

統合物理探査による河川堤防の健全性評価 について

瀬 能 真 一

関東地方整備局 関東技術事務所 環境技術課 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

東北地方太平洋沖地震等により、甚大な被害を受けた関東地方整備局管内の河川を対象に新たな手法である統合物理探査手法を用いて堤防内部のゆるみ等を把握し、地震後の既存堤防の浸透に対する健全性（安全性）の評価を行った内容について記述する。

キーワード 物東北地方太平洋沖地震、物理探査、非破壊、河川、堤防、耐浸透、安全性

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震等により、関東地方整備局管内の堤防等河川管理施設では4水系10河川が被災が及んだ。特に利根川（下流部）、霞ヶ浦、那珂川、久慈川、小貝川等の河川では、沈下やすべり、クラック等の甚大な被害が発生し、それらの総延長は740kmにも及ぶ。このため、平成23年4月に設立された「関東地方河川堤防復旧技術等検討委員会」より、堤防等河川管理施設の被害状況の検証等の技術的助言を頂きながら復旧工事が進められ、平成24年6月までに概ね工事が完了した。

しかし、大規模な被災を受け復旧工事を行った箇所以外の見えた目上は健全に見える堤防でも内部の状況が不明

確であり、堤防内部のゆるみ等を把握する必要があると委員会から提案された。そのため、平成24年3月に「統合物理探査検討会」、同5月に「関東地方河川堤防復旧技術等検討フォローアップ合同委員会」が設置し、被災後の河川堤防の健全性（浸透）の評価を目的として、堤防内部の状況を把握するための新たな手法である統合物理探査を実施した。

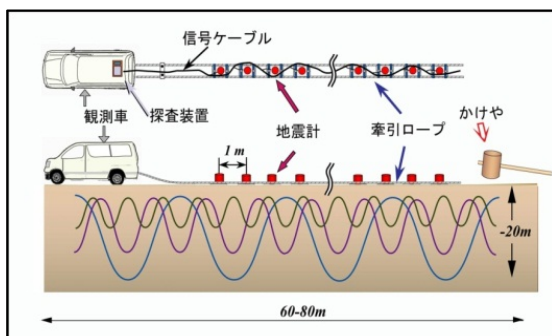
本報告は、統合物理探査手法を用いた堤防の健全性（浸透）評価の内容について報告するものである。

2. 統合物理探査の概要

統合物理探査とは、複数の物理探査により異なる物性値断面を求め、既存資料を加味して総合的に解析することにより、堤体と基礎地盤の内部構造と土質特性を推定し、合理的に河川堤防の安全性評価を行こなう手法である。

(1) 高精度表面波探査（ランドストリーマー）

統合物理探査の構成技術としては、ランドストリーマー表面波探査、牽引式電気探査、スリングラム電磁探査の3種類が一般的であるが、本報告では主として表面波探査、牽引式電気探査を対象とした。

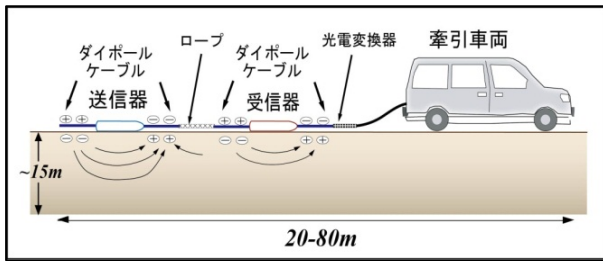


利根川下流堤防上でのランドストリーマー表面波探査風景

■波長によって伝播する深さが異なり、速度も異なるという表面波の分散特性に基づいて地下のS波速度構造を推定する手法。土研で開発した「ランドストリーマー」を用いることで、作業効率・解析精度が向上し、世界的にも広く利用されるようになった。

図－1 高精度表面波探査の概要

(2) 牽引式電気探査 (オームマップパー)



