

橋台基礎前面に鋼管矢板（鋼管杭）を設置した耐震対策方法の設計評価手法の提案

鋼管杭技術委員会／土木基礎小委員会

1. はじめに

古い年代の既設道路橋は、液状化を考慮した設計が行われておらず、一部では地震時の地盤の液状化に伴う側方流動等により甚大な被害が生じている。これに対し、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化（課題名：大規模実証実験等に基づく液状化対策技術の研究開発、研究期間：平成26年度～平成30年度）」において、液状化地盤にある既設橋台基礎の耐震性評価手法（側方流動が生じた場合の評価）および耐震補強工法についての検討がなされ、その成果が共同研究報告第506号「橋梁基礎の液状化に対する耐震性評価手法と耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書」¹⁾にまとめられている。

この中で鋼材を用いた耐震対策方法として、鋼管矢板（鋼管杭）を用いた

側面一体型補強と前面分離型補強の2タイプ（図1）が提示されており、前者の側面一体型補強については、土圧法モデルによる具体的な設計手法および計算例が示されているのに対し、後者の前面分離型補強の設計モデルについては、類似分野における既往研究²⁾の紹介にとどまっている。

そこで鋼管杭・鋼矢板技術協会では、前面分離型補強タイプとして鋼管矢板（鋼管杭）を橋台基礎前面に設置した耐震対策方法（以下、橋台基礎前面補強壁）を対象として、実験および解析による検討を行い、設計評価法を提案した。本報文では、橋台基礎前面補強壁の概要およびその設計評価手法について述べる。

2. 橋台基礎前面補強壁の概要

液状化地盤における橋梁基礎の耐震性能の照査方法については、平成14

年の道路橋示方書・同解説より、レベル2 地震動に対する液状化地盤上の橋台基礎の耐震性能照査法が導入され、液状化地盤に対する橋台基礎の耐震性向上が図られた。

現行照査法は、図2 (a) に示すように橋台躯体への支承反力、慣性力および橋台背面土圧の作用に対して、基礎前面地盤の抵抗が液状化により低下した状態を想定し、基礎の耐力または変形能を確保するというものである。しかし、橋台高さが低い橋台において、各部の慣性力や土圧が小さいにも関わらず、著しい残留変形を伴う被害を生じた事例も確認されている。こうした事例では、基礎周辺地盤が液状化に伴う側方流動を生じ、これが基礎に対する土圧として影響を及ぼした可能性が考えられている（図2 (b)）。

文献1) では、この側方流動に対する適切な耐震対策を提案する際に、既設橋への適用を考慮して、優先すべき

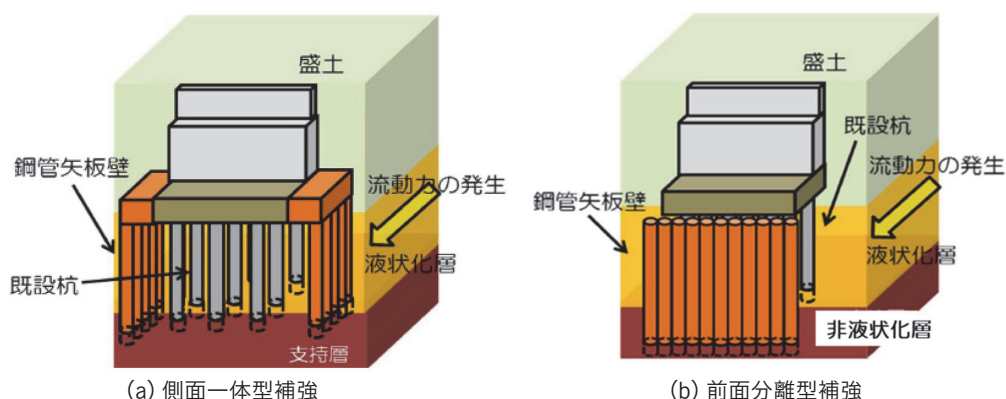


図1 鋼材を用いた耐震対策方法

事項として、

- ①液状化に伴う地盤流動に対して効果的であること
- ②補強工事の際に既設橋の通行機能をできるだけ阻害しないこと
- ③施工機械の適用性があること

を要件として挙げており、図1に示す2タイプの耐震対策方法が提示されている。橋台基礎の被災形態に対する対策効果と施工性の観点から、それぞれの耐震対策方法の特徴を表1に示す。

