

V-10 橋梁等の下部構造の健全度評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 13～平 16

担当チーム：基礎チーム

研究担当者：福井 次郎, 石田 雅博,
野々村佳哲

【要旨】

我が国が保有する道路橋はおよそ 14 万橋に達し、近い将来、大規模な更新の時期を迎えることが想定される。これらを限られた予算の中でいかに合理的に維持管理していくかが大きな課題となっており、下部構造では洗掘に対する健全度評価の開発が不可欠となっている。

本研究では、地盤の非線形領域まで考慮した解析手法により、洗掘を受けた基礎の耐力低下を算定した。また、洗掘深さの推定式を検討した。これらの結果を被災事例に対して適用したが、被災状況が明確にはわからず、十分な検証に至らなかった。したがって、洗掘による橋梁の被災事例を基に、被災に与える河川や橋梁の要因を分析した。この結果を基に、健全度評価手法を提案した。この手法により、洗掘により被害を受ける橋梁を従来よりも明確に抽出できるようになった。

キーワード：基礎、洗掘、健全度、損傷、点検

1. はじめに

洗掘による重大な被災を受けた橋梁基礎は多数存在し、下部構造の合理的な維持管理を行う上で洗掘に対する安定性を精度良く評価する手法の開発が不可欠となっている。

洗掘に対する安定性評価手法として、平成 8 年度道路防災総点検（以下「防災点検」と呼ぶ）の調査手法¹⁾があるが、その精度は十分検証されておらず、改良の余地が残されている。

そこで、洗掘による基礎の耐力の低下について、直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎別に算出し、洗掘深さと基礎の耐力の低下度合いとの関係を検討した。

また、既往の洗掘推定式について防災点検の実測値との比較を行い、推定精度の検討を行った。

さらに、過去の洗掘による橋梁の被災事例と調査項目との相関分析を行い、洗掘に影響を及ぼす要因の検討を行った。この結果を基に、健全度評価手法を提案した。

2. 洗掘を受けた基礎の耐力算定モデル

洗掘を受けた基礎は耐力が低下し、傾斜や転倒を生じる。ここでは、洪水時の橋脚基礎を念頭にモデル化し、洗掘による耐力低下の影響を試算した。

2.1 モデルの概要

解析モデルは、地盤挙動の非線形性および基礎の材料非線形性を考慮することとし、平成14年道路橋示方

書IV下部構造編に示される地震時保有水平耐力法の手法を基本とした。ただし、次のような取り扱いを行った。

- ① 地盤バネは常時の値を用いる。
- ② 直接基礎は根入れの浅いケーソン基礎として取り扱い、基礎前面抵抗も考慮して計算する。
- ③ 洗掘深さの影響は、洗掘されている深さまでの地盤のバネ値をゼロとすることで考慮する。
- ④ 洪水時を想定し、河底より0.6Hの位置に流水圧による水平力が作用するものとして整理する。ここで、HはHWL 時の水深とし、河川構造令を参考に橋脚天端より1m 低い位置とした。

2.2 被災橋梁における検討

被災を受けた橋梁の内、被災時の洗掘深さがある程度推測できる 18 橋について、上記のモデルにより転倒を起こす洗掘深さを試算した。実際の洗掘深さと比較したものを図-2 に示す。

13 橋は実際の洗掘深さが計算上転倒を起こす洗掘深さよりも上回っており、上記のモデルで被災を説明できる。一方、5 橋については、実際の洗掘深さが計算上転倒を起こす洗掘深さを下回っている。これは、流木の影響など計算上考慮していない要因によるものと考えられる。なお、この 18 橋についても実際の被災時の状況は明確ではなく、洗掘深さも被災後の調査から推測したものであるため、詳細な検討は困難である。

