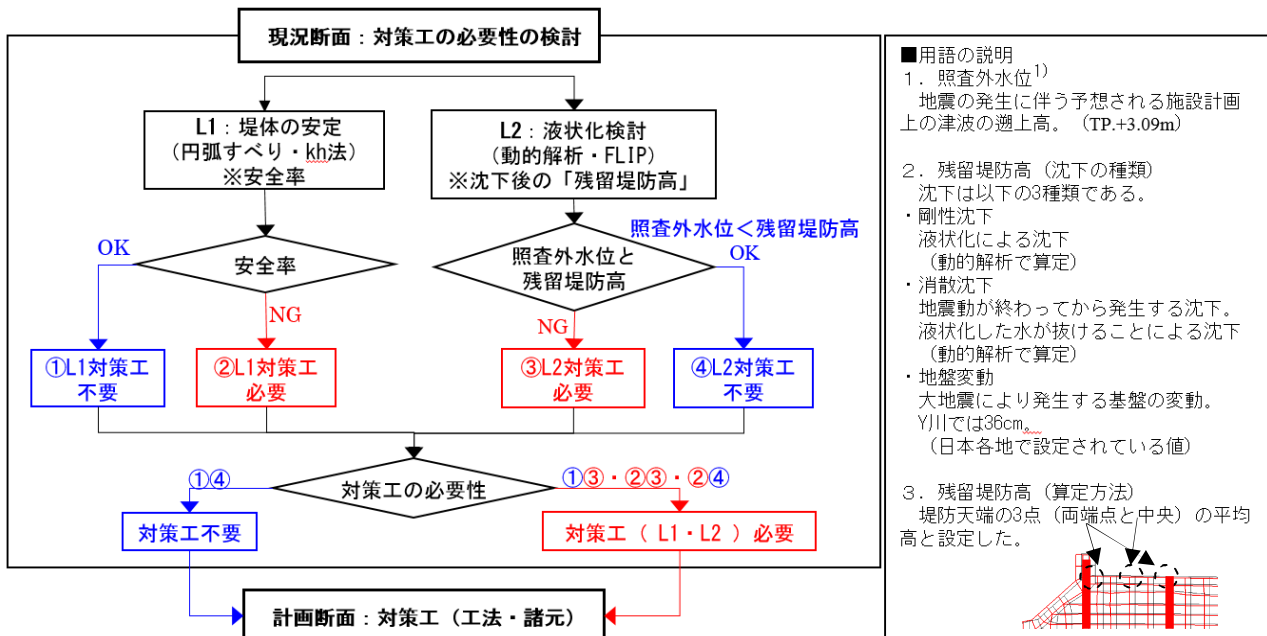


図-1 耐震設計フロー

※上図は「対策工の必要性の検討」であるが、対策工の選定・諸元の決定フローも基本はこのフローと同じで、諸元決定のチェックルーチンが加わるだけなので本稿では省略した。

3. 対策工対象範囲の地盤

3.1 地盤特性

対策工範囲を含む地質分布と解析断面を図-2 に示す。対策工範囲は Y 川下流域の沖積低地に属しており、沖積層は-5m 程度まで堆積している。液状化対象層 (As) は TP.±0m~-5m の範囲に存在し、最大堆積厚は 5m 程度で、解析断面での堆積厚は 3m 程度である。沖積層の下に更新世層が分布し、TP.-20~-25m には工学的基盤面 (熱田層下部 D3Lc 層上面) が分布している。工学的基盤面は PS 検層を行い設定した。地質区分と対象断面地質構成を図-3 に、物性値を表-1 にまとめた。

