

河川増水時における橋台の洗堀が構造安定性に及ぼす基礎的検討

Basic investigation of the effect of scour to structural stability of abutments in river flooding

北見工業大学	○学生員	鎌田啓市(Keiichi Kamata)
北見工業大学		高橋大樹(Hiroki Takahashi)
北見工業大学	正 員	宮森保紀(Yasunori Miyamori)
北見工業大学	正 員	渡邊康玄(Yasuharu Watanabe)
北見工業大学	正 員	川口貴之(Takayuki Kawaguchi)
北見工業大学	正 員	川尻峻三(Shunzo Kawajiri)
北見工業大学	正 員	三上修一(Shuichi Mikami)

1. まえがき

2016年8月17日から8月23日にかけて、台風7号、台風9号、台風11号が北海道に上陸し、同年8月30日には、台風10号が北海道に接近した。これら4つの台風がもたらした豪雨により、多くの橋梁が被災した。

著者らにより、2016年北海道豪雨災害で被災した橋梁は114橋あり、内訳は落橋が26橋、橋台背面土流出や小規模洗堀など橋台での被害が50橋、橋脚洗堀が4橋、橋脚傾斜が2橋、無補剛吊橋の主塔流出が1橋、流木堆積が8橋、被害不明が23橋であった。これらのうち、橋台下面が洗堀を受けて傾斜、転倒したものは9橋あった。これらは、出水時に橋台が水衝部となったことにより橋台フーチング下面が洗堀を受け、直接基礎の橋台が転倒、傾斜する被害または杭基礎の橋台の基礎杭の露出など構造安定性が失われたものと考えられる。一方で、橋台下面が洗堀を受けながらも傾斜に至らなかった事例も散見された。

そこで本研究では、直接基礎の橋台を対象に、洗堀の方向や程度が構造安定性に与える影響を解明することを目的とする。本報では基礎的検討として、有限要素法を用いて橋台をモデル化し、フーチング底面の地盤バネを削除することによる橋台の変位を求めた。

2. 2016年北海道豪雨災害における橋台の被災例

橋台下部が洗堀を受けた事例として、図-1に芽室町の芽室橋を示す。芽室橋の基礎形式は杭基礎であり、洗堀により基礎杭が露出している。図-1では、杭が露出していない部分も確認でき、洗堀は橋軸直角方向に進行したと考えられる。直接基礎で支持されていたと想定すると橋台の転倒および傾斜の被害が起りえた事例といえる。

図-2は、遠軽町の湯の沢橋である。湯の沢橋の橋台形式は、橋脚に翼壁を取り付けたいわゆるピアアバット形式であり、橋台が河道内に突き出ているため橋台が水衝部となりフーチング下面が洗堀を受け上流側へ傾斜したと考えられる。同様の被害が直接基礎を採用している逆T式橋台でも見られたが、直接基礎の場合は、現地調査において洗堀過程が確認できなかった。

また、著者らは出水時の橋台周辺の被災状況の再現を目的とし、水路実験を行っている。現時点では、ピアアバット橋台・逆T式橋台のどちらの場合も河道側のフーチングの端部で洗堀が発生することが分かっており、対策工の有無などによって洗堀の方向が変わることが分かった。水路実験の様子を図-3に示す。



図-1 芽室橋の被災状況(上流より撮影)



図-2 湯の沢橋の被災状況(左岸から撮影)

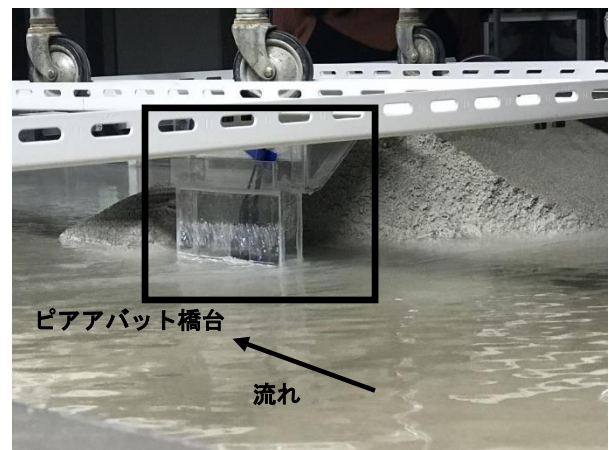


図-3 水路実験の様子(ピアアバット橋台)

3. 解析条件

3.1 解析対象橋梁

本研究での解析対象橋梁は、橋台にピアバット橋台および逆 T 式橋台を採用している実橋を参考にモデル化し、それぞれ A 橋、B 橋とする。解析対象橋梁の諸元を表-1 に、橋台の形状を図-4、図-5 に示す。基礎は直接基礎とする。