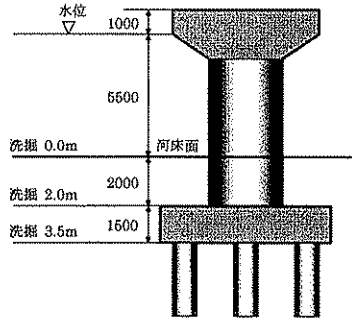


図-1 解析における基礎の設置位置

表-1 試算ケース

Case	基礎形式	基礎形状	基礎長さ	躯体形状
Case-1	直接基礎	7.0m×7.5m	1.5m	小判
Case-2		5.5m×6.0m		
Case-3		6.5m×10.0m		壁式
Case-4		5.0m×10.0m		
Case-5	ケーソン基礎	小判型	10m	小判
Case-6		5.0m×5.5m	15m	
Case-7		小判型	10m	壁式
Case-8		5.0m×12.0m	15m	
Case-9	杭基礎	場所打ち杭	15m	小判
Case-10		φ=1.0m	20m	
Case-11		鋼管杭	15m	
Case-12		φ=1.0m	20m	

2.3 モデル解析

前述のモデルを基に、各基礎形式について試算を行った。解析ケースは、表-1 に示す直接基礎 4 ケース、ケーソン基礎 4 ケース、杭基礎 4 ケースの計 12 ケースとした。基礎の設置位置は、図-1 に示すように洗掘深さ 2m でフーチング上面が露出し、洗掘深さ 3.5m でフーチング下面が露出するものとした。

2.3 解析結果の考察

基礎の耐力の低下は、基礎の降伏耐力により整理することとし、次のように定義した。

- a) 直接基礎およびケーソン基礎
 - ・基礎本体が塑性化する
 - ・基礎前面地盤の60%が塑性化する
 - ・基礎底面の60%が浮き上がる
- b) 杭基礎
 - ・全ての杭で杭体が塑性化する
 - ・一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達する。

洗掘による耐力の低下を基礎形式別に図-4 に示す。ここでは、健全時（洗掘深さ 0）との耐力の比を用いて整理した。この結果から、次のことがわかった。

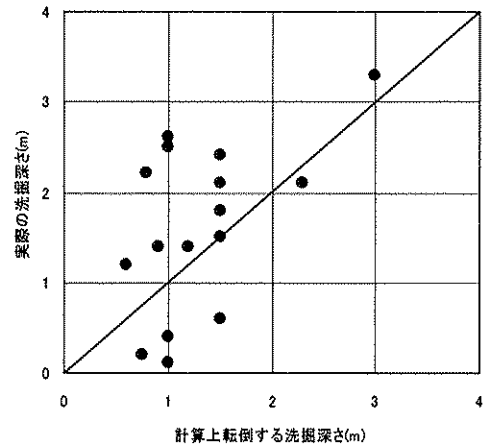


図-2 耐力算定モデルと実際の洗掘深さの比較

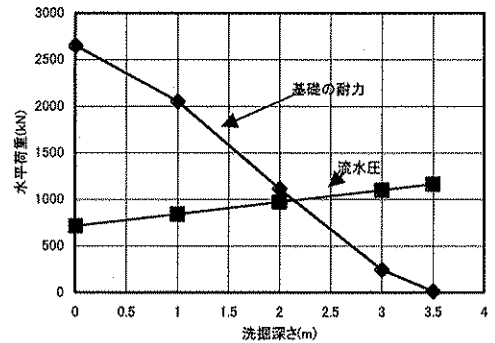


図-3 直接基礎の耐力低下の例

(1) 直接基礎

直接基礎は、洗掘の進行による耐力の低下が著しく、フーチング天端が露出する状態である洗掘深さ 2m で耐力は健全時の 30~40%程度になる。また、ほぼフーチング全体が露出する状態である洗掘深さが 3m の場合は、耐力は健全時に対して 10%程度になる。この場合の耐力は、全ケースで流水圧荷重である 711kN を下回っていることから、計算上では基礎は流出していることになる。また、case-1 と case-3 は、洗掘深さ 2m で耐力が流水圧荷重を下回る。

