

特殊堤(アンカー構造による控え式矢板護岸)の耐震詳細設計に対する一考察

上平 拓弥

近畿地方整備局 福井河川国道事務所 工務第一課 (〒918-8015 福井市花堂南2-14-7)

本考察は、九頭竜川右岸1.2k～2.2k区間の特殊堤(アンカー構造による控え式矢板護岸など)に対する耐震性能照査および耐震詳細設計に関するものである。当該区間の特殊堤は、設置年代が古く、構造諸元が不明であったため、現地調査や再現設計を行い、構造諸元を設定することとした。耐震性能照査では、現行指針を参考とした静的照査法の適用性の評価した。その結果、土と構造物が一体となった特殊堤をより正確に評価できる照査手法として動的照査法を用いて照査を実施することとした。耐震詳細設計では、既設アンカーと狭隘地での施工であることに配慮し、小型杭打機を用いた固結工法(機械攪拌+高圧噴射攪拌による深層混合処理工法)による耐震詳細設計を行った。

キーワード 河川堤防, 特殊堤, 耐震性能照査, 耐震詳細設計

1. はじめに

現在、河川堤防の耐震性能照査は、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説」¹⁾(以下、指針という)に準拠して行われている。特殊堤に対する耐震性能照査は、指針の「自立式構造の特殊堤編」において、コンクリート擁壁式特殊堤と自立式矢板特殊堤について記述されているほか、「一問一答」²⁾において直接基礎形式の特殊堤について記述されている。しかし、特殊堤の構造は多種多様であるため、対象となる特殊堤の構造諸元を把握し、地震時の挙動を想定したうえで、各構造に適した照査を実施する必要があると考えられる。特に、古い堤防の場合には、構造諸元の把握が困難である。よって、特殊堤に対する正確な耐震性能照査の実施には、多くの課題を有するものと考えられる。

九頭竜川右岸1.2k～右岸1.4k区間は、感潮区間に位置する特殊堤区間である(図-1参照)。福井県では過去に福井地震を経験しているうえ、先の東日本大震災の影響によって、地域住民の地震に対する意識も高く、耐震性能の向上への要望も強い。そのため、特殊堤の耐震性能照査と耐震詳細設計を行った。

当該区間の特殊堤は、築造後40年以上が経過した古い構造物であり、当時の設計図面が残存していないために構造諸元の詳細が不明という課題を有していた。さらに、当該区間は、堤防前面には三国漁港として供用されている福井県管理の栈橋(直杭式横栈橋)が、背後地には三国町の産業及び観光のメインストリートである県道(三

国東尋坊芦原線)が近接した非常に狭隘な地形であり、施工条件も厳しい区間である。

このような条件のもと、本考察では、①特殊堤構造を可能な限り正確に把握し、②特殊堤の構造に適した耐震性能照査を実施することにより、③最適な対策工規模を設定することとした。



図-1 設計区間の平面位置図

2. 特殊堤の構造の正確な把握

特殊堤の構造を把握するため、残存資料の再調査をはじめ、地質調査、外観調査、潜水調査を実施し、その結果を台帳形式に整理した。整理結果をもとに再現設計を行い、特殊堤の構造諸元の推定した。以下に、その詳細を示す。

(1) 地質調査

地質調査では、地質調査結果をもとに地層縦断図を作

成し、縦断方向の地層の連続性を把握したうえで、横断方向の堆積層序を取りまとめた。その結果、比較的浅い深度に基盤岩が出現すること、基盤岩の出現深度は縦断方向において不規則であり、基盤岩の上位に堆積する液状化層（沖積砂質土層、As1層、As2層）の堆積層厚が1m～10m程度と大きく変化する特徴を有することが明らかになった。