小貝川堤防での
牽引式電気探査風景

■送信部のダイポールケーブルに正負の交番電荷を与えると、地盤との間にコンデンサーが形成され地盤に電流が流れる。これにより受信部側付近の地盤にも電流が流れるので、受信部のダイポールケーブル区間に電位差が発生する。この電位差から地下の比抵抗分布を求める。

図－2 牽引式電気探査 (オームマップパー) の概要

3. 物理探査実施区間の設定方法と物理探査延長

(1) 既往資料の整理

被災の大きかった利根川（下流部）、霞ヶ浦、小貝川において、以下の項目について表－1に示す既往資料整理シートにて整理し、実施区間設定の根拠資料とした。

- ・地盤条件（堤体・基礎地盤の土質、治水地形分類（旧河道、干拓堤、氾濫平野等））
- ・既往点検結果（概略点検、詳細点検）
- ・被災履歴等（漏水、法崩れ、クラック等）
- ・重要水防箇所（漏水）
- ・既設漏水対策（遮水矢板、ドレーン等）

表－1 既往資料整理シート

河川名・左右岸(区間)		距離標(km)											
		50.5 59.0 59.5 60.0 60											
地盤条件	堤体土質	S											
	基礎地盤土質	S/C											
治水地形分類	治水地形分類	自然堤防											
	治水地形分類	氾濫											
堤防条件	堤防高(m)(震災後)	13.17	10.06	9.95	10.34	10.23	10.48	10.30	10.62	10.51	10.61		
	堤防沈下量(m) 沈下(+)	0.08	—	0.06	0.04	0.09	0.09	0.08	0.07	0.10	0.06		
既往点検結果	概略点検結果(A~D) H17	C	C	C	C	C	C	C	D	D	D		
	詳細点検位置・詳細点検結果(透水係数)				38.5								
はん蓋注意水位における平均動水勾配	はん蓋注意水位における平均動水勾配	0.004	高規格	0.002	0.003	0.020	0.011	0.025	0.048	0.050	0.062		
	被災箇所・事象(出水)												
被災条件	被災箇所・事象(地震)												
	被災箇所・事象(地震)												
重要水防箇所	重要水防箇所												
	重要水防箇所												
横断構造物	横断構造物	○◎				○		○		○			
	横断構造物												
既設対策工(鋼矢板等)	既設対策工(鋼矢板等)												
	既設対策工(鋼矢板等)												
工事区間	工事区間												
	工事区間												
地震被災ランク	地震被災ランク												
	地震被災ランク												
探査区間	探査区間												
	探査区間												
堤体安全性評価結果(浸透)	堤体安全性評価結果(浸透)			b	b	a	b	b	d1	d1	d1		
	堤体安全性評価結果(浸透)			d1	b	a	a	a	d1	d1	d2		
基礎地盤安全性評価結果(浸透)	基礎地盤安全性評価結果(浸透)												
	基礎地盤安全性評価結果(浸透)												
総合安全性評価結果	総合安全性評価結果	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK		
	総合安全性評価結果												
地震危険度判定結果(基礎地盤)	地震危険度判定結果(基礎地盤)			b	a	a	a	a	b	b	b		
	地震危険度判定結果(基礎地盤)												

(2) 観測対象区間の設定

作成した既往資料整理シートを基に想定される被災リスクを4つのランクに分け、被災発生の可能性が高いと予想される範囲から表－2に示す選定基準により各河川の対象範囲と探査延長を設定した。