(2) ケーソン基礎

ケーソン基礎は、杭基礎に比べて、耐力の低下は洗掘により比較的急速に進行する。これは、ケーソン基礎の支持機構が側面の地盤抵抗に大きく依存しているからであると思われる。頂版が露出する状態である洗掘深さ 3.5m の場合は、耐力は健全時に対して半分程度に低下する。

(3) 杭基礎

杭基礎は、他基礎と比較して洗掘による耐力の低下は穏やかであるが、杭の材質により耐力低下の度合いに大きな違いが見られる。鋼管杭であるcase-11 や case-12 は、洗掘深さが7.5m となっても耐力は健全時の60% 程度を確保している。一方、場所打ち杭は、洗掘深さが7.5m となると耐力は健全時の35% 程度に低下する。

これは、鋼管杭基礎は全杭が降伏するまでに余裕があり押し込み支持力で耐力が決まっているが、場所打ち杭基礎は全杭が降伏することで耐力が決まるためである。

表-2 配点案 (構造)

洗掘程度		基礎形式		
		直接基礎	ケーソン基礎	杭基礎
洗掘程度	洗掘なし	20 30	15 20	15 0
	わずかな洗掘	50 35	40 30	40 10
	上面露出	90 75	75 65	75 45
	下面露出	100 100	90 90	90 75

左：防災点検調査票、 右：今回の配点案

平成8年の道路防災総点検では、ケーソン基礎と杭

表-3 被災ランクの分類

被災ランク	アンケート調査の被災状況
ランク I	①流失
ランク II	②転倒
ランク III	③傾斜、④沈下、⑤移動
ランク IV	⑥破損、⑦その他
無被災	無被災

基礎は同じ配点となっていたが、試算の結果ではケーソン基礎は杭基礎に比べて耐力の低下度合いが大きい。

これらの結果を基に、基礎の耐力比を目的変数とし、基礎形式と洗掘程度を説明変数とした数量化分析を行い、洗掘を受けた基礎の健全度評価表を表-2のように提案した。

3. 洗掘被災の要因分析

洗掘による被災を受けた橋梁 195 橋およびその隣り合う上・下流側の被災を受けなかった橋梁 390 橋を対象に、洗掘に影響を及ぼす要因の検討を実施した。表-3 に示すように5つの被災ランクに分類し、調査項目と被災ランクの関係を整理した。ただし、橋について複数の被災状況が報告されている場合は、より高い被災ランクを採用することとした。

3.1 橋脚における洗掘被災の要因

図-5~図-10 に、関連性が高いと思われる調査項目と被災ランクとの関係を示す。図中の縦軸の「比率」とは、各被災ランクの構成比と全体の構成比の比率であり、1 を超えると全体の平均よりも多いことを示す。各要因の特徴は以下の通りである。

- ・河床勾配：被災ランクが高くなると、1/250 以上の比率が1 を超え、急流河川の被災が増加する傾向にある。
- ・架設年代：被災ランクが高くなると古い橋梁が増加する。特に、被災ランク I (流失) については、昭和 20 年以前の古い橋梁が、全体の平均の3 倍にも達する。
- ・最小径間長：20m 以下の小規模橋梁で被災ランクが高くなる。
- ・河積阻害率：被災ランクが高くなると、阻害率7%以上の橋梁が増加する。特に、ランク I は7%以上が3 倍となる。
- ・橋脚の構造：パイルベントやラーメン橋脚などの流下物がひっかかりやすい形状の橋脚とそれらに該当しないものとに分類している。被災ランク I となるものはパイルベント・ラーメン等が多い。
- ・幅員：幅員の狭いものが被災ランクが高くなる傾向にある。