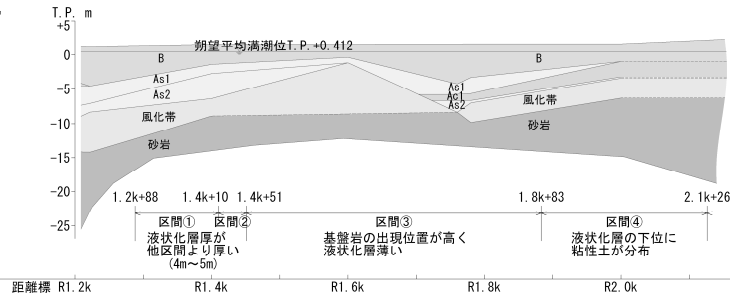


図-2 対象区間の縦断面図

(2) 外観調査、潜水調査

外観調査では、陸上からパラペット部を、海中からフーチング部と鋼材を調査した。その結果、躯体と鋼材が比較的健全な状態であることが明らかになった。さらに、潜水調査では鋼材の肉厚測定を実施し、最大5.7mmの腐食減肉が明らかになった。以上の2つの結果は後述する耐震性能照査にも反映した。なお、RCレーダーを用いた鉄筋探査も補足的に行い、既往の鉄筋調査結果と合わせて特殊堤構造復元設計の基礎資料とした。



図-3 外観調査結果の写真

(3) 構造形式の想定

当該区間では、下記4タイプの特殊堤が確認できた。

- ①アースアンカーによる控え式矢板護岸 (L=122m)
- ②ロックアンカーによる控え式鋼矢板 (L=41m)
- ③重力式特殊堤 (台座コンクリート) (L=432m)
- ④コンクリート杭式特殊堤 (L=243m)

図4に、今回考察するアンカー構造による控え式矢板護岸（①及び②）の標準的な断面形状を示す。

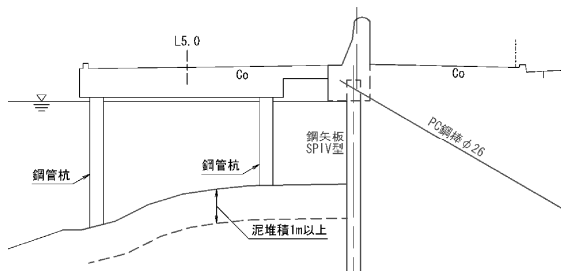


図-4 アンカー構造による控え式矢板護岸の断面形状

(4) 復元設計による構造形式の想定

当該地の特殊堤が築造された当時（S40年代と推定）に施行されていた基準、「社団法人日本港湾協会 港湾構造物設計基準 昭和42年4月」に準拠して実施した。アンカー構造による控え式矢板護岸の復元設計によるパラペット部の構造図を図-5に示す。耐震性能照査では、この結果を用いてパラペット部をモデル化した。

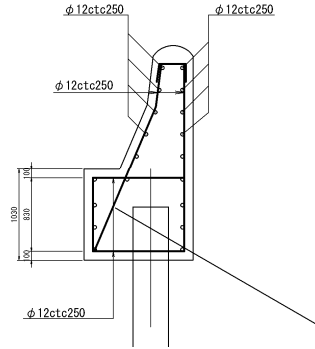


図-5 復元設計によるパラペット構造の想定図

3. 耐震性能照査

(1) 耐震性能照査の方針

指針によると、河川における自立式特殊堤の照査は、静的解析手法を用いた許容応力度照査となっている（表-1参照）。そこで、当該区間においては地盤と構造物に対する下記項目を満足できる手法の適用が必要となる。

- 特殊堤部に作用する慣性力の影響を考慮できる手法
- 液状化による土圧の影響を考慮できる手法（土と構造物が一体となった構造への適用性）

特殊堤における照査方法は、静的照査法と動的照査法に2分できるため、各照査法の上記項目に対する適用性を評価した（表-2参照）。その結果、上記の項目を満足できる動的照査法を適用する方針とした。解析コードは、港湾分野で多くの実績を有するFLIPを用いる方針とした。当該区間は河川堤防であるが、構造的には港湾施設に近いのでFLIPを適用した。

表-1 特殊堤における耐震性能の照査指針での取扱い

タイプ	延長	指針等での取扱い・課題
鋼矢板 + アースアンカー	L=122m	【指針等での取扱い】 ・「指針」での明記無し ・構造的に類似している控え式矢板護岸の場合は「一問一答」において、自立式矢板特殊堤の照査方法を適用して良いとの記述有り。 ・「指針」における自立式矢板特殊堤の照査は、静的解析手法を用いた許容応力度照査。
鋼矢板 + ロックアンカー	L=41m	

表-2 特殊堤における耐震性能の照査手法の適用性一覧表

対象	照査法	課題	本業務への適用性	適用
地盤	静的照査法 (ALID)	特殊堤に作用する慣性力の影響を考慮できない	△	「動的照査手法」を適用する方針
	動的照査法 (FLIP)	複雑な構造の場合、適用してよい	○	
構造物	静的照査法 (地震時保有水平耐力)	液状化に伴う土圧の作用を考慮できない	△	
	動的照査法 (FLIP)	複雑な構造の場合、適用してよい	○	