3.2 解析モデルと解析ケース

本研究では、橋台フーチング下面が洗堀を受けた場合の橋台および橋桁の自重による橋台の変位を求めるため、有限要素法を用いた静的解析を行った。解析ソフトは、有限要素法解析プログラムである midas Civil を用いた。

モデル化は側径間の橋台と主桁の支間 1/2 を対象とした。モデル化に際しては、橋台そのものは変形せずに地盤バネの支持を失うことで傾斜や沈下する状況を想定して、鉄筋を考慮しないソリッド要素を用いて、コンクリートの材料物性を与えた。コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ とした。

主桁についても、今回は主桁の応力や変形を評価するものではないので、上フランジ幅と桁高に応じた矩形断面からなるソリッド要素としてモデル化した。ヤング係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ としたが、単位体積重量は、床版や舗装も含めた上部構造全体の重量に合わせるように調整した。

支承部の支持条件は固定支点を想定し、支承部に相当する主桁側と橋台側の各 4 節点について、橋軸方向と橋軸直角方向を拘束した。桁の支間中央側の端部についても、橋軸および橋軸直角方向を固定した。橋台のフーチング下面の各節点には地盤バネを設置した。地盤バネのバネ定数については 3.3 節で説明する。

解析ケースは①橋軸方向(y 軸方向)、②橋軸直角方向(x 軸方向)、③斜め方向の 3 方向から設置した地盤バネを段階的に削除し、それによる橋台の変位量を計算した。荷重は橋台および主桁の自重である。上記の条件をもとに作成した解析モデルの全景を図-6、図-7 に示す。なお、本研究では橋台背面土流出後を想定し、土圧は考慮しない。

3.3 地盤条件と地盤バネ

フーチング下面の地盤は、砂質地盤の場合一般的に良質な支持層とみなされる N 値 30 とする³⁾。地盤バネを算出するために用いる地盤反力係数は、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編³⁾に準じて求める。以下の計算で地盤の変形係数は $E_0=2800\text{N}$ 、換算係数は $\alpha=1$ とした。

まず、基礎地盤の鉛直方向の地盤反力係数を求めると表-2 のようになる。また、水平方向の地盤反力係数は表-3 となる。

これらの鉛直方向地盤反力係数、水平方向地盤反力係数から、モデル化した橋台フーチング下面の各節点の鉛直方向地盤バネ k_v' および水平方向地盤バネ k_h' を求める。A 橋の橋台フーチング下面は 350 節点ある。そのため、各節点に設ける鉛直地盤バネ k_v' および水平方向地盤バネ k_h' は以下のようにする。

$$k_v' = k_v \times \text{モデル幅} \times \text{奥行幅} \div \text{節点数} \quad (1)$$

表-1 解析対象橋梁

	A 橋	B 橋
上部構造形式	3 径間単純鋼桁橋	2 径間単純鋼桁橋
橋長	87.2m(3@28.5m)	47.3m(2@23.65m)
主桁本数	4(3@3m)	3(2@3.6m)
橋台形式	ピアバット	逆 T 式
基礎形式	直接基礎	直接基礎

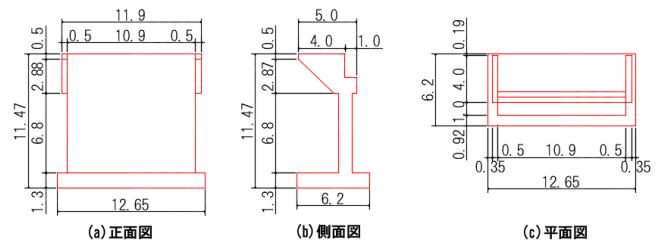


図-4 A 橋橋台(単位:m)

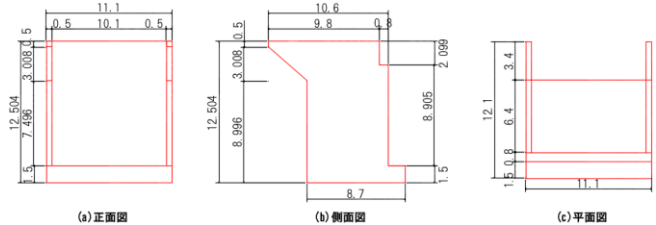


図-5 B 橋橋台(単位:m)