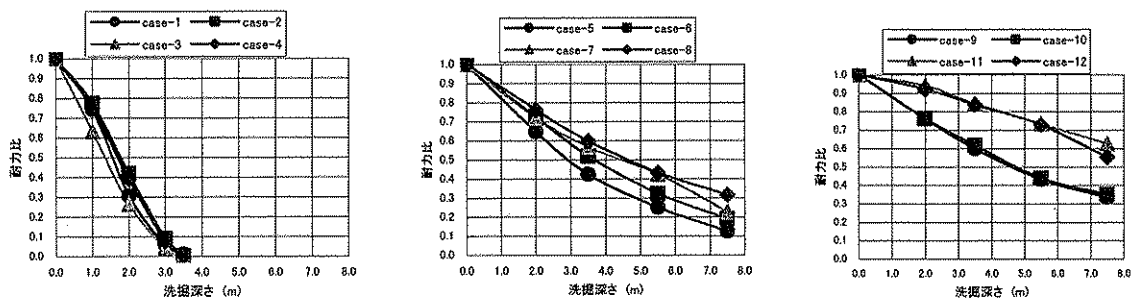


図-4 洗掘深さと耐力比の関係

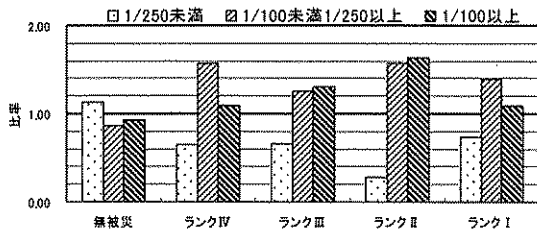


図-5 河床勾配と被災ランクの関係

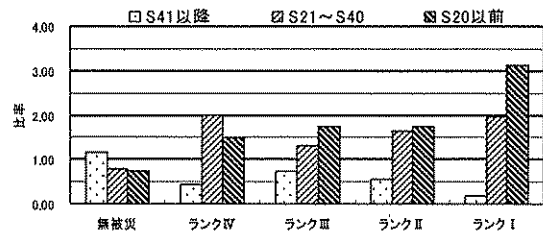


図-6 架設年代と被災ランク

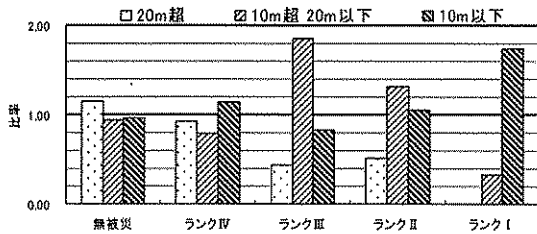


図-7 最小径間長と被災ランクの関係

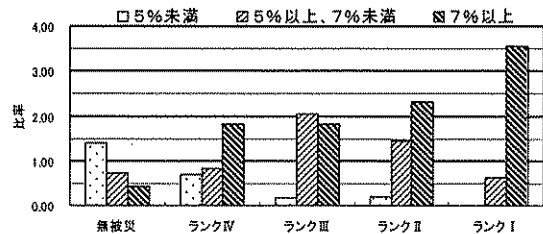


図-8 河積阻害率と被災ランクの関係

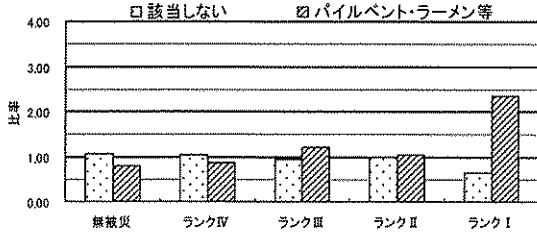


図-9 橋脚の構造と被災ランクの関係

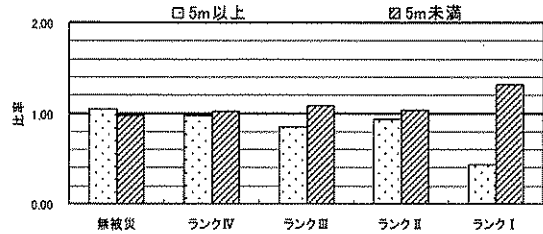


図-10 幅員と被災ランクの関係

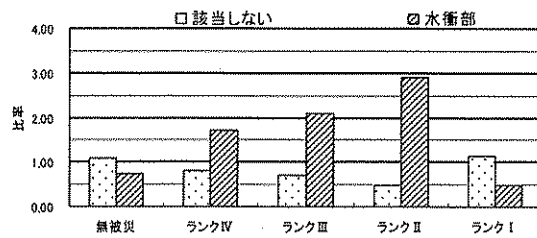


図-11 架橋位置と被災ランクの関係

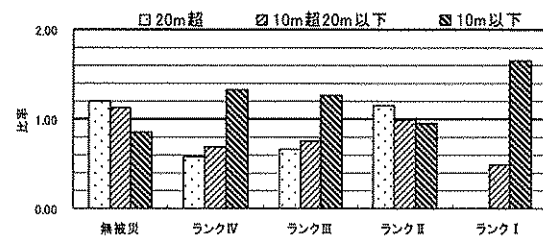


図-12 最小径間長と被災ランクの関係

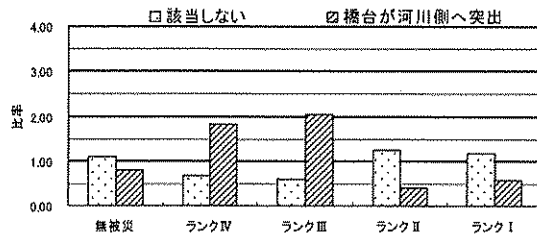


図-13 橋台位置と被災ランクの関係

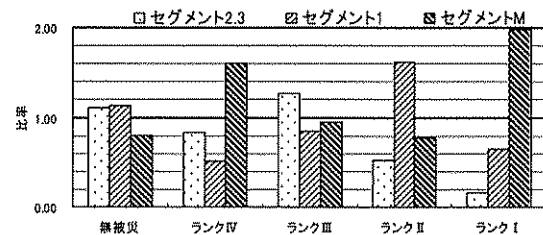


図-14 セグメントと被災ランクの関係

3.2 橋台における洗掘被災の要因

橋台においても、橋脚と同様に被災要因と5つの被災ランクとの関係を調べた。結果を図-11~図-14に示す。

- ・ 架橋位置：水衝部とそれに該当しないものに分類した。被災ランクIを除けば、水衝部に位置することにより被災ランクが高くなる傾向が見ら