表－2 各河川探査対象範囲と探査延長

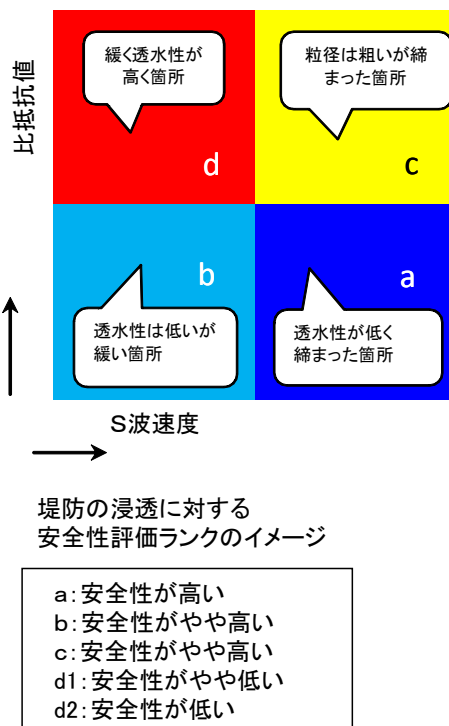
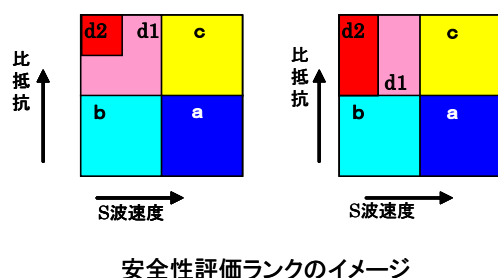
河川事務所	対象範囲	探査延長	対象範囲設定上の選定基準
霞ヶ浦河川事務所	西浦・北利根川堤防 西浦:121km 北浦:18km	25.75km	◆3.11の地震において干拓堤区間が多く被災したため、干拓堤区間を対象範囲として設定した。
	北浦右岸・左岸上流堤防 右岸:36.25km 左岸:27.5km	25.89km	◆被災ランクC(被災の可能性大)及びB(被災の可能性あり)のうち、下記による区間を設定した。 ①地質による重状区間 ②沈下量が0.1m以上発生した区間 ③堤防高比高が2m以上の区間
	北浦左岸下流・新川・他堤防 全体:54.36km	25.0km	
小計	257.11km	76.64km	
利根川下流河川事務所	利根川下流右岸堤防 全体:27.0km	21.23km	◆須賀・横根堤区間は、平成23年度の出水を経験して安全性が確認されていることから、出水位が低かった小貝川下流部と利根川上流部について対象範囲を設定した。特に被災箇所を指定した。
	利根川下流左岸堤防 利根川左岸:17.2km 小貝川下流:14.0km	30.1km(山付等を除く)	また、堤防高さ(10m程度)や堤防横断方向に一樣でない区間(旧川跡、旧堤)については、補助測線(堤防小段など)を配置した。
小計	58.2km	51.33km	
下館河川事務所	小貝川 32.14km(左右岸)	32.14km	◆平成23年度の出水を経験して安全性が確認されている。しかし、平地の蛇行河川であり、旧川箇所が被災したため、被災箇所または、旧川箇所を対象範囲として設定した。
小計	32.14km	32.14km	
合計延長(km)	347.45km	160.11km	

※上記、対象範囲は距離標延長、探査延長については、探査距離延長とした。

4. 浸透に対する堤防の健全性評価の考え方

統合物理探査で得られるS波速度と比抵抗のクロスプロットにより、震災前の堤防のゆるみ、N値とS波速度の相関から河川毎に閾値を設定し、浸透に対する安全性評価断面を作成した。

- ・設定した閾値を用いて、S波速度断面、比抵抗の関係から堤防の安全性評価断面を作成。
- ・堤防の安全性評価ランクは、S波速度と比抵抗の関係から4種類の評価（a～d）にランク分けを行った。
- ・安全性が低い範囲（dランク）では、d1とd2の二つに分け、特に浸透に対する安全性が低い範囲として抽出した。



