

「道路橋の橋台背面アプローチ部の耐震性評価法の開発」報告書

富山大学学術研究部都市デザイン学系
准教授 河野哲也

1. はじめに

令和6年能登半島地震を始め、過去の地震においては道路橋背面アプローチ部の段差が生じることで交通ネットワークが遮断される例が確認されている(図1)^{1,2)}。地震直後の救急・復旧や恒久的復興を実現するには、各橋梁の橋台背面アプローチ部の現在の耐震性を評価し、所要の性能を有しない場合は補強などの適切な耐震対策を講じる必要がある。



(a) 烏川大橋



(b) 才田大橋

図1 令和6年能登半島地震における橋台背面アプローチ部の損傷事例²⁾

橋台背面アプローチ部は、主構造である盛土体、盛土体を支持する基礎地盤、盛土体の変形を抑制する土留めとして機能する橋台から構成される。したがって、橋台背面アプローチ部の損傷の形態や規模、耐震性は、これら三構造の特性(形状や強度、剛性等)が相互に影響しあって定まる。すなわち、損傷予測・耐震性評価には、橋台背面アプローチ部の各構造の特性を整理した上で、各特性が損傷や耐震性に与える影響の分析が必要である。そこで、これまでもこれらの構造特性に着目した分析が行われてきた。

例えば常田らは、2004年に発生した新潟県中越地震における路面段差データの分析により、震度階が大きくなるほど道路の路面段差が大きくなることを示した³⁾。また、松崎は、解析により、盛土高さが高くなるほど残留沈下量が増加し、応急復旧に要する時間が長くなることを示している⁴⁾。さらに宮田らは、2004年新潟県中越地震及び2006年新潟県中越沖地震の被災事例の分析を行い、原地盤の液状化に起因して生じる橋台背面アプローチ部の沈下量は、路幅中央位置で盛土高の10%程度となることを示した⁵⁾。また、数値解析の結果、原地盤の液状化層厚が厚いほど、液状化強度比が小さいほど、盛土の沈下が大きくなることも示されている⁵⁾。

このように、盛土構造や盛土の基礎地盤の条件に着目した分析や試算は比較的多い一方で、土留めとして機能する橋台の構造に着目した分析は少ない。例えば、橋台の基礎の形状や配置、地盤条件、ウィングの有無や形状、剛性によって背面盛土の壊れ方や規模は異なると考えられるが、それらの相関性を調べた知見は少ない。

そこで筆者は、橋台の構造・地盤条件が橋台背面アプローチ部の損傷に及ぼす影響を明らかにし、相対的に耐震性の低い橋台の条件を特定することを目的として研究を進めている。本事業では、既往の被災事例の分析や基礎的な解析により、特に橋台の構造や地盤の条件の違いによって損傷度がどのように異なるかを確認した。