れる。

- ・ 最小径間長：橋脚と同様、小規模橋梁ほど被災ランクが高くなる傾向にある。
- ・ 橋台位置：ランクIV、ランクIIIで橋台が河川側へ突出しているものが多い。
- ・ セグメント：セグメントとは、河道の区分に用いられる地質学的区分である²⁾。セグメントに

表-5 被災と調査項目との相関分析結果 (橋脚)

項目		カテゴリー	レンジ	偏相関係数
既往	河床勾配	1/100 以上, 1/100 未満 1/250 以上, 1/250 未満	0.1089	0.1722
	架設年代	S20 以前, S21~S40, S41 以降	0.6724	0.5777
	最小径間長	10m 以下, 10m 超 20m 以下, 20m 超	0.2343	0.1716
	河積阻害率	7%以上, 5%以上 7%未満, 5%未満	0.3015	0.1422
	橋脚の構造	パイルベント, ラーメン構造, その他	0.2997	0.1492
新規	幅員	5m 未満, 5m 以上	0.2061	0.2405
	水深 (HW 時)	3m 未満, 3m 以上	0.3532	0.2388

表-6 被災と調査項目との相関分析結果 (橋台)

項目		カテゴリー	レンジ	偏相関係数
既往	橋梁位置	深掘・水衝部, その他	0.1603	0.1777
	架設年代	S20 以前, S21~S40, S41 以降	0.2149	0.1248
	最小径間長	10m 以下, 10m 超 20m 以下, 20m 超	0.4650	0.2821
	橋台設置位置	橋台が河川内に突出している, 該当しない	0.0874	0.1379
新規	水深 (平常時)	1m 未満, 1m 以上	0.1672	0.0475
	架橋位置地形	セグメント M, セグメント I~3	0.5701	0.1538