橋台基礎前面補強壁は、橋台基礎の前面に配置した壁により地盤の流動を抑止することから、橋台基礎への作用力を低減する効果、ならびに橋台背後の地盤沈下を抑止する効果が期待できる。一方で、既設の橋台基礎とは分離した構造であることから、既設基礎の支持力低下に対する被害抑止には寄与しないと考えられるが、施工面においては既設構造との一体化が不要のため、他の補強方法に比べて工期、コストを縮減することが可能と考えられる。

3. 評価方法

(1) 流動化が生じる場合の評価手法

橋台基礎前面に補強壁を設置した場合の地盤流動化が生じる時の評価手法としては、

- (a) 地盤-構造連成系の応答解析モデルにより構造の変状を直接算定する方法
- (b) 構造系に作用する外力を予め算定し、梁（構造系）～ばね（地盤抵抗）モデルにより構造の変状を算定する方法

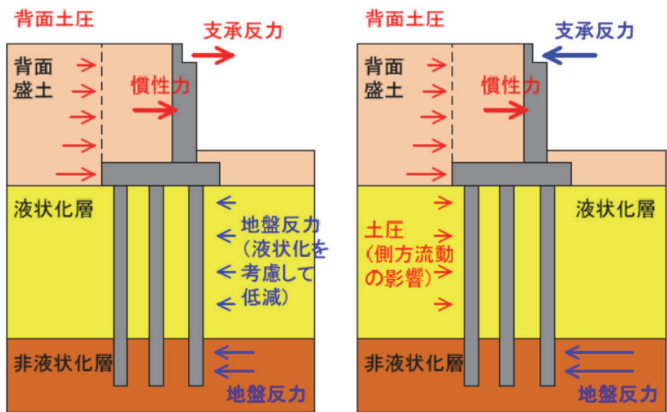
が考えられる。(a) については地震における時々刻々の挙動を評価できる動的解析手法（例：FLIP）と液状化地盤の剛性低下を推定し主に自重を作用させて変状を求める静的解析手法（例：ALID）がある。また、(b) については、②補強壁位置の流動量を推定して応答変位法によるもの、③文献1）で提案されている土圧法モデルをベースに橋台基礎と前面補強壁の間の地盤をバネでモデル化して応答を計算する方法、

などが考えられる。表2に各方法の概略とメリット、課題を示す。

液状化した地盤をバネとして評価する②、③の方法については、現状では液状化度合いや離隔距離などの影響を適切に評価するのが難しいことから、①構造-地盤系の地震応答解析において、堤防耐震性の評価でも実績があり、地盤パラメータ設定なども比較的簡便な手法である静的応答解析（ALID）による評価を提案する。以降はALIDによるモデル化の詳細について記載する。

(2) ALIDの概要

構造-地盤系の応答解析（ALID）は、地震による構造-地盤系の変状のメカニズムを液状化した土層の剛性が低下することであると仮定するとともに、構造-地盤の自重を作用させて変状を求める方法^{3,4)}であり、河川堤防の耐震性能照査などで広く使われている手法である。液状化に伴って生じる流動を液状化後にゆっくりと生じる現象と想定し、線形の静的有限要素法によって評価する。

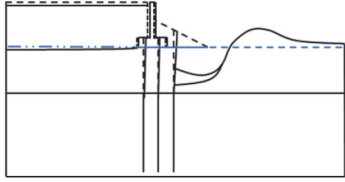
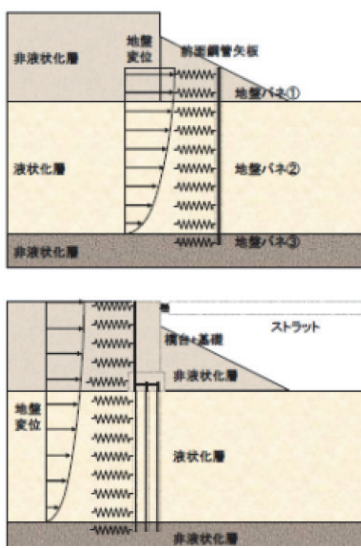
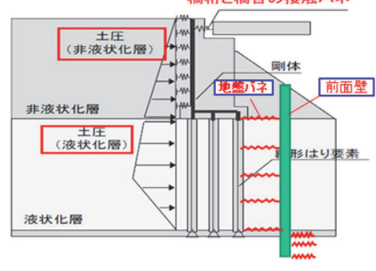