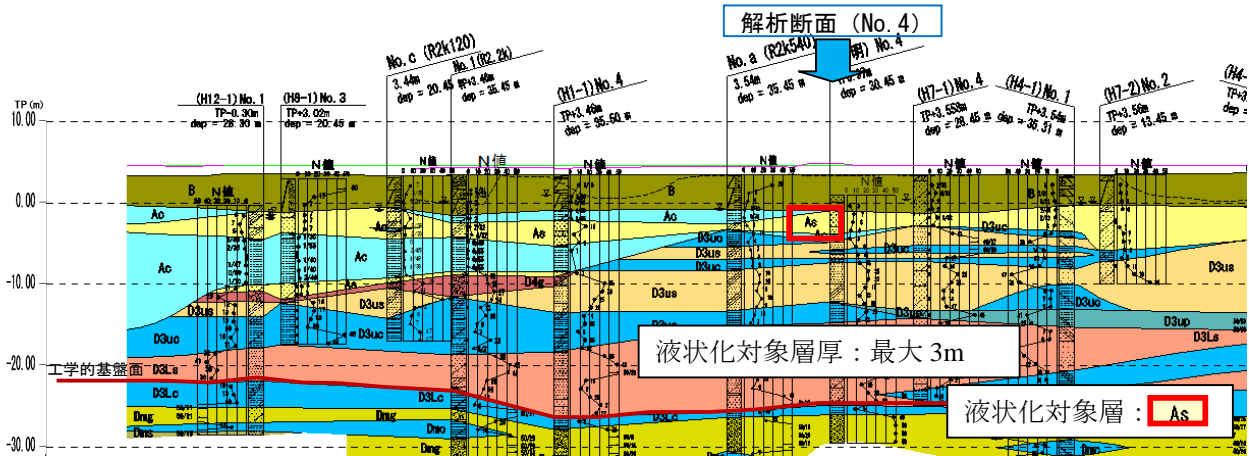


図-2 地質縦断面図 (右岸堤防)

物性値 (表-1) は対象範囲のボーリングデータの土質試験結果と N 値 (一般的な設計値) を総合的に判断して設定した。なお、二次元地震応答解析 FLIP で用いる諸定数には文献 2) を参考に設定した。

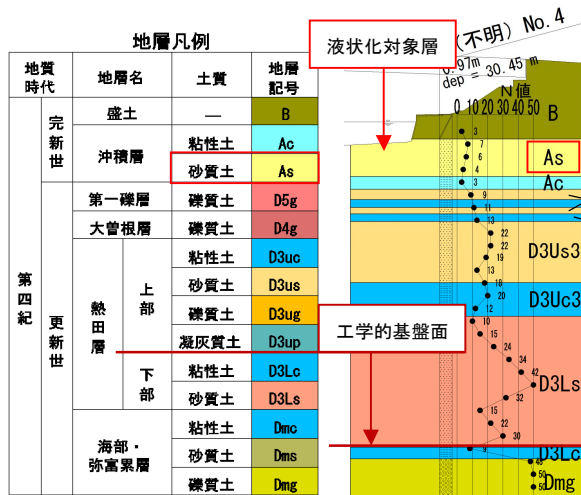


図-3 地質区分と対象断面の地質構成

表-1 地質物性値と液状化対象層

地層記号	代表 N 値	γ (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (度)	C (kN/m ²)	細粒分含有率	液状化対象層	
B	砂質土	3	17	8	18	21	0	25.8	○
As	砂質土	4	17	8	18	22	0	17.2	○
Ac	粘性土	1未満	14	5	15	0	6未満	69.4	
D3Us1	砂質土	7	17	8	18	25	0	55.5	
D3Uc1	粘性土	0	14	5	15	0	42	73.4	
D3Us2	砂質土	13	18	9	19	29	0	37.1	
D3Uc2	粘性土	7	16	7	17	0	42	73.4	
D3Us3	砂質土	15	18	9	19	30	0	37.1	
D3Uc3	粘性土	17	18	9	19	0	102	73.4	
D3Ls	砂質土	25	18	9	19	34	0		
D3Lc	粘性土	12	17	8	18	0	72		工学的基盤層

※地質調査 (ボーリング) の追加の効果

図-2 に示すように、ボーリング地点をほぼ等間隔にすることにより、的確な地質縦断面図の作成ができた。また、同じ地層の物性値を整理、比較することにより試験異常値の棄却を踏まえた設計に用いる物性値の設定、工事区間分類の設定を行うことができ、耐震対策工の質的向上に寄与できた。