関しては傾向がやや読みとりにくいが、被災の有無という観点で見ると被災したものはセグメント M (山岳部) が多い。

3.3 要因分析の考察

過去の洗掘による橋梁の被災事例と調査項目との相関分析を行い、洗掘に及ぼす要因の検討を行った。その結果、橋脚では架設年代等が、橋台では架橋地点の地形や最小径間長等が洗掘被災に及ぼす影響が大きいことがわかった。

4. 健全度評価手法の提案

4.1 被災要因と被災ランクの相関分析

3. で分析した被災との相関が高いと判断される調査項目を説明変数とし、被災ランクを目的変数として数量化理論 (第 II 類) による相関分析を行い、配点の検討を行った。

(1) 橋脚の相関分析

表-5 に橋脚に関する被災要因の各項目のレンジと偏相関係数を示す。ここで、レンジとは、相関分析により得られる各項目のスコア (洗掘被災に与える影響度合いを表し、説明変数に乗じる重み係数) の幅である。

表中の新規欄は、過去の防災点検の調査表には無く、今回新たに追加した調査項目である。また、水深 (HW 時) とは、計画高水位の時の水深である。

レンジや偏相関係数の大きさは、被災との相関性の高さを示しており、橋脚の場合、架設年代が被災との相関が高い。

これらの項目を対象とした時の相関比は0.70であ

表-7 配点案 (要因)

項目	カテゴリー	防災点検調査表	橋脚配点	橋台配点	
既往	河床勾配	1/100 以上	15	5	—
		1/100 未満 1/250 以上	10	0	—
		1/250 未満	0	0	—
	橋梁位置	深掘・水衝部	20	—	10
		その他	0	—	0
	架設年代	S20 以前	10	40	15
		S21~S40	5	30	0
		S41 以降	0	0	0
	最小径間長	10m 以下	15	15	30
		10m 超 20m 以下	10	5	0
		20m 超	0	0	0
	河積阻害率	7%以上	15	20	—
		5%以上 7%未満	5	5	—
		5%未満	0	0	—
	橋脚の構造	パイルベントである	15	15	—
隔壁のないラーメン構造		10	15	—	
該当しない		0	0	—	
橋台の設置位置	橋台が河川内に突出	15	—	5	
	架橋位置の川幅が狭い	10	—	5	
	該当しない	0	—	0	
新規	幅員	5m 未満	—	10	—
		5m 以上	—	0	—
	水深 (HW 時)	3m 以上	—	20	—
		3m 未満	—	0	—
	水深 (平常時)	1m 以上	—	—	10
		1m 未満	—	—	0
架橋地点の地形	セグメント M	—	—	40	
	セグメント I	—	—	0	
	セグメント 2, 3	—	—	20	

り、橋脚と橋台を分離せずに被災の有無を目的変数として相関分析を行った時の相関比 (数ケース実施し、0.27~0.46) に比べかなり改善されている。

(2) 橋台の相関分析

表-6 に橋台に関する被災要因の各項目のレンジと偏相関係数を示す。橋台については、最小径間長、架橋位置地形が表中の項目において相関が強い結果となっている。

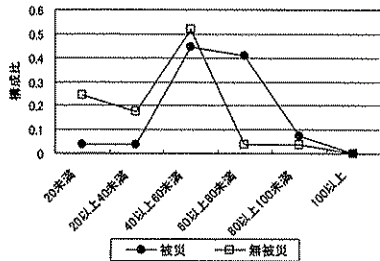


図-15 既往の調査表による配点結果 (橋脚)

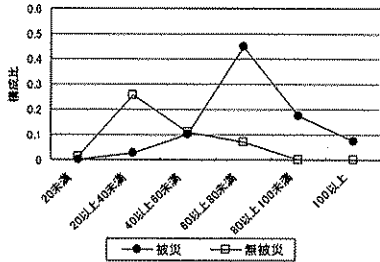


図-17 配点案による配点結果 (橋脚)