(a) 現行照査法 (b) 側方流動の影響を受ける場合の例
図2 液状化地盤上の橋台に関する概念図

表1 鋼材を用いた耐震対策方法の特徴

		(a) 側面一体型	(b) 前面分離型 (橋台基礎前面補強壁)
耐震対策の方法		既設フーチングの側面に斜杭または鋼管矢板壁を増設（一体化）	既設基礎の前面に鋼管矢板壁または鋼管杭壁を設置
対策効果	①側方流動に対する被害抑止	一体補強した杭基礎として流動力に抵抗する	前面補強壁により側方流動を抑止し、基礎への作用力を低減する
	②基礎・地盤の支持力低下に対する被害抑止	一体補強構造として杭基礎の支持力を増強する	杭基礎とは分離していることから、基礎の支持力増強には寄与しない
	③橋台背後面の沈下の抑止	たて壁の変位を抑えることにより、橋台背後面の沈下抑制が期待できる	たて壁の変位を抑えることにより、橋台背後面の沈下抑制が期待できる
施工性		・新設フーチングを増設する際は、既設フーチングの鉄筋を切断しないように配慮が必要	・既設構造との一体化が不要のため、工期、コスト面で有利 ・桁下での施工となるため空頭制限の配慮が必要

表2 橋台基礎前面に補強壁を設置した場合の評価方法と課題

	①構造-地盤系の 地震応答解析プログラム	②応答変位法	③土圧法モデル ¹⁾
方法(略図)	橋台基礎と補強壁、地盤の一体モデルを現行の地震応答解析ソフトで計算(ALID、FLIPなど) 	- 補強壁位置の流動量を強制変位として作用 - 橋台位置での変位量(補強壁を考慮)応答変位法にて照査 	橋台杭と補強壁をバネでつなげ(仮想反力モデル)、設計土圧に対する応答を照査 
メリット	橋台基礎と補強壁および地盤挙動を一体評価できる	先行の検討事例(橋脚基礎)あり ²⁾	地震時の慣性力の考慮が可能
主な課題	- 橋台基礎への適用性の確認 - 設計照査方法の構築	- 地盤変形量計算手法の妥当性検証 - 離隔距離の影響評価	- 杭基礎と前面補強壁の間の地盤バネの設定 - 離隔距離の影響評価

(3) ALID解析モデル

ALIDによる解析モデルは図3に示す土圧法モデル¹⁾(各構造部材を非線形のはり要素でモデル化し、流動力を分布荷重として載荷する方法)と同様とし、桁-パラペット間には、桁の衝突によるストラット効果を考慮するため、遊間以上の相対変位に対して衝突による反力を与える衝突バネを設定する(図4)。また、前面補強壁の鋼管杭・鋼管矢板は局部座屈の発生を考慮したM- ϕ モデルを用いることを基本とし、例えば「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾に記載されている鋼管矢板壁のM- ϕ モデルを基に最大曲げ耐力 M_{max} 、限界曲率 ϕ_u を設定する(図5)。