図－3 安全性評価ランクのイメージ

5. 統合物理探査結果から見た浸透に対する堤防の安全性評価

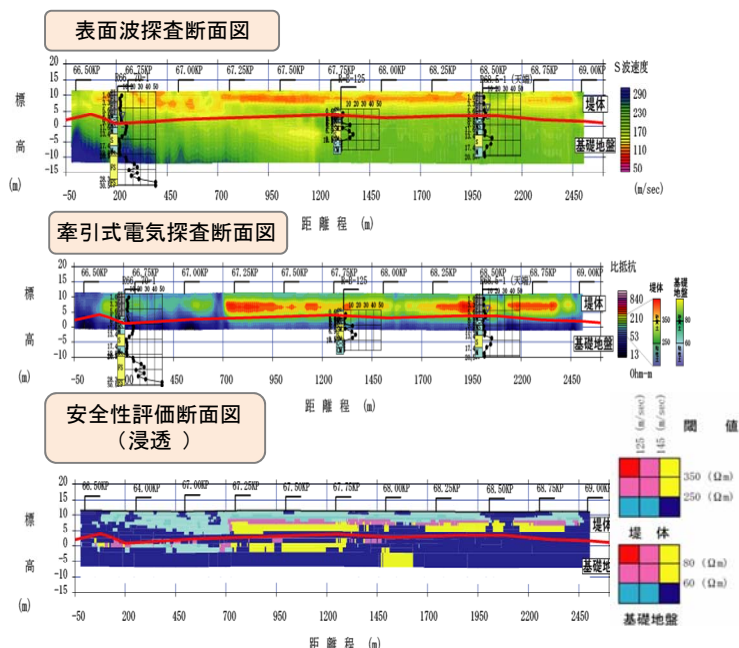
物理探査実施区間において相対的に堤防の安全性が低いと推定された区間の延長は、霞ヶ浦で3 km、利根川下流部で8.3 km、小貝川で3.8 km、各河川毎の探査延長に対する割合は、霞ヶ浦で約4%、利根川下流部で約16%、小貝川で約12%という評価となった。

表－3 浸透に対する安全性が低いと推定された区間

事務所名	安全性が低いと推定された範囲				
	河川名	左右岸	区 間	延長(km)	
霞ヶ浦	外浪逆浦	右岸	3.50 k ~ 4.00 k	0.50	
			4.25 k ~ 4.75 k	0.50	
	北利根川	右岸	1.00 k ~ 1.25 k	0.25	
			2.75 k ~ 4.00 k	1.25	
			4.25 k ~ 4.75 k	0.50	
小計			3.00		
利根川下流	利根川	左岸	68.00 k ~ 68.50 k	0.50	
			69.00 k ~ 71.25 k	2.25	
			71.25 k ~ 74.00 k	2.75	
		右岸	59.80 k ~ 61.00 k	1.20	
			63.30 k ~ 63.80 k	0.50	
			63.70 k ~ 64.10 k	0.40	
			67.20 k ~ 67.75 k	0.55	
			77.60 k ~ 77.70 k	0.10	
			82.90 k ~ 83.00 k	0.10	
	小計			8.35	
下館	小貝川	右岸	36.00 k ~ 36.20 k	0.20	
			33.80 k ~ 34.20 k	0.40	
			36.60 k ~ 36.80 k	0.20	
			38.00 k ~ 38.20 k	0.20	
			38.80 k ~ 39.20 k	0.40	
			39.80 k ~ 40.00 k	0.20	
			44.40 k ~ 44.60 k	0.20	
			46.00 k ~ 47.80 k	1.80	
			52.20 k ~ 52.40 k	0.20	
	小計			3.80	
	合 計			15.15	

表－4 安全性が低いと推定された区間の割合

河川名	探査範囲 (km)	安全性が低いと推定される区間 (km)	安全性が低いと推定された区間の割合 (%)
霞ヶ浦	76.64	3.00	3.9
利根川下流	51.33	8.35	16.3
小貝川	32.14	3.80	11.8
合計	160.11	15.15	9.5