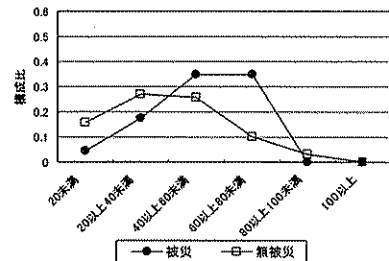


図-16 既往の調査表による配点結果 (橋台)

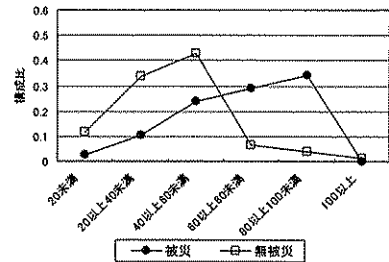


図-18 配点案による配点結果 (橋台)

橋台の場合、相関比は0.38であり、橋脚に比べて低い値となっている。

4.2 健全度評価表の提案および検証

4.1 において実施した相関分析から得られたスコアに基づき橋脚、橋台それぞれについて作成した配点を表-7に示す。なお、表中の防災点検調査表の配点は、今回の検討で抽出された項目のみを示している。

既往の防災点検の調査表と上記の配点案について、洗掘による被災橋梁とその上下流の無被災橋梁を対象として採点し、被災の有無と得点の関係を調べた。結果を図-15～図-18に示す。

橋脚については、図-17では被災橋梁と無被災橋梁の構成比のピークが明確に分かれ、既往の配点(図-15)から改善されていることが分かる。

橋台については、図-18において、被災橋梁のうち配点の低いところの構成比がまだ少し高いものの、既往の配点に比べて構成比のピークは明確に分かれており、これも改善されたものと判断される。

5. まとめ

本研究では、地盤の非線形領域までを考慮した解析手法により、洗掘を受けた基礎の耐力の算定を行った。被災事例について検証を行ったが、被災状況が明確ではなく、十分な検証には至らなかった。そこで、直接基礎、ケーソン基礎、杭基礎について、洗掘深さと基礎の耐力の低下度合いとの関係を検証した。その結果、同じ深い基礎であってもケーソン基礎の方が杭基礎よりも耐力の低下度合いが大きい

ことがわかり、健全度評価表において両者を区分することとした。

また、過去の洗掘による橋梁の被災事例と調査項目との相関分析を行い、洗掘に及ぼす要因の検討を行った。その結果、橋脚では架設年代等が、橋台では架橋地点の地形や最小径間長等が洗掘被災に及ぼす影響が大きいことがわかった。

この結果を基に、健全度評価手法を提案した。防災点検の際の健全度評価表に調査項目を追加するとともに、配点を見直した。この配点案による被災橋梁との相関性を検証した結果、従来よりも明確に洗掘による被災を受けやすい橋梁を抽出できた。

参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：平成8年度道路防災総点検要領〔豪雨・豪雪等〕
- 2) 建設省土木研究所：治水上から見た橋脚問題に関する検討，土木研究所資料第3225号，1993.11
- 3) 石田雅博、野々村佳哲、福井次郎、大塚雅裕：「洗掘による道路橋基礎の被害実態とその対策」、土木技術資料 Vol.45, No.8, 2003.8
- 4) J.FUKUI, M.NISHITANI: "Survey of Bridge Damages Due to a Heavy Rain in Northern Part of Kanto Region, Japan", 1st Int. Conf. on Scour of Foundations, Nov. 2002
- 5) J.FUKUI, M.OTSUKA: "Development of the New Inspection Method on Scour Condition Around Existing Bridge Foundations", 1st Int. Conf. on Scour of Foundations, Nov. 2002
- 6) M. Ishida, J.Fukui: "INSPECTION METHOD ON SCOUR CONDITION AROUND EXISTING BRIDGE PIERS", 15th International Road Federation (IRF) World Meeting, June 2005