2. 被災事例の分析による地盤の液状化と橋梁損傷の関係の考察

表1に、令和6年能登半島地震で橋台背面アプローチ部に損傷が生じた橋梁の損傷状況を整理した結果を示す。

表1 令和6年能登半島地震において橋台背面アプローチ部に損傷が見られた橋梁一覧

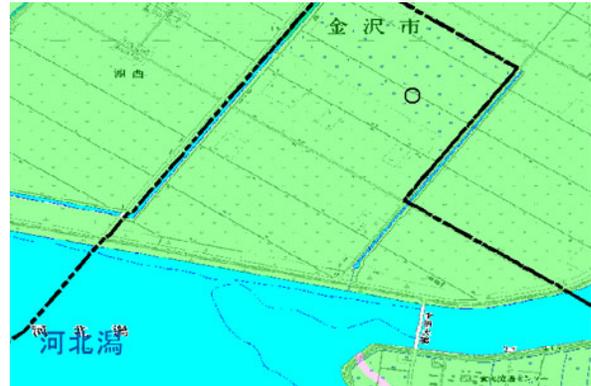
橋梁	損傷状況
A橋	盛土高 10 m 程度、早期の応急復旧可能なレベルでの段差
B橋	段差 1.5 m 程度、液状化層が 5 m ~ 10 m 程度、踏み掛け版は設置されていない
C橋	盛土高 10 m 程度、規制をかけながら通行、液状化層薄い
D橋	盛土高低い、液状化層薄い、早期の応急復旧可能なレベルでの段差
E橋	盛土高低い、液状化層薄い、早期の応急復旧可能なレベルでの段差
F橋	盛土高低い、液状化層薄い、早期の応急復旧可能なレベルでの段差
G橋	段差 10 cm 程度、盛土高低い、液状化層薄い
H橋	段差 50 cm 程度 詳細不明
J橋	盛土高 10 m 程度、早期の応急復旧可能なレベルでの段差
K橋	段差 1.5 m 程度、液状化層が 5 m ~ 10 m 程度、踏み掛け版は設置されていない
L橋	盛土高 10 m 程度、規制をかけながら通行、液状化層薄い
M橋	段差 50 cm 程度 詳細不明
N橋	段差 15 cm 程度 液状化発生

詳細な情報を入手できなかった橋も多いが、多くの橋梁は液状化に伴った損傷が生じている。そこで、本節では特に液状化に着目して分析する。

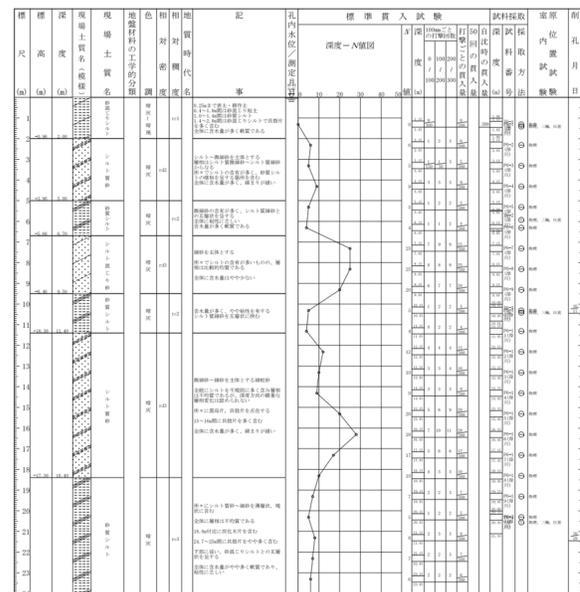
図2は、図1(b)に示した才田大橋近傍の液状化マップとボーリング柱状図である。液状化マップを見ると液状化程度は比較的低い(危険度1)が、ボーリング柱状図を見ると液状化層厚はかなり厚い可能性がある。一方、液状化マップでは赤に区分され、液状化程度が大きいと判断される地盤であっても、ボーリング柱状図から推測される液状化層が薄い場合には、損傷が限定的であった例もある。

このように、橋台背面アプローチ部の損傷は液状化に大きく依存するものの、液状化が発生するかどうか、液状化程度がどの程度かという情報だけでは損傷度を評価するには不十分である。液状化層の厚

さや深度等、深さ方向の情報が加わることで、損傷する可能性が高い橋台の選定精度は格段に向上すると考えられる。



(a) 液状化マップ



(b) 地盤柱状図

図2 才田大橋周辺の地盤条件

3. 液状化層の位置・深度が橋台基礎の状態に与える影響を確認するための解析

上記の整理結果を踏まえて、液状化層の位置や深度の違いが橋台の杭基礎の変位に及ぼす影響を確認するための解析を行った。本文では、そのうちの一部の結果を報告する。

3.1 解析の概要

解析は単杭を対象とし、杭を弾性床上的のはりと仮定して、杭頭に水平方向力・モーメントを作用させ、それによる水平変位や断面力を計算するものである。

表1 解析で用いた地盤条件

地層構成			液状化すると仮定した層の液状化低減係数 DE														
地層	N値	層厚 [m]	Case														
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	5	0.6	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
2	5	0.6	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
3	5	0.6	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
4	5	0.6	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
5	5	0.6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
6	5	0.6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
7	5	0.6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
8	5	0.6	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0
9	5	25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	30	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