3.2 液状化層の設定

液状化とは地下水水位以下の緩い状態の砂質土が、地震による振動で全応力が全て間隙水圧になることにより、砂質土の粒子間の有効応力 (せん断強度) がゼロになり、地盤の沈下や噴砂等が発生する現象である。液状化現象は埋立地や、河川・海岸沿い、河口部などの N 値が 20 以下、地下水水位が浅い場所で発生しやすく、対象範囲の地質の砂質土層 (As 層) はこれら条件に該当し FL 値の算定結果からも液状化層と設定した。

4. L1 耐震対策（堤体の安定：円弧すべり）

Y 川の L1 耐震対策は、兵庫県南部地震で見直された耐震対策として堤外地側（河川側）の高水護岸端部に鋼矢板や鋼管矢板（本検討断面は鋼矢板）が打設されており、L1（水平設計震度=0.18）の耐震対策として有効であることを確認した。なお、本検討断面において、堤内地側（民地側）で円弧すべりの所要安全率を確保できていないので、L1 の耐震対策が必要であることを確認した（図-4）。

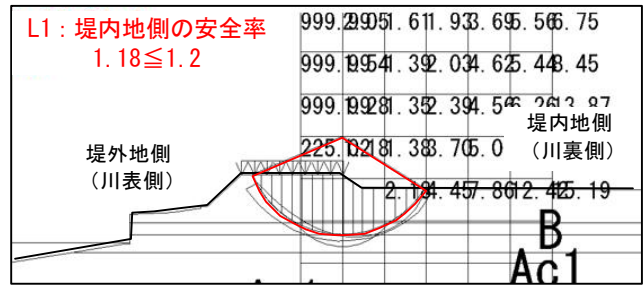


図-4 堤内地側の円弧すべり解析結果（L1）

5. 耐震対策工の必要性の検討

5.1 河川堤防における変状および二次被災

大規模地震動による河川堤防の変状は①堤防の沈下であり、沈下により二次被災として②津波の堤防越水がある。これらを模式化し図-5 に示した。

①堤防の沈下

- ・地震動による堤防の沈下，破壊（円弧すべり）
- ・液状化（側方流動）による堤防の沈下
（重力の影響により上載荷重の少ない～地盤の低い方へと側方流動が発生し，堤防部分の体積が減少するために堤防の沈下が発生）

②津波の堤防越水

- ・津波遡上により堤防沈下箇所，河川水の堤防越水が発生
- ・越流水による破堤の発生（および拡大）と堤内地の浸水被害の発生

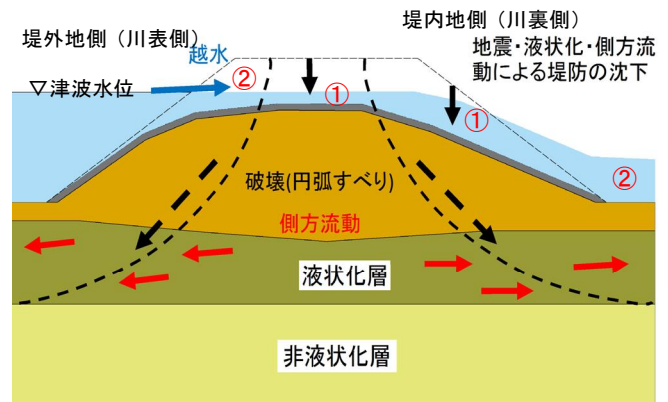


図-5 堤防における変状発生イメージ（無対策時）

5.2 液状化による堤防変形の解析手法（二次元地震応答解析 FLIP）と地震波形

現時点における日本での液状化に関する代表的な解析ソフトは、FLIP・LIQCA・ALID がある。動的解析は FLIP と LIQCA で、静的解析は ALID である。LIQCA と FLIP の違いとして、LIQCA は過剰間隙水圧消散過程を当初から組み入れた解析ソフトであったのに対し、FLIP は消散過程を組み入れてなかったことにある。ただし、検討時点では FLIP でも考慮可能になっていたため、解析ソフトは使用実績の多い FLIP とした。