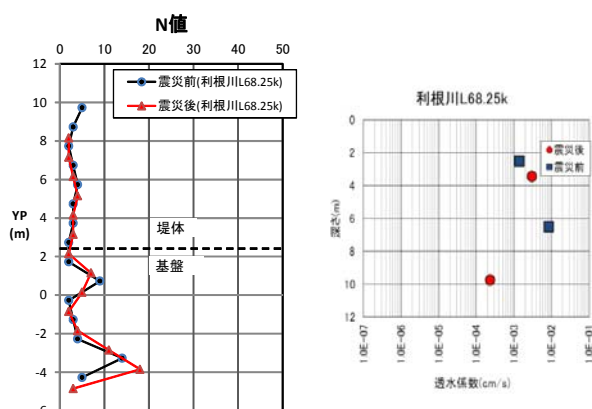


6. 浸透に対する堤防の安全性が低いと推定された区間の詳細調査

統合物理探査により相対的に安全性が低いと推定される範囲では、詳細調査として代表箇所における地質調査（ボーリング等）を行い震災前と比較し、震災前後で浸透に対する機能が低下（N値の低下・透水係数の増加）している箇所では、浸透流解析による詳細な評価検討を行った。なお、小貝川上流部については、平成23年度

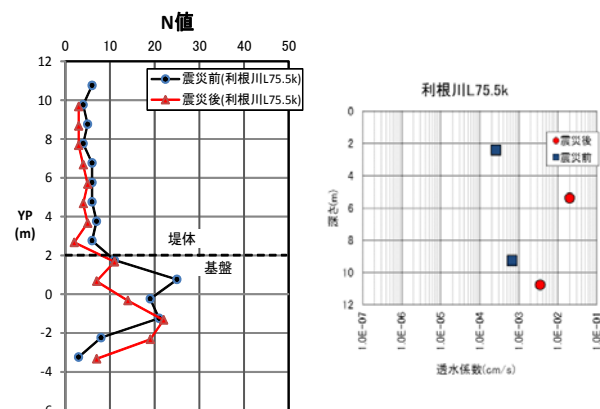
に出水を経験し、浸透に対する堤防の安全性が確認されていることから詳細調査は実施していない。また、霞ヶ浦については、詳細調査の結果、震災前後の透水係数がほぼ同等であったため、浸透流解析は実施していない。

震災前後の耐浸透性の機能がほぼ同等の箇所（利根川の例）

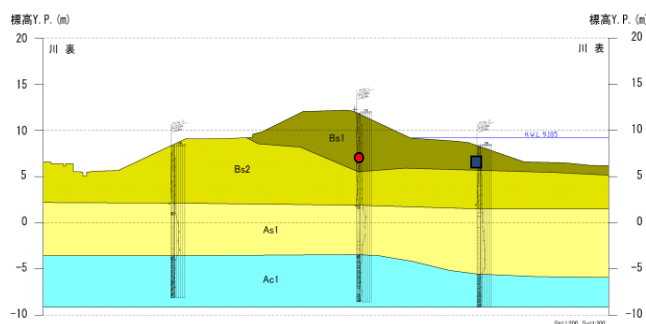


■ほとんどの区間では、耐浸透性の機能（N値・透水係数）が従来と同等の性能と推定される。

震災前後の耐浸透性の機能が低下している箇所（利根川の例）



■一部区間では耐浸透性の機能の低下（N値の低下、透水係数の増加）が見られた。そのため、浸透流解析を実施し安全性の照査を実施した。



安全性照査結果			
評価項目	震災前	震災後	
パイピング iv	0.563	0.496	
評価 ih	0.588	0.490	
すべり 川裏Fs	2.077	1.776	
評価 川表Fs	2.119	2.254	

安全性評価項目	照査基準	震災前	照査結果	震災後	照査結果	判定	備考
基礎地盤のパイピングに対する安全性	局所動水勾配iv	<0.5	0.563	OUT	0.490	OK	Bs1の透水係数が大きくなったことで、浸透線の上昇が抑止され、パイピングに対する安全率が上昇した。
	局所動水勾配ih	<0.5	0.588	OUT	0.496	OK	
堤体のすべり破壊に対する安全性	川裏すべりFs	≥1.44	2.077	OK	1.776	OK	川裏すべりFsは地震前と比べて低下したものの、照査基準を上回った。
	川表すべりFs	≥1.0	2.119	OK	2.254	OK	

