

# 複合的な地盤抵抗を考慮した道路橋下部構造の性能評価法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：七澤利明，大住道生，河野哲也，  
澤田守，飯島翔一

## 【要旨】

現行の設計基準による照査を満足しないにも関わらず，大地震で被害が生じていない既設橋が多数存在している。この要因の一つに，副次的な地盤抵抗の未考慮が考えられる。本研究では，既設橋の合理的な耐震性能評価手法の開発のため，副次的な地盤抵抗について検討を行った。まず，杭基礎フーチング下面の地盤抵抗について，建築分野において適用されている方法を適用して杭基礎の耐震性能評価手法を検討した。その結果，条件の違いや知見が少ないことを踏まえると，考慮することは困難であることが確認された。そして，橋台背面土の地盤抵抗について，橋台の耐震性能評価手法の検討及び橋台模型実験の計測データの分析を行った。その結果，地盤抵抗を考慮することで橋台の耐震性能を有利に評価できることが確認された。

キーワード：杭基礎，橋台，地盤抵抗，相互作用，耐震設計

## 1. はじめに

限られた財源の中で既設道路ネットワークの強靱化を行うには，真に補強が必要な既設橋の抽出が求められる。一方で，レベル2地震動に対する照査が導入された平成8年以前の基準に従って造られた道路橋基礎及び橋台は，現行基準による照査を満足しないことが多いが，過去の大地震において必ずしも被害が生じているわけではない。この要因の一つとして，通常設計では考慮されない地盤抵抗要素が実際には抵抗力として寄与していることが考えられる。

本研究では，副次的な地盤抵抗を考慮することによる既設橋の合理的な耐震性能評価手法の開発研究に取り組んだ。H27～28年度には，杭基礎フーチング下面の地盤抵抗を考慮した杭基礎の耐震性能評価手法，H29～30年度には，橋台背面土の地盤抵抗を考慮した橋台の耐震性能評価手法を検討した。

## 2. 杭基礎フーチング下面の地盤抵抗

### 2.1 研究の背景

道路橋杭基礎の設計では，鉛直荷重及び水平荷重は杭のみで抵抗させることを原則としている。一方，建築分野においては，図-2.1に示すように，直接基礎と杭基礎の中間の抵抗機構となる，フーチング下面部と杭部の両方の地盤抵抗を期待する基礎形式（パイルド・ラフト基礎）の採用事例がある。建築基礎構造設計指針<sup>2)</sup>では，フーチング下面部の荷重分担を設定して，残りの荷重を杭部が負担するとして，パイルド・ラフト基礎の支持力を確認するとしている。具体的には，死荷重・活荷重といった絶えず作用する荷重（「常時荷重」という）による圧密やクリープ，さらには地震時等の一時的な荷重に対して過大な沈下がないよう地盤の降伏支持力に着目した設計が行われる。この際，