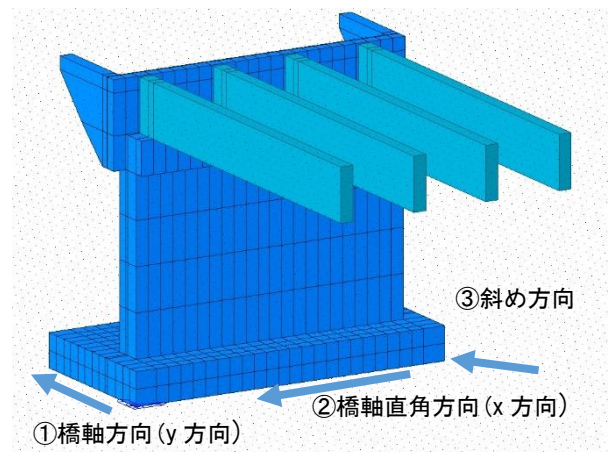


図-6 A 橋解析モデル全景

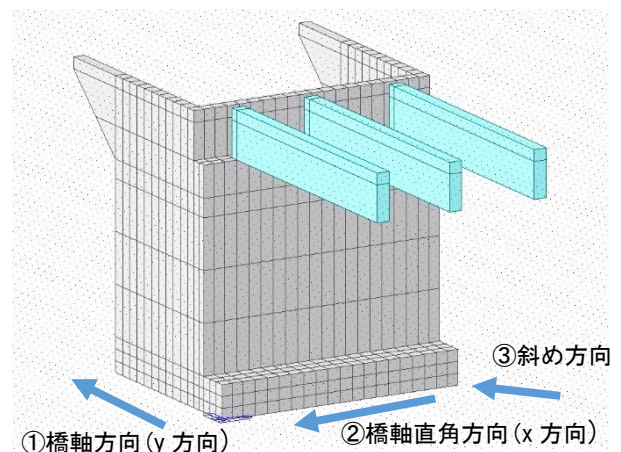


図-7 B 橋解析モデル全景

$$= 5.19 \times 10^4 \times 6.2 \times 12.65 \div 350 = 1.16 \times 10^4 \text{ kN/m}$$

$$k_h' = k_h \times \text{モデル幅} \times \text{奥行幅} \div \text{節点数} \quad (2)$$

$$= 2.21 \times 10^4 \times 6.2 \times 12.65 \div 350 = 4.95 \times 10^3 \text{ kN/m}$$

B橋の橋台フーチング下面是357節点ある。そのため、各節点に設ける鉛直方向地盤バネ k_v' および水平方向地盤バネ k_h' は式(1),(2)と同様に、

$$k_v' = 4.33 \times 10^4 \times 8.7 \times 11.1 \div 357 = 1.17 \times 10^4 \text{ kN/m} \quad (3)$$

$$k_h' = 2.04 \times 10^4 \times 8.7 \times 11.1 \div 357 = 5.53 \times 10^3 \text{ kN/m} \quad (4)$$

となる。A橋およびB橋の地盤バネを表-4にまとめた。

4 解析結果と考察

4.1 ピアアバット橋台の解析結果と考察

A橋の解析結果を図-8に示す。

図-8は洗掘割合(%)と鉛直方向最大変位(m)の関係を示しており、洗掘割合はフーチング下面の面積に対して地盤バネを削除した部分の面積の割合である。また、各節点の鉛直方向変位の最大値を鉛直方向最大変位とした。

図-8より①橋軸方向、②橋軸直角方向、③斜め方向の3方向において洗掘が進行すると鉛直方向最大変位が徐々に増加していることがわかる。洗掘割合が約80%までは3方向すべての鉛直方向最大変位が同じような値になった。また、増加の割合は3方向すべてで非線形的に増加している。

洗掘割合が80%を超えると、急激に鉛直方向最大変位が増加している。とくに斜め方向はその傾向が顕著である。

最終的な鉛直方向変位は大きい順から③斜め方向、②橋軸直角方向、①橋軸方向の順となった。これは斜め方向に洗掘が進行した場合、上部工の自重と翼壁の自重の2つが作用するためと考えられる。同様に橋軸直角方向に洗掘が進行した場合も上部工の自重と翼壁の自重の両方が作用するが、翼壁の自重は上流側のみが作用し、下流側の翼壁の自重は作用しないため、斜め方向に比べ鉛直方向変位量が少なかったと思われる。橋軸方向の洗掘が進行すると、上部工の自重が他の2方向より多く作用するため鉛直方向最大変位が他に比べ大きくなると考えたが、支承部の支持条件は固定支点を想定し、橋軸方向と橋軸直角方向を拘束したため、変位が大きくならなかったと考えられる。図-9に橋台の変形図の一例を示す。