図－5 詳細調査及び再評価（利根川下流部）

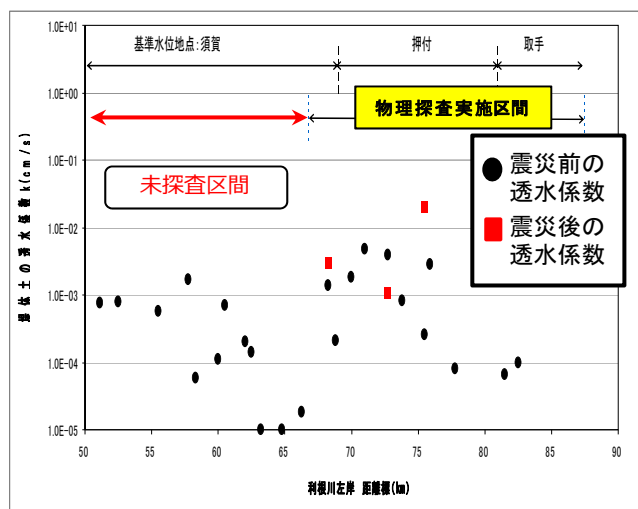
※詳細調査内訳

- ・利根川下流部で5箇所（内、地震後に透水係数が増大した1箇所において浸透流解析を実施）
 - ・霞ヶ浦（外浪逆浦、北利根川、西浦）で3箇所
 - ・小貝川下流部で1箇所
- 計9箇所で行った詳細調査を実施。

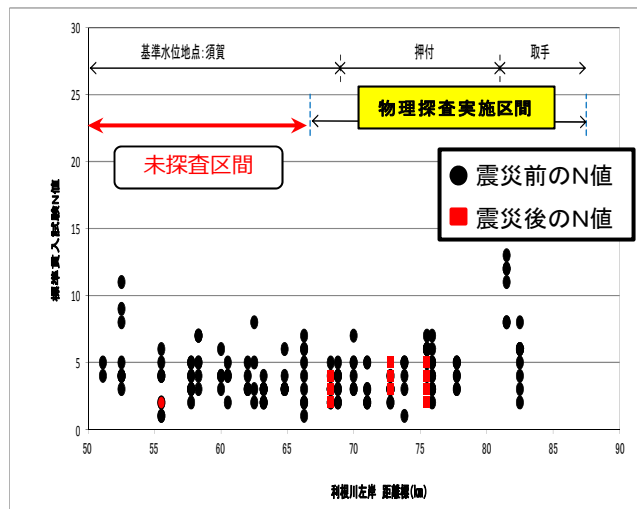
7. 未探査区間における浸透に対する堤防の安全性評価の推定方法

- 1) 探査区間の詳細調査結果から、地震前と比べて地震後に透水係数が大きくなった利根川下流部の1箇所（浸透流解析により浸透に対する安全性が確保されていることを確認）を除き全ての耐浸透性の機能（N値、透水係数）が地震前後で大きな変化が無いことを確認した。
- 2) 既往点検結果の資料（N値、透水係数等）からS波速度、比抵抗値を推定し、安全性評価を実施した結果、未探査区間においても浸透に対する堤防の安全性が概ね地震前の堤防と同等であることが確認できた。

距離標と透水係数の関係(利根川の例)



距離標とN値の関係(利根川の例)