注) 動的照査法（解析コード FLIP）は、淀川や荒川などの河川における船着場（矢板護岸）の耐震性能照査にも用いられている。

(2) 耐震性能の設定

当該区間の特殊堤は、堤内地盤高が耐震性能照査において考慮する外水位（照査外水位）よりも低い地域に位置することから、レベル2地震動に対して確保すべき耐震性能を「耐震性能2」に設定した。（耐震性能2：地震後においても、耐震性能照査において考慮する外水位に対して自立式構造の特殊堤としての機能を保持する性能）

(3) 照査基準値の設定

アンカー構造による控え式矢板護岸では、図-6に示すように、堤防自体の変位量と、構造部材（前面矢板、アンカーボルト）の応力度に対して、表-3示す基準値により照査を行った。

表-3 各照査箇所における照査基準

照査箇所	項目	照査方法(基準)
堤防	①鉛直変位	残留堤防高>照査外水位
	②水平変位	目地のずれによる照査
前面矢板	③応力度	許容値270N/mm ² 以下(降伏)
アンカーボルト	④応力度	許容値547N/mm ² 以下(ロッド部の破断)
	⑤応力度	許容付着応力度0.8N/mm ² (アンカー部の定着)

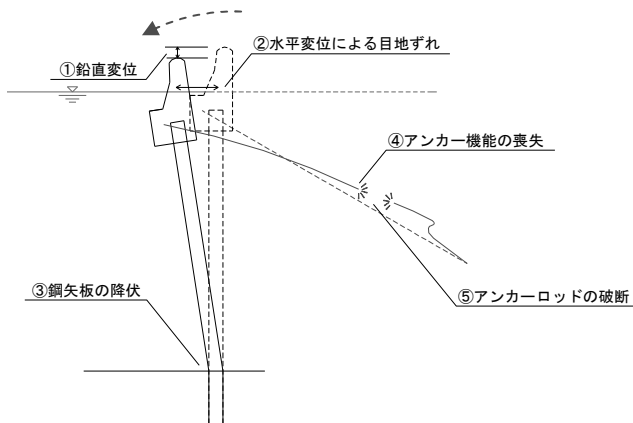


図-6 照査位置の概念図

a) 水平変位と鉛直変位の照査基準値

水平変位では、照査外水位位置における水平方向の目地ずれを照査した。

鉛直変位では、残留堤防高と照査外水位を照査した。

b) 部材の照査基準値

部材（鋼矢板、アンカーボルト）の照査基準値は、「指針」や「港湾施設の技術上の基準・同解説」³⁾（以下、港湾基準という）を参考に、表-4に示すように設定した。

表-4 各照査箇所における照査方法

構造部材名称	許容値	適用
前面矢板 (鋼矢板 SY295)	270N/mm ²	「耐震照査指針」に準拠、地震時の割増しを考慮した許容応力度は、10%安全率を見込み、降伏応力度の90%で設定した。 降伏応力度 295N/mm ² × 0.9 = 265.5 ≒ 270N/mm ²
アンカーボルト (SS400)	90N/mm ²	■許容付着応力度 PC 鋼棒を用いたアンカーとして、0.8N/mm ² で設定 ■アンカーロッド自体の許容応力度 SS400の有する許容応力度 90N/mm ² の1.5倍(地震時)の値で設定 許容応力度 60N/mm ² × 1.5 = 90N/mm ²

(4) 外力の設定（地震動の設定）

福井県では、中央防災会議において公開されている地震波形がないことから、「指針」で想定される地震波形の中で、当該区間と同等の地盤種別（Ⅰ種地盤～Ⅱ種地盤）となるものを、海溝型（L2-1）、直下型（L2-2）に対してそれぞれ設定した。

(5) 照査外水位の設定

照査外水位は、河川の平常時最高水位（波浪考慮）を基本とする。海溝型（L2-1）の場合は津波を考慮し、河川の平常時最高水位（波浪考慮）と比較を行い、どちらか高い方の水位に設定した。表-5に、各地震動に対する照査外水位およびその要因を示す。