FLIP により、現況断面および対策工施工断面の液状化発生状況，堤防沈下量の算定，鋼矢板の発生応力を算定した。

※河川堤防で ALID を使わなかった理由：検討時点での ALID は H28 改良版の前バージョンであった（沈下量が多くなる傾向）ことから ALID は使用しないこととした。

対象地点の L2 地震動は、過去地震最大モデルとし、地震動は N 方向と S 方向の地震波形を合成し、合成波最大振幅が最大となるような波形とした（図-6：最大加速度 355gal）。対象地点の照査外水位は TP+3.09m（地盤変動は含まず）である。

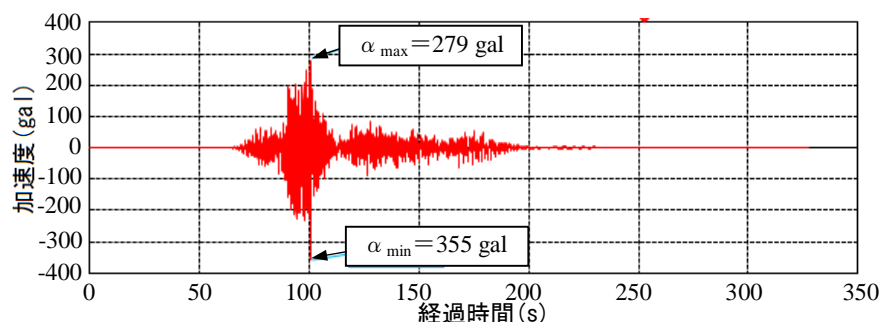


図-6 L2 地震波形（工学的基盤面での入力波形）

5.3 地盤特性と解析モデル

現況断面の解析モデルを図-7に示す。層厚約3mの液状化対象層（As層）は、堤防の盛土層直下に分布し地下水位より下にあるので、大規模地震動により液状化（および堤防変形）が発生する可能性は高い。

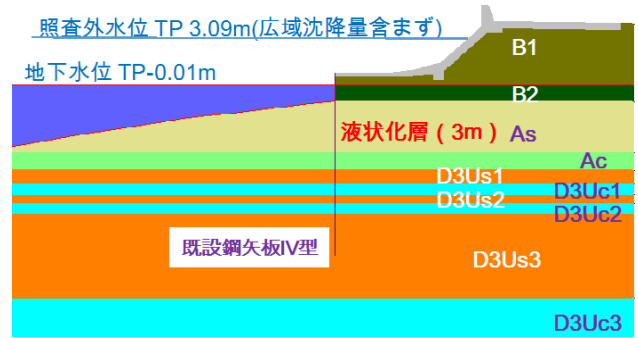


図-7 現況断面解析モデル

5.4 解析結果（液状化の発生の有無，変位量）

現況断面の解析結果として、過剰間隙水圧比の最大値分布（図-8）と堤防の変形（図-9）を示す。

過剰間隙水圧比の最大値分布（図-8）は、過剰間隙水圧比 1.0 を赤色で示しており、液状化対象層では一部では過剰間隙水圧比が 1.0 未満ではあるが全体で液状化が発生していることがわかる。変形（図-9）は、黒線が変形前で赤線が変形後である。液状化（流動化）により堤防の変形が生じ、最大堤防沈下量は約 20cm、最大水平変位は川側に約 50cm である。変形は堤防天端から液状化層の下まで生じている。

※パラペットによる止水機能：パラペット幅 40cm に対して最大水平変位は約 50cm なので、パラペットがずれた箇所からパラペット天端高よりも低い水位で河川水が流入する可能性があり、パラペットの止水機能は期待しない。