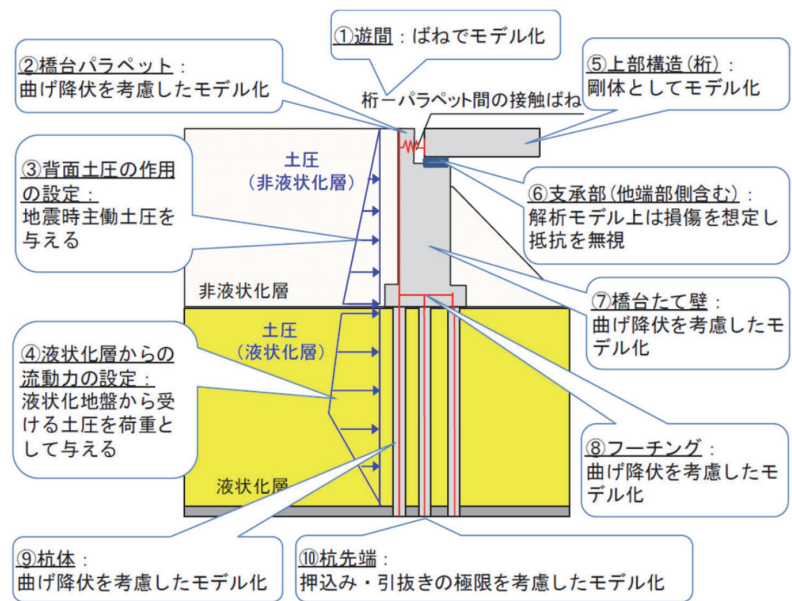


図3 土圧法による解析モデル

4. 提案法の精度確認

ALIDの適用性を確認するため、文献1)における土木研究所1G実験(大型振動台実験)モデル(1/10スケール)から表3に示す2ケースを対象として、ALIDによる液状化流動解析を実施し、結果の比較を行った。図6に大型

振動台実験モデルの例(実験Case4)、図7にALID解析モデルの例(実験Case4)を示す。地盤と橋台躯体はソリッド要素でモデル化し、分割幅5cmを基長としてメッシュ分割した。橋台基礎杭と鋼管矢板はビーム要素でモデル化し、地盤との不連続挙動を表現す

るためジョイント要素を介して地盤と結合した。

液状化層厚を1.0m、地盤液状化強度(RL値)を0.394とした場合の検討結果として、既設杭のせん断力分布および曲げモーメント分布、補強壁の曲げモーメント分布を図8～図10に示す。

基礎杭の応力分布は、杭3列配置の結果を示す。実験値とALID解析値の分布を比較すると、ALID解析値は杭列ごとの比較ではばらつきが見られるものの、平均的には実験結果の水準に近似できていることが確認できる。対策なし、対策ありの結果を比較すると、前面壁補強の対策により基礎杭の応力を低減することができ、最大曲げモーメントに着目すると約40%の低減効果が得られている。

5. 橋台基礎前面補強壁の対策効果の確認

橋台基礎前面補強壁の適用範囲や対策効果を確認するため、盛土高さ・液状化層厚・前面補強壁の設置位置（離隔距離）、橋桁支点有無などをパラメータとしてALIDによる解析を行った。ここでは補強壁の設置位置による対策効果を紹介する。

橋台基礎の前面側フーチング端部から補強壁までの離隔距離は、杭施工機の幅+1.0m程度必要となると考えられる。離隔距離1.2m、3.0m、6.0m、補強壁なし、での解析実施例（液状化に

伴う地盤流動化を考慮）を図11、12に示す。補強壁の離隔距離が3.0mのとき、橋台たて壁の水平変位は最も小さくなっており、離隔距離6.0mとした場合においても補強壁なしの場合の半

表3 検討対象とした実験ケース¹⁾

	基礎の諸元	対策工法（実寸）
Case1	既製RC杭 φ450mm 8×3列	無対策
Case4	既製RC杭 φ450mm 8×3列	鋼管矢板壁（前面分離型） φ800, t=19mm×11本