杭頭は剛結又はヒンジと仮定し、杭体は線形でモデル化した。なお、今回はあくまで定性的な傾向を確認することを目的としているため、条件は簡単かつ極端なものを設定した。

解析対象とする杭の諸元は、杭径 1200 [mm]、杭長 45m、板厚 19mm である。これらの値は、実橋の鋼管杭基礎の諸元を参考にして定めたものである⁶⁾。なお、剛性はいずれの杭も 205,000 [N/mm²] で一定とした。

解析対象とする地盤は、表1に示すように9層の中間層と支持層から構成されるものとした。各層の層厚は杭径の半分となる 0.6[m] とし、N値は5とした。9層の中間層のうち、上から8層までが液状化する層と仮定し、液状化する層を変化させて基礎の応答を解析する。変化させる液状化パターンを表2に示す。Case 0は基本ケースで液状化する層がないと仮定したケースである。Case 1~8は、中間層のうち、ある一層が液状化すると仮定したケースである。また、Case 9~11は、連続する二層が、Case 13, 14は連続する四層が液状化すると仮定したケースである。

なお、液状化の影響は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計を参考に、水平方向地盤反力係数に液状化の低減係数 $D_E (=0)$ を乗じることで考慮した⁷⁾。また、各ケースに作用させた荷重は同値である。

3.2 解析結果

図3に、解析結果の一例として、Case 1~12の各ケースの解析で得られた杭頭変位の結果（ヒンジ条件）を示す。横軸には液状化すると仮定した層番号を示

表2 解析で考慮した液状化の状況

Case	液状化状況
0	全層液状化無し
1	1層目のみ液状化
2	2層目のみ液状化
3	3層目のみ液状化
4	4層目のみ液状化
5	5層目のみ液状化
6	6層目のみ液状化
7	7層目のみ液状化
8	8層目のみ液状化
9	1層目と2層目のみが液状化
10	3層目と4層目のみが液状化
11	5層目と6層目のみが液状化
12	7層目と8層目のみが液状化
13	1~4層目までが液状化
14	4~8層目のみ液状化

し、縦軸には各ケースの杭頭変位の解析結果を Case 0（液状化する層がないと仮定したケース）の解析で得られた杭頭変位で無次元化した値を示している。ただし、二層が液状化すると仮定した Case 9~12の横軸の値は、液状化する二層の層番号の平均値（例えば、1層目と2層目が液状化すると仮定した Case 9では 1.5）としている。

いずれのケースにおいても、縦軸の値が1を超えていることから、液状化によって杭頭変位が増加したことがわかる。

Case 1~8の結果をみると、液状化による変位

の増加が最も大きかったのは表層が液状化すると仮定した Case1 であり、液状化層が下に移動するに伴って変位の増分は減少している。また、液状化層が下層に行くにしたがって、液状化による変位増分の差異は減少していることがわかる。すなわち、1層目が液状化するのと2層目が液状化するのでは基礎の変位に与える影響は大きく異なるが、7層目が液状化するのと8層目が液状化するのでは基礎に与える影響に大差はない。これらの結果より、液状化する層が表層に近いほど変位が大きくなり、基礎の変位に与える影響が大きい一方で、深い位置で液状化することによる影響は限定的である。

次に、2層ずつ液状化すると仮定した Case 9~12 の結果を見てみると、Case 1~8 と同様に液状化層が上層にあるほど、液状化による変位の増加が大きいことがわかる。また、その変位の増加量は Case 1~8 よりも大きい領域で遷移している。これは、Case 1~8 よりも液状化層厚が大きいことに起因している。ただし、7層目と8層目が液状化すると仮定した Case 12 では、7層目のみが液状化すると仮定した Case 7 や 8 層目のみが液状化すると仮定した Case 8 と同等の変位増分となっている。Case 1~8 の結果で述べたように、下層が液状化することで基礎に与える影響は限定的である傾向が表れている。