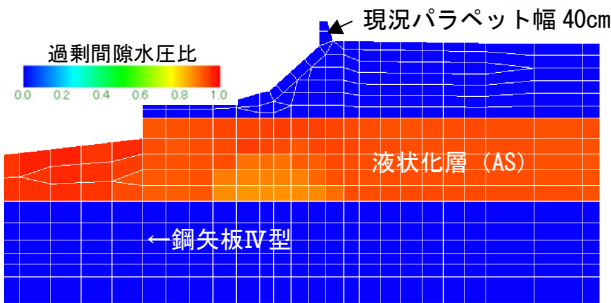


図-8 現況断面での過剰間隙水圧比の最大値分布図

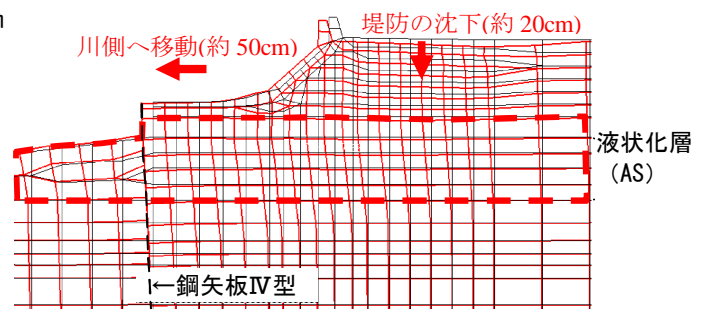


図-9 対策前現況断面変形図

5.5 耐震対策工の必要性の判断結果

現況断面での耐震対策工の必要性の判断を、対象地震発生後の残留堤防高と照査外水位（津波遡上水位）と比較し、「残留堤防高<照査外水位」の場合に「対策工が必要」とした。なお、パラペットは上述した水平方向への変位と幅の関係から止水機能を満たさないことが考えられるために、残留堤防高にはパラペットは考慮しない計画とした（計画断面の水平変位は小さくなるが、計画論として同様とした）。

表-2 現況断面変形諸量

位置	端点 (川表)	中央	端点 (川裏)	平均
①現況堤防天端高 ^{※1}	3.57	3.55	3.53	3.55
②沈下量 (m)	剛性低下	-0.18	-0.21	-0.21
	消散沈下	-0.01	-0.01	-0.01
	地盤変動	-0.36	-0.36	-0.36
③=①+②残留堤防高 ^{※1}	3.02	2.97	3.41	2.97
④照査外水位 ^{※1}	—	—	—	3.09
性能照査結果	③ (2.97) < ④ (3.09)			OUT
既設鋼矢板発生 ^{※2}	降伏M (478) < 583 < 全塑性M (693)			

※1：TP (m) ※2：kN・m

解析結果（表-2）より残留堤防高 2.97m は照査外水位 3.09m より低くなった。これより、津波遡上により河川水が堤防を越えて堤内地で浸水が発生し、さらに破堤の発生も想定され浸水被害拡大も懸念されるので耐震対策工（液状化～堤防沈下抑制工）が必要と判断した。また、既設鋼矢板の発生モーメントは、全塑性モーメント以下ではあるが、降伏モーメントを超えるので、対象地震発生後には補修が必要である。

6. 耐震対策工（液状化対策工）の検証

6.1 耐震対策工法（液状化対策工法）の選定

耐震対策工法（液状化対策工法）を河川構造物設計要領³⁾から抜粋し、表-3に示す6つの工法に分類した。これらは、「液状化の発生を防ぐ」工法と「液状化の発生による地盤沈下等を制御する」工法に分類でき

る。「液状化の発生を防ぐ」工法は、締固め工法・固化工法・排水工法・置換工法であり、液状化地盤を置換や排水を行うものである。

「液状化の発生による地盤沈下等を制御する」工法は、押え盛土工法・構造的工法である。Y川の液状化対策

工法を選定するにあたっての制約条件は、①周辺環境への配慮（騒音、振動、濁水等）、②許容沈下量に余裕がないため殆ど沈下を許容しない構造形式の選定、③用地制限のある施工法の選定、④経済性とした。対策工法は、一次選定として制約条件①～③に対して6工法から3工法（締固め工法・固化工法・構造的工法）とした。2次選定は経済性（制約条件④）を加えて総合的に判断して「構造的工法」とした。