表-5 各地震動に対する照査外水位および要因

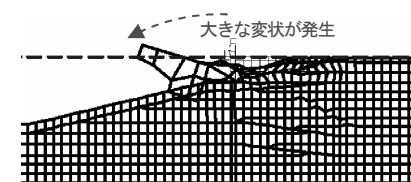
距離表	距離表	L2-1		L2-2	
		照査外水位 T.P.±m	要因	照査外水位 T.P.±m	要因
左岸	-0.2k	1.661	津波	0.421	平水位(波浪考慮)
	0.0k	2.239	平水位(波浪考慮)	2.239	平水位(波浪考慮)
	0.2k	1.790	平水位(波浪考慮)	1.790	平水位(波浪考慮)
	0.4k	2.200	平水位(波浪考慮)	2.200	平水位(波浪考慮)
	0.6k	2.240	平水位(波浪考慮)	2.240	平水位(波浪考慮)
	0.8k	1.728	津波	1.540	平水位(波浪考慮)
	1.0k	2.080	平水位(波浪考慮)	2.080	平水位(波浪考慮)
	1.2k	2.280	平水位(波浪考慮)	2.280	平水位(波浪考慮)
	1.4k	1.784	津波	1.660	平水位(波浪考慮)
	1.6k	2.030	平水位(波浪考慮)	2.030	平水位(波浪考慮)
	1.8k	1.910	平水位(波浪考慮)	1.910	平水位(波浪考慮)
	2.0k	2.120	平水位(波浪考慮)	2.120	平水位(波浪考慮)
	2.2k	1.858	津波	1.350	平水位(波浪考慮)
	2.4k	1.875	津波	1.850	平水位(波浪考慮)

(6) 特殊堤のモデル化

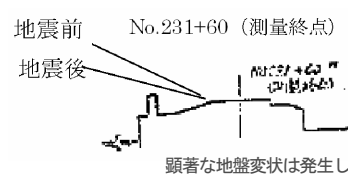
a) 静的照査法の適用性の確認

河川堤防の耐震照査において一般的に用いられる静的照査法を適用した場合、福井地震相当（加速度400gal）においても、大きく地盤変状する結果となった。しかし、福井地震の実績では、当該区間では大きな地盤変状が発生していないことが報告されている。つまり実現象と計算結果で大きく乖離したものとなった。したがって、本考察では静的照査法の適用が困難であると判断し、複雑な構造や慣性力を考慮できる動的照査法を適用した（図-7参照）。

■福井地震相当（400gal）-静的照査法の結果



■福井地震(H23)-実績



静的な解析では
実現象を正しく
再現できないもの
と判断

図-7 アンカー構造による控え式矢板護岸の断面図

b) 動的照査法におけるアースアンカーのモデル化

アースアンカーは、沖積砂質土層（As2層）に定着（定着長7m）しているが、As層（As1, As2）は地震時に液状化し、流動（最大水平変位14cm程度）することが解析で確認された。そのため、地震時にはアンカーがその機能を喪失するものと判断し、耐震性能照査および対策工の検討では、アースアンカーをモデル化しない方針とした（図-8参照）。

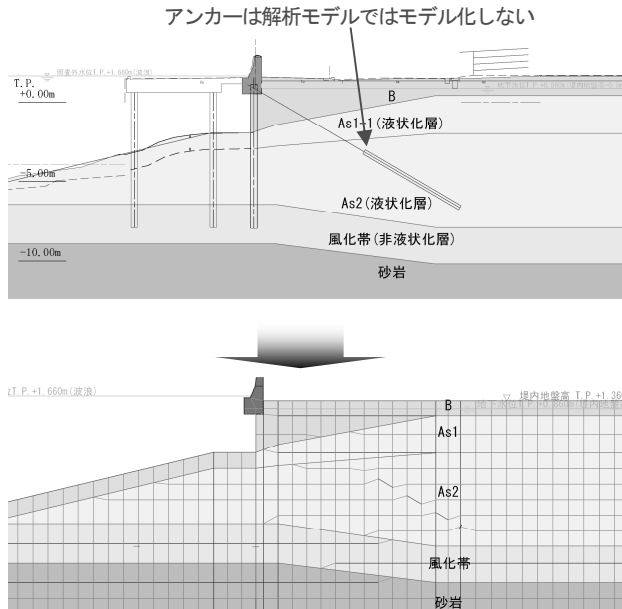


図-8 解析モデル図

c) 動的照査法におけるロックアンカーのモデル化

ロックアンカーは、風化帯に定着（定着長4.0m）している。風化帯の上位には液状化層（As層）が堆積しており、地震時にはAs層が液状化により流動し、タイロッドに許容値以上の応力が発生することを解析で確認した。（発生応力度622.1N/mm²＞許容値547.0N/mm²=NG）