表-2 鉛直方向地盤反力係数

	A 橋	B 橋
N 値	30	30
$E_0(\text{kN/m}^2)$	8.40×10^4	8.40×10^4
$B_v(\text{m})$	2.95	3.61
$k_{v0}(\text{kN/m}^3)$	2.80×10^5	2.80×10^5
$k_v(\text{kN/m}^3)$	5.19×10^4	4.33×10^4

表-3 水平方向地盤反力係数

	A 橋	B 橋
N 値	30	30
$E_0(\text{kN/m}^2)$	8.40×10^4	8.40×10^4
$B_h(\text{m})$	8.86	9.83
$k_{h0}(\text{kN/m}^3)$	2.80×10^5	2.80×10^5
$k_h(\text{kN/m}^3)$	2.21×10^4	2.04×10^4

表-4 地盤バネの設定

	A 橋	B 橋
鉛直方向 $k_v'(\text{kN/m}^3)$	1.16×10^4	1.17×10^4
水平方向 $k_h'(\text{kN/m}^3)$	4.95×10^3	5.53×10^3

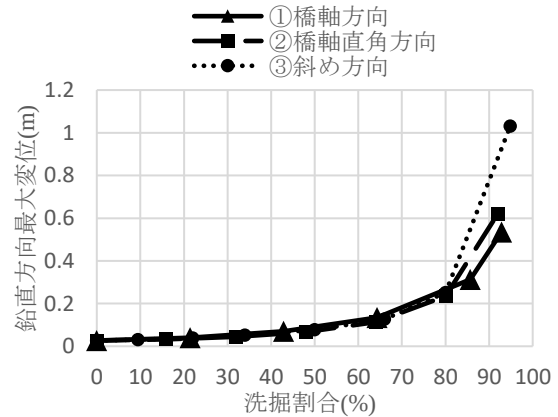


図-8 A橋解析結果

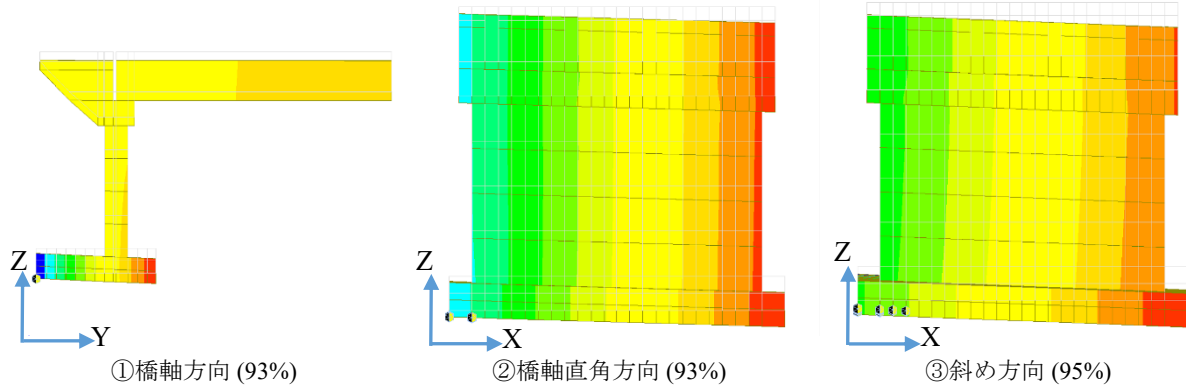


図-9 A橋橋台変形図

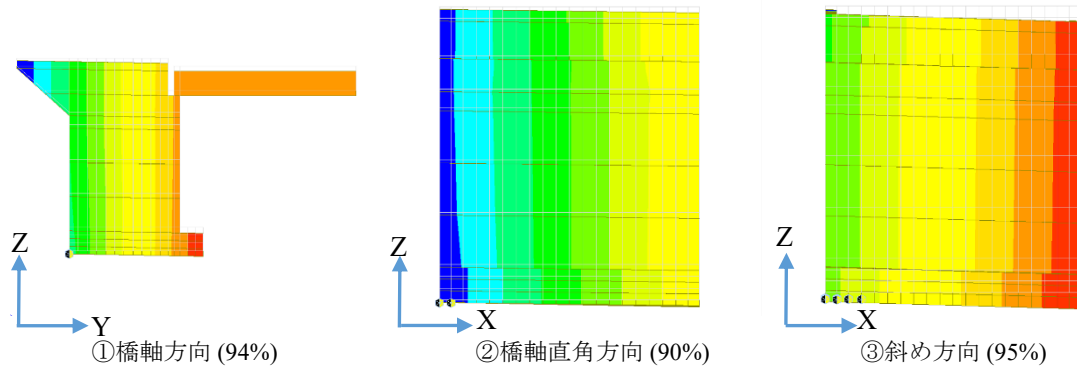


図-11 B橋橋台変形図

4.2 逆 T 式橋台の解析結果と考察

B 橋の解析結果を図-10 に示す。

図-10 においても、3 方向ともに洗堀が進行すると鉛直方向変位が増加していることがわかる。B 橋では、洗堀割合が約 60%を超えると、鉛直方向最大変位に方向の差が生じ始める。洗堀割合が 60%を超えても、橋軸直角方向および斜め方向の鉛直方向最大変位は同じような値を示すが、橋軸方向は他の 2 方向に比べ鉛直方向変位は小さい値となっている。

最終的な鉛直方向最大変位は大きい順から③斜め方向、②橋軸直角方向、①橋軸方向の順となった。これらは、A 橋と同様に翼壁の自重や支持条件の影響によるものだと考えられる。図-11 に橋台の変形図の一例を示す。

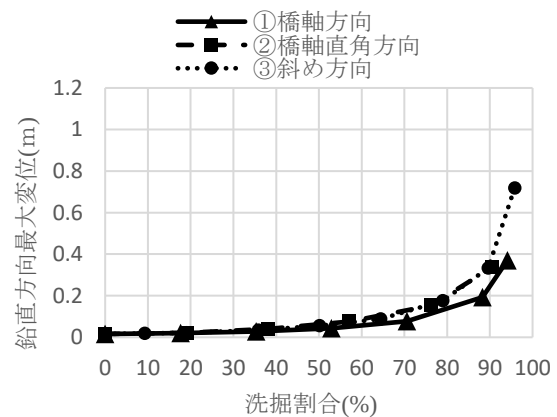


図-10 B橋解析結果

4.3 橋台形式の違いによる比較

A 橋、B 橋ともに解析を行った 3 方向において洗堀が進行すると鉛直方向最大変位が増加していた。