表-3 液状化対策工法

目的	工法	特徴	一次選定	二次選定
液状化発生 の防止	締固め工法	・土の密度を大きくし、地盤の支持力やせん断力を上げる工法	○	
	固化工法	・土と固化材を攪拌混合し、液状化層を固化させる	○	
	排水工法 (ドレーン)	・堤体内の地下水位を低下させ、液状化を防止する工法		
	置換工法	・液状化層を良質材で置換える工法		
地盤沈下 の制御	押え盛土工法	・すべりに抵抗するモーメントを増加させて、すべり破壊を防止する工法		
	構造的工法 (矢板)	・矢板により、地盤を拘束することで液状化による側方変位を抑制し、堤防沈下を防ぐ工法	○	○

6.2 液状化対策工法の選定（二重矢板工法の選定）

構造的工法の矢板の打設位置と枚数は、既設鋼矢板があるので、以下の3つのパターンとなる。

表-4 矢板の打設位置と矢板の枚数

①高水護岸法尻（高水護岸）・1列	②高水護岸および法尻・2列	③堤体部・2列
× 残留堤防高<照査外水位	× 残留堤防高<照査外水位	○ 残留堤防高>照査外水位

対象範囲では前述したように兵庫南部地震後の耐震基準改訂に基づき低水護岸端部で耐震工事（鋼矢板IV型）が施工されている。上表の①案は前述した現況断面の解析モデルであり、鋼矢板を考慮しているが残留堤防高が照査外水位よりも低くなるために不採用案となる。②案も FLIP により検討したが、残留堤防高が照査外水位以下となることから不採用案となる。したがって、③案の形状（二重矢板工法）とした。

6.3 二重矢板工法の機能

二重矢板工法の耐震機能は、液状化（流動化）した砂が側方へ移動することを制御することと、円弧すべり面抵抗力（剪断力）の増加である（図-10）。

①堤防沈下量の制御

- ・液状化による堤内地側と堤外側への砂層の移動の制御による堤防沈下量の抑制機能

（二重矢板の外側は液状化による沈下は発生）

- ・鋼材剪断力による円弧すべり面抵抗力の増大機能

②津波の堤防越水

- ・堤防が沈下しても照査外水位より高くすることによる、河川水の堤防越水防止機能
- ・越流水による破堤の発生防止機能
- ・越水による堤内地の浸水被害発生防止機能

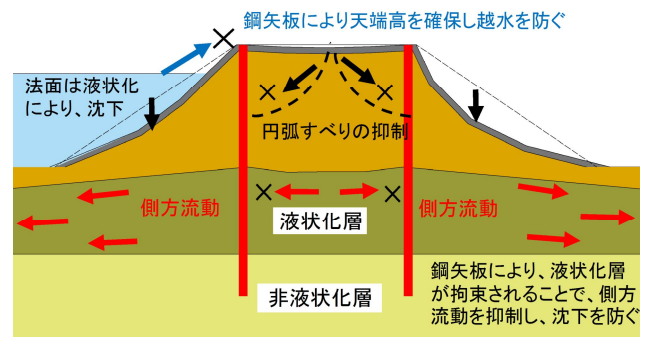


図-10 二重矢板工法での耐震効果（機能）模式図

6.4 計画断面の解析モデル（対策工設置）

計画断面の解析モデルでは、堤体直下に二重矢板を配置した（図-11）。二重矢板の長さは安定計算に基づき液状化層（As層）の下までとし、二重矢板の型数は構造計算により設定した。