よって、地震時にはタイロッドが破断し、アンカー機能を喪失するものと判断し、ロックアンカーをモデル化しない方針とした。

(7) 耐震性能照査結果

先述したモデルを用いて、現況特殊堤に対する耐震性能照査を実施した。その結果、液状化による側方流動によって前面の鋼矢板に発生する応力度が許容値を超えるため、地震時には矢板が塑性化し、耐震性能を満足しなかった（表-6、図-9、図-10参照）。

表-6 耐震性能照査結果の一覧表（特殊堤）

地震動 (指針)	現況						部材		
	特殊堤								
	水平変位 (cm)	照査 基準	判定	鉛直変位 (cm)	照査 基準	判定	応力度 (N/mm ²)	照査 基準	判定
L2-1	53.9	79	OK	3.2	106	OK	348.4	270	NG
L2-2	38.6	79	OK	2.2	118	OK	287.3	270	NG

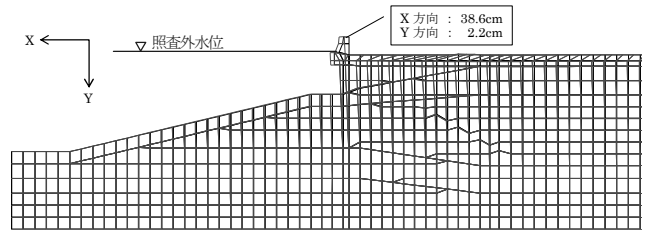


図-9 液状化による変形図（地震動：L2-2）

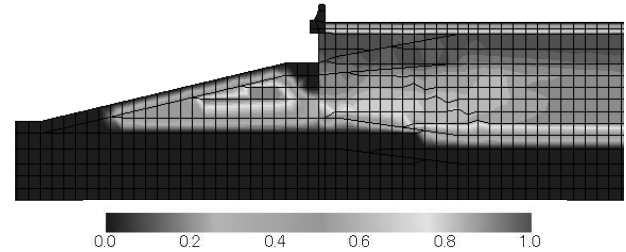


図-10 過剰間隙水圧比(Δu)の分布図（地震動：L2-2）

4. 耐震対策工の検討

耐震対策工は、施工条件や経済性より最適工法を選定し、その対策効果を動的照査手法を用いて確認することによって行った。以下にその詳細を示す。

(1) 対策工の選定方針

当該地区における対策工の選定方針を以下に示す。

- 液状化（側方流動）対策を目的とする
- 重要な構造物（栈橋、県道）が近接していること、また特殊堤本体へ影響を及ぼさないことを考慮し、低変位型の対策を適用する
- メインストリートである県道の交通機能確保（最低、片側通行）した状態で施工が可能である
- 既設のアンカーロッドを切断しない

(2) 耐震対策工の検討

対策工の検討では、一般的に考え得る液状化対策工（密度増大工法、過剰間隙水圧消散工法、固結工法、鋼材を用いた工法）を先述した選定方針において比較検討し、固結工法を選定した。さらに、固結工法において、液状化対策の層厚（最大9m程度）、経済性より「機械攪拌＋高圧噴射（低変位型）」を選定した（表-7参照）。

表-7 対策工法の選定表

代表的な工法	静的砂杭 締固め工法	グラベル ドレーン工法	固結工法 (低変位型)	鋼材を用いた 工法
周辺への影響	変位あり ×	変位なし ○	変位なし ○	変位なし ○
支障物件	アンカーを避けた 対策が不可 ×	アンカーを避けた 対策が不可 ×	アンカーを避けた 対策が可 ○	アンカーを避けた 対策が不可 ×
施工ヤード	県道を全面通行止 とする必要性あり ×	県道を全面通行止 とする必要性あり ×	県道を全面通行止 とする必要性なし ○	県道を全面通行止 とする必要性あり ×
評価	×	×	○	×