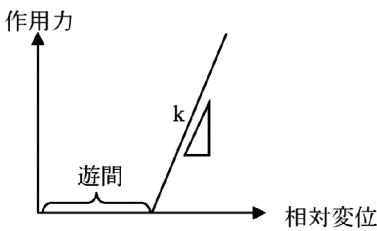


図4 桁-パラペット間の衝突パネ

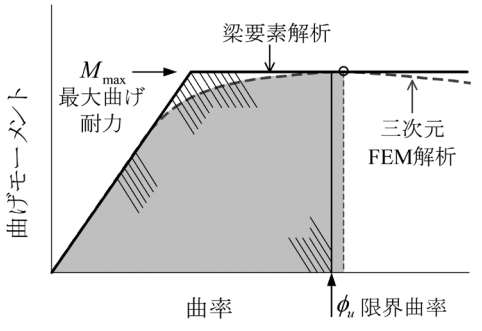


図5 鋼管のM-φ関係の概要

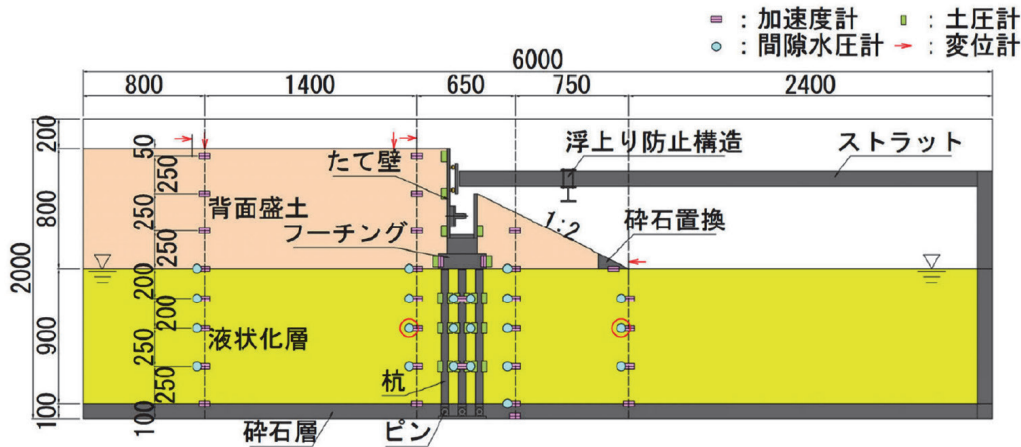


図6 検討対象とした大型振動台実験モデルの例（実験 Case4）¹⁾

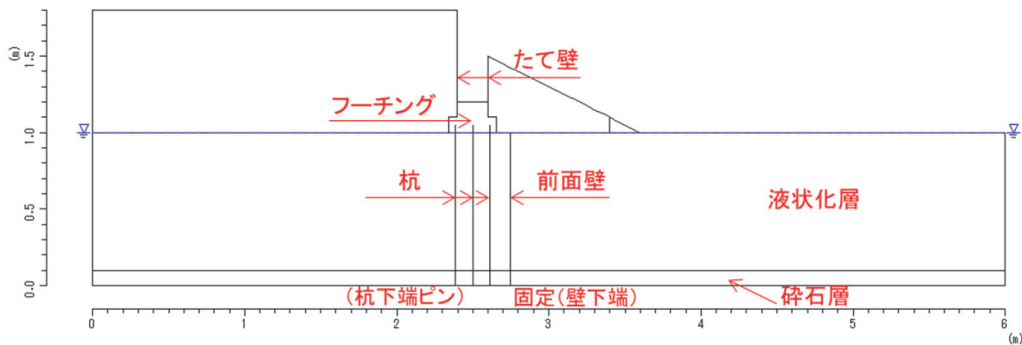


図7 ALID解析モデルの例（実験 Case4）

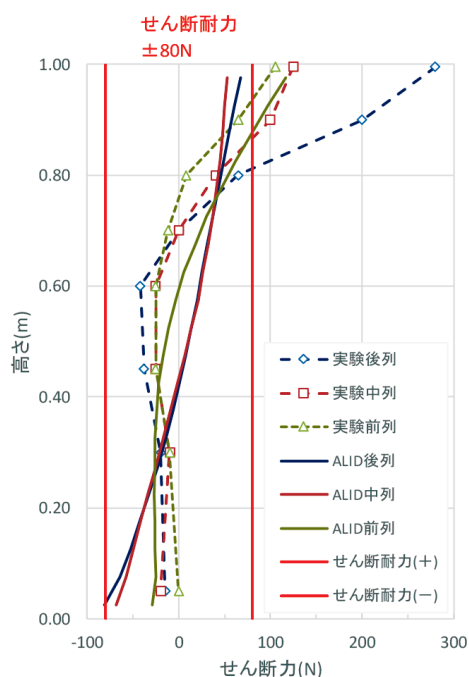


図8 基礎杭のせん断力分布

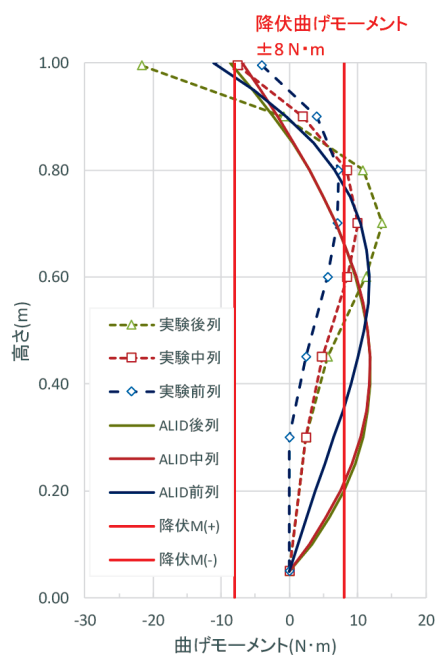


図9 基礎杭の曲げモーメント分布

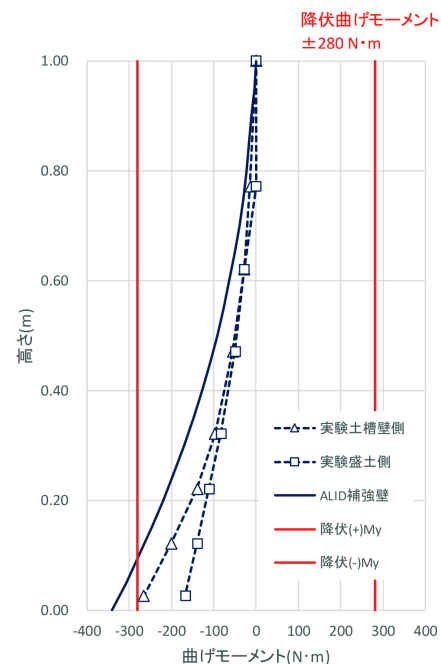


図10 補強壁の曲げモーメント分布

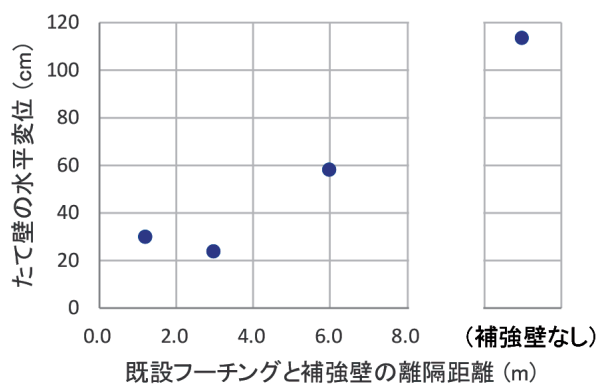


図11 補強壁の離隔距離とたて壁水平変位の解析事例

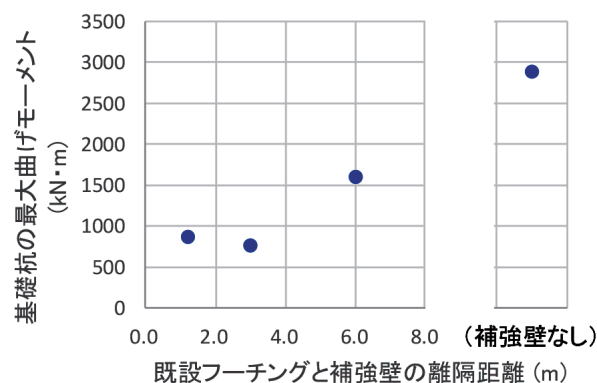


図12 補強の離隔距離と基礎杭の最大曲げモーメントの解析事例

分程度に抑えられていることを確認した。また、既設の杭基礎に作用する最大曲げモーメントも同様の傾向となっている。

6. まとめ

本報では橋台基礎前面補強壁の概要およびその設計評価手法案を紹介し