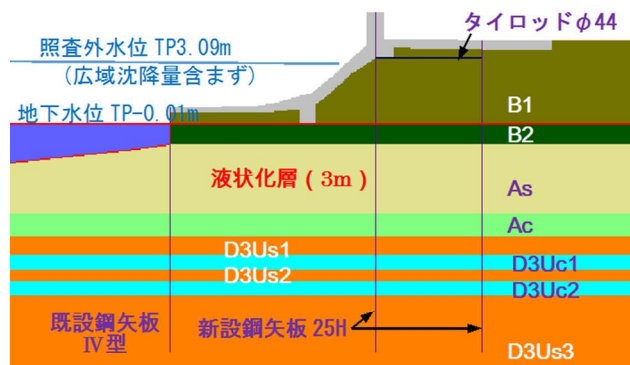


図-11 対策工解析モデル

6.5 解析結果（液状化の発生の有無，変位量）

計画断面の解析結果は、過剰間隙水圧比の最大値分布（図-12）と堤防の変形（図-13）を示す。過剰間隙水圧比の最大値分布は、現況断面と同様に液状化層全体で液状化が発生している。変形は、現況断面と同様に川側に移動しているが、最大水平変位は現況断面の約 50cm から約 20cm と約 30cm 減少している。最大沈下量は約 6cm で、現況断面よりも約 14cm 減少している。二重矢板で挟まれた堤防直下の液状化層でも液状化は発生しているにもかかわらず、水平方向・鉛直方向の変位が小さくなり、残留堤防高が照査外水位よりも高くなったのは二重矢板の剛性により地盤の側方流動を抑制しているからである。

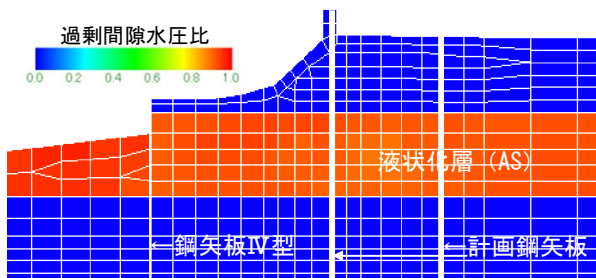


図-12 対策工断面過剰間隙水圧比の最大値分布

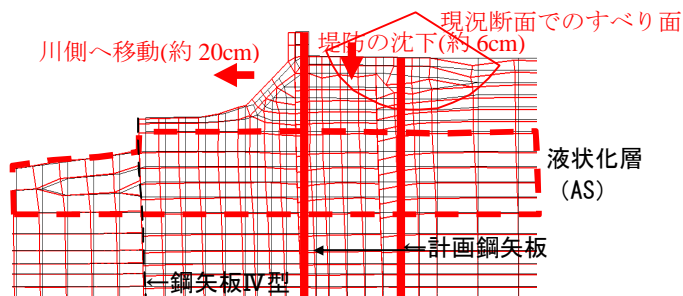


図-13 対策工断面変形図

6.6 耐震対策工効果

耐震対策工により、残留堤防高 3.17m が照査外水位 3.09m より高くなり堤防の安全機能が確保できること、既設鋼矢板の発生モーメントは降伏モーメント以下になることを確認した（表-5）。円弧すべりも鋼材がすべり面に入るので、所要安全率を確保できる（図-13）。

表-5 耐震対策工断面変形諸元

位置	端点 (川表)	中央	端点 (川裏)	平均
①計画堤防天端高 ^{※1}	3.60	3.60	3.60	3.60
②沈下量 (m)	剛性低下	-0.05	-0.06	-0.07
	消散沈下	-0.01	-0.01	-0.01
	地盤変動	-0.36	-0.36	-0.36
③=①+②残留堤防高 ^{※1}	3.18	3.17	3.16	3.17
④照査外水位 ^{※1}	-	-	-	3.09
性能照査結果	③ (3.17) > ④ (3.09)			OK
既設鋼矢板発生M ^{※2}	445 < 降伏M (478) < 全塑性M (693)			
新設鋼矢板発生M ^{※2}	降伏M (389) < 448 ≤ 全塑性M (448)			

※1：TP (m) ※2：kN・m

7. まとめ

二重矢板工法は、液状化現象そのものを抑制することを目的としていないが、液状化現象により発生する地盤の側方流動を矢板で拘束し、地盤の沈下を防ぐ工法である。河川堤防における耐震対策工（液状化対策と堤防の安定対策）として二重矢板工法の選定経緯と機能確保の事例を示した。

最後になりますが、本稿をまとめるにあたり名古屋市緑政土木局河川部河川工務課の皆様には、情報提供と本稿のとりまとめに関してお世話になりました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 国土交通省水管理・国土保全局治水課(H24.2)：河川構造物の耐震性能照査指針・解析-I，共通編-P3
- 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博(1997.6)：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾空港技術研究所 資料 0869
- 社団法人 中部建設協会(2003)：河川構造物設計要領 国土交通省中部地方整備局監修，P2-2-47