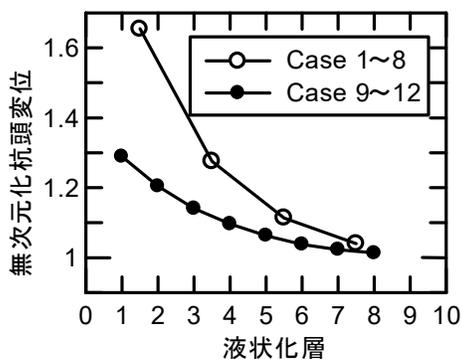


図4 液状化層の位置・深度が基礎の変位に与える影響

4. 既設橋台の耐震性評価に向けた提案

図3や図4で見たように、液状化層の位置や層厚により、構造物の変位は大きく異なる。これは、多層系地盤の場合、層構成を適切に把握することで耐震性を適切に評価できる可能性を示唆している。

例えば現状、既設構造物の存在する地盤の各層の液状化判定や液状化程度を試算する際は、既存の地盤柱状図のN値を用いることが多いと思われる。しかし、N値は1mピッチでしか記録されていない。図4に当てはめれ

ば、既存の柱状図の結果で得られる杭頭変位は、Case 9~12の精度となる。しかし、仮に0.5mピッチで判定することができれば、Case 1~8のように杭頭変位を抑制することができる場合もある。また、現在の地質判定は、熟練技術者が採取されたコアの観察により行われることが多いが、今後、技術者数の減少に伴い、従来よりも判定精度が低下することも考えられる。せめて表層付近の地盤だけでも、地質区分や各層の物性を正確に判断できるようになれば、構造物の耐震性評価の精度も向上し、適切な耐震補強が効率よく実施できるものと考えられる。

地盤特性を精度よく評価するための方法は、いくつか考えられるが、まずは入手した情報を保管・記録しておくことが重要である。室内試験や原位置試験で得られた力学特性や化学特性等、N値以外にも、調査・設計・施工時に入手・活用する物性値は多い。これらを適切なフォーマットで保管・記録すれば、既設基礎の性能評価の精度向上が期待できる。また、高品質ボーリングやボーリングコアのCTスキャンなどの高度な計測技術の活用も期待される⁸⁾。ただし、それでも広範囲に分布する地盤物性の全容を把握することは難しい。限定された情報からある程度、推定することが求められるが、推定誤差の明確化や縮小についても近年のデータサイエンスにより発展が目覚ましい^{例えば9)}。今後、これらの技術も活用し、既設道路橋の耐震性評価の合理化に尽力したい。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所: 令和6年能登半島地震土木施設被害調査等報告書, 国総研資料第1320号, 土研資料4459号, 2025.
- 2) 片岡正次郎: 能登半島地震の道路橋被害と今後の課題・対策, 第17回CAESAR講演会, 2024.
- 3) 常田賢一, 小田和広, 中平明憲, 林健二, 依藤光代: 段差走行実験に基づく地震時の道路の性能評価および交通運用, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 596-604, 2007.
- 4) 松崎裕: 復旧期間を考慮した橋梁と盛土の地震時安全性の整合化に関する研究, 第15回JICE研究開発助成, 助成受付番号第13011号, 研究課題番号⑥.
- 5) 宮田弘和他: 地震後の橋台背面土の沈下量に関する解析, 土木技術資料, 52-3, pp. 10-15, 2010.
- 6) 七澤利明, 真弓英大, 河野哲也他: 橋梁基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第4339号, 2016.
- 7) 公益社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017.
- 8) 小安浩理他: 北海道に分布する周氷河性斜面における堆積物の特徴, 日本地質学会学術大会講演要旨, 2022.
- 9) K.K. Phoon, Shuku, T. et al.: Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making, *Soils and Foundations*, 62(5), 2022.