A 橋、B 橋ともに最終的な鉛直方向最大変位は大きい順から③斜め方向、②橋軸直角方向、①橋軸方向の順となったが、最大変位はすべて A 橋が上回っている。A 橋は洗堀割合が約 80%で急激に鉛直方向変位が増加しているが、B 橋は A 橋と比べると緩やかに上昇している。これらの結果は、フーチングの形状が A 橋が B 橋に比べ橋軸方向に奥行きがない細長い形状をしており、より安定性を失いやすかったためだと考えられる。このことから、本解析からは、フーチングの底面の形状が安定性に影響することを示唆する結果となった。

A 橋と B 橋では翼壁の形状も異なるが、今回の解析では、その影響はほとんどない結果となった。しかしながら、被災橋梁の調査結果や水理実験では、翼壁の形状は背面土の流出に大きく影響するため別途検討が必要である。

5 おわりに

本研究では、橋台形式や洗堀方向が構造安定性を与える影響について、実橋を参考に FEM でモデル化しフーチング下面が洗堀を受けた場合の橋台の変位を求めることにより検討を行った。橋台形式の違いによっては、フーチングの底面の形状が安定性に影響することを示唆する結果となった。また、洗堀方向においては、

ピアアバット橋台および逆 T 式橋台のどちらも斜め方向から洗堀が進行した際に最も鉛直方向の変位が大きくなったことから、洗堀の進行方向は構造安定性に影響を与えると考えられる。

今回の解析結果の妥当性を検証するためには、より詳細な被災状況調査が必要だが種々の制約から困難が伴う。そのため橋台の洗堀を再現した水理実験の実施を今後は検討する。解析に関しては、フーチングを含む橋台そのものの損傷を考慮した非線形解析を行う必要がある。また、土圧を考慮した解析および地盤バネ定数を変化させた解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 鎌田啓市, 宮森保紀, 渡邊康玄, 川口貴之, 川尻峻三, 三上修一: 2016年北海道豪雨による橋梁の被災状況と被災メカニズムの基礎的検討, 土木学会 第72回年次学術講演会講演概要集, CS6-004, 2017.
- 2) 川尻峻三, 川口貴之, 渡邊康玄, 宮森保紀, 川俣さくら, 御厩敷公平, 金子大輝, 高橋大樹: 橋台背面盛土の地盤工学的な性状把握と水理模型実験による侵食過程の観察, 水工学論文集, 投稿中, 2017.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書(I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, 社団法人 日本道路協会, pp276-280, pp283-287, 2012.