た。橋台基礎前面補強壁による耐震対策効果が確認された一方で、本対策手法に関する実験や解析などの検討事例はまだ十分ではなく、橋台や橋台基礎の形式・形状、地盤性状などの設計条件に応じた適用性や対策効果には不明確な点があることに留意する必要がある。なお、工法の概要や既設基礎の調査方法、設計モデルや施工方法の詳細は「橋台基礎前面補強壁の設計評価方法に関する検討資料」として鋼管杭・鋼矢板技術協会の技術資料として取りまとめる予定であるので、そちらを参照されたい。

【参考文献】

- 1) 国立研究開発法人土研研究所、国立大学法人東京工業大学、一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会：共同研究報告 第506号 橋梁基礎の液状化に対する耐震性評価手法と耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書（土研研究所、平成31年3月）
- 2) 小笠原政文、谷和弘、松尾隆志、坂本俊一：流動化における橋梁基礎構造物の設計手法に関する研究、土木学会論文集、No.645、Ⅲ-50、pp.77-89、2000。
- 3) 安田進、吉田望、規矩大義、宇田将人：液状化に伴う残留変形解析方法の河川堤防への適用、第25回地震工学研究発表会講演論文集、pp.381-384、1999。
- 4) 安田進、稲垣太浩他：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性、第40回地盤工学研究発表会、pp.525-526、2005。
- 5) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）