(3) 当該区間で採用した耐震対策工法

アンカー位置などの不確実な条件（資料が古いため）を有するため、確実にアンカーを保持できる「高圧噴射攪拌工法」を適用することも考えられるが、事前の試掘によるアンカー位置の確認を条件に、「機械攪拌+高圧噴射攪拌工法」の適用を採用した。「機械攪拌+高圧噴射攪拌工法」は、「高圧噴射攪拌工法」と比較すると安価な工法（1/3程度）であるため、コスト縮減へ寄与できる（図11、図12参照）。



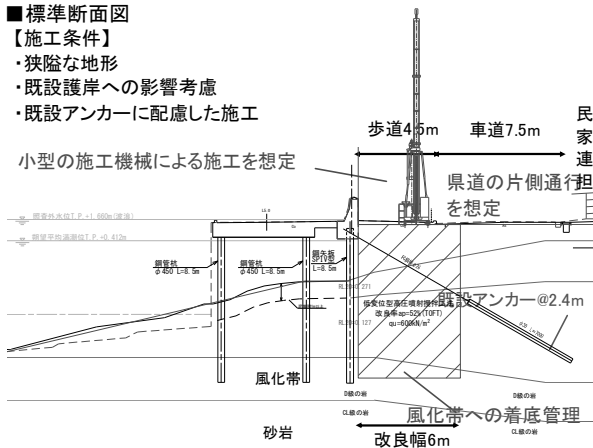
図-11 対策範囲の現地写真

■標準断面図

【施工条件】

- ・狭隘な地形
- ・既設護岸への影響考慮
- ・既設アンカーに配慮した施工

小型の施工機械による施工を想定

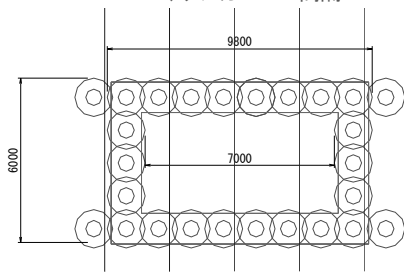


■改良体の平面配置図

高圧噴射攪拌で対応（中央の丸部が攪拌翼）

- ・改良幅6m、改良深度9m、改良径φ1400mm
- ・改良強度 $q_u=600\text{kN/m}^2$ 、改良率52% (TOFT)

↓アンカー2.4m間隔



既設アンカーを避けた改良体の配置

図-12 「機械攪拌+高圧噴射攪拌工法」の標準断面図

5. まとめ

本考察では、アンカー構造による控え式矢板護岸の特殊堤に対する耐震性能照査において、下記に示す知見を得た。なお、これらが、今後の特殊堤の耐震性能照査および耐震詳細設計の参考となれば幸いである。

- 今まで明確に設定されていなかった控え式矢板護岸の照査基準値を、「指針」や「港湾基準」を参考に設定した。
- 矢板護岸など慣性力の影響を受ける構造に対して耐震性能照査を実施する場合は、動的照査手法の適用が望ましいことを確認した。
- 液状化によりアースアンカーやロックアンカーは、その機能を喪失（定着力の低減、アンカーロッドの破断）する結果となった。よって、当該区間の控え式矢板護岸の耐震性能照査では、アンカーをモデル化する必要がないことが明らかとなった。

6. 今後の課題

本考察では、特殊堤の耐震性能照査の一例として、「アースアンカーやロックアンカーによる控え式矢板護岸」の耐震性能照査結果を示した。当該区間では、このほかにも、「重力式特殊堤（直接基礎）」や「コンクリート杭式特殊堤」の区間を有しており、これらの特殊堤に対する耐震性能照査も今後実施する予定である。

全国には、当該地のように築造年代が古く、かつ設計図が現存しないために構造諸元を把握できない特殊堤が多く存在しており、今後、これらの特殊堤の耐震性能照査をいかに効率的かつ効果的に実施するかが課題となるもの考える。これらの特殊堤は、銘板などにより築造年代が判明することも多いため、築年代ごとの構造のトレンド把握、耐震照査結果の蓄積と傾向の分析などにより、構造の詳細が不明な場合でも、ある程度の構造と耐震性能の傾向の把握は可能である。さらに、こうした知見をデータベースとして蓄積することは、今後の耐震性能照査の精度向上において非常に重要なポイントとなるものとする。具体的には、撤去を含む、耐震対策などの特殊堤関連工事を行う際に特殊堤の構造を試掘などにより実際に確認し、それらのデータを、築堤年代や構造別に体系的に区分したデータベースの作成が有効と考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，2012.2
- 2) 国土交通省：一問一答，2007
- 3) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.7