■探査区間の透水係数は、地震前後で変化がないことを確認

※75.5kpについては、地震後に透水係数が増大しているため、浸透流解析を実施し、安全性が確保されていることを確認。

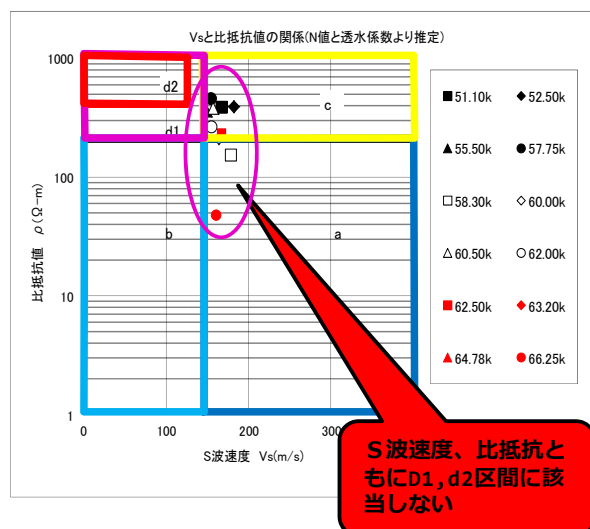
■探査区間のN値は、地震前後で変化がないことを確認

未探査区間のN値・透水係数から、S波速度・比抵抗値を換算した。

その結果、統合物理探査を実施していない区間では、S波速度、比抵抗値ともにd2、d1区間に該当しなかった。

これにより、未探査区間についても浸透に対する堤防の安全性が地震前と概ね同等であると判断した。

未探査区間のクロスプロット(利根川の例)



図ー6 未探査区間における堤防の安全性評価の推定例

8. 河川堤防の健全性評価に伴う統合物理探査の位置づけ

今回の結果から統合物理探査の河川堤防の安全性評価への適用について考察すると、現在の統合物理探査の精度では浸透に対する安全性が低い数m程度の区間の抽出は困難である。被災事例や既往調査資料の情報と合わせて用いるのであれば、浸透に対して堤防の安全性が低い

と思われる箇所の一次スクリーニングの手段として有効と言える。但し、検証として探査範囲の代表箇所において、開削調査やボーリング調査を実施し、統合物理探査結果の評価に対する検証が必要である。

9. まとめ

今回実施した統合物理探査手法は、河川堤防の浸透に対する安全性を評価する上で、非破壊により効率良く堤防内部のゆるみ等を把握するための一次スクリーニング的な役割として有効であることが確認できた。しかし、個々の探査技術は確立されているものの統合物理探査手法としては未だ確立されていない技術であり、現状では、河川堤防の安全性等を評価する手法としてルーチン的に進めることができないことや、既往の土質試験結果（N値、透水係数、細粒分含有率等）と物理探査データ（S波速度、比抵抗）の相関性（データのバラツキの解明）など明らかにしなければならない各種課題が抽出された。そのため、浸透に対する堤防の安全性評価方法の精度向上として、N値とS波速度、透水係数と比抵抗及び、土質別S波速度と比抵抗の関係について、バラツキの原因

を究明し、相関を高めるための技術的な検討が必要である。河川堤防の健全性等を評価する手法として系統化されていないことや、既往の土質試験結果（N値、透水係数、細粒分含有率など）と物理探査データ（S波速度、比抵抗）の相関性（データのバラツキの解明）など明らかにしなければならない課題がある。今後は、統合物理探査手法による河川堤防への健全性等を評価する手法としての適用に向けて、過年度調査で抽出された各課題を含めた更なる検討や精度向上を図るための調査データの集積と解析（データベース等の構築）を行い、関係研究機関等と連携を図りつつ、将来的に統合物理探査手法が堤防の健全性を把握する維持管理手法の一つとして定着するよう、技術開発を行いたい。

10. 今後の計画

今後は、関係研究機関と連携を図りつつ、今回の調査で抽出された課題の解決に向けた更なる検討を行うとともに、調査データの集積（データベース等の構築）を行い、統合物理探査手法による河川堤防の浸透に対する安全性評価手法としての適用性について検討していきたい。また、統合物理探査の専門技術の習得並びに、職員のスキルアップを目的とした、年間1～2回程度の統合物理探査に関する各種講習会及び実地研修についても引き続き実施していきたい。