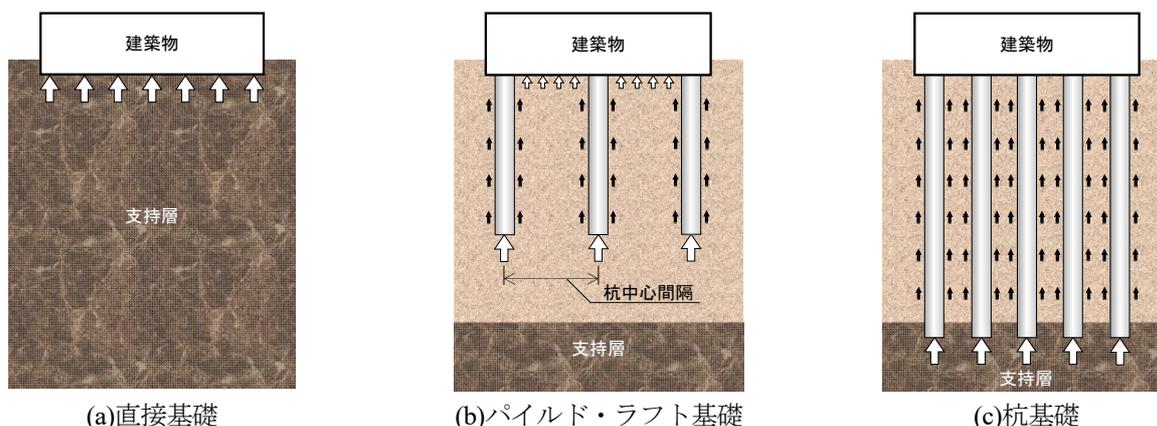


図-2.1 基礎形式の概念図

地盤条件の不確定性や安定性を損なう種々の事項への配慮から、適切な安全率が確保される。

道路橋杭基礎の設計にも、杭基礎フーチング下面の地盤抵抗を考慮することで、より合理的に杭の耐震性能を評価できると考えられる。そこで、同様の地盤抵抗が考慮されるパイルド・ラフト基礎<sup>2)</sup>の設計法の既設道路橋杭基礎への適用可能性について調査した。

## 2. 2 研究内容

### 2.2.1 基礎の沈下

道路橋は、上部構造が連続して機能するため、基礎毎に差が生じないように沈下量を厳しく制限する必要がある。一方、単体で機能する建築物は道路橋ほど厳しく制限はされないため、建築物に対するパイルド・ラフト基礎の設計法をそのまま新設橋に対して適用することは困難と考えられる。ただし、既設橋の不完全支持杭基礎では、長期間の供用により常時の沈下が収束していることから、常時の沈下量に対する配慮は不要であり、パイルド・ラフト基礎設計法を適用できる可能性がある。なお、地震等により地盤が沈下してフーチング下面部と地盤に隙間が生じるような状態では、水平と鉛直ともにフーチング下面部の地盤抵抗は期待できない。

### 2.2.2 パイルド・ラフト基礎の鉛直抵抗

パイルド・ラフト基礎において、鉛直荷重に対してフーチング下面部と杭部、両方の抵抗力が期待できる適用範囲は、図-2.1(b)に示す杭と杭の中心間隔が杭径Dの5倍~10倍以上<sup>3)</sup>とされている。また、杭間隔が10D以下となるとフーチング下面部の分担<杭部の分担となり、5D以下では杭基礎と近い挙動を示すことが報告されている<sup>4)</sup>。一方、道路橋における杭基礎では、昭和39年から現在まで杭の最小中心間隔は2.5Dと基準<sup>5)6)</sup>に規定されている。また、既往の調査結果<sup>7)8)9)10)11)</sup>を分析すると、図-2.2に示すように既設道路橋杭基礎での杭最小中心間隔は、ほとんどが5D以下であることがわかる。このように、既設橋では、杭の中心間隔が5Dよりも狭いため、フーチング下面部の地盤抵抗は期待できないと考えられる。

### 2.2.3 パイルド・ラフト基礎の水平抵抗

パイルド・ラフト基礎では、杭部の水平抵抗のほか、フーチング下面部のせん断抵抗等が水平荷重に対する抵抗要素として考えられる。しかし、パイルド・ラフト基礎に関してはフーチング下面部と杭部の鉛直荷重

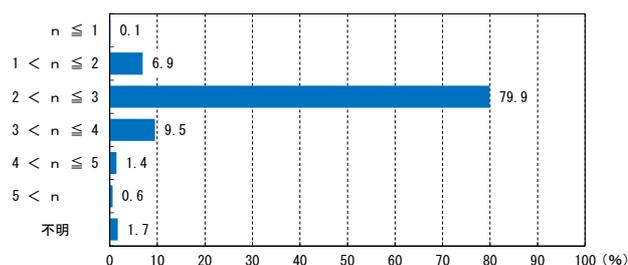


図-2.2 杭の最小中心間隔倍率 n  
(杭径 D に対する倍率 n)

分担や相互作用を考慮した沈下に関する研究が多い一方、水平抵抗に関する研究は数例<sup>(例えば 12)</sup>のみで、水平抵抗に関する知見はあまりないのが実状である<sup>2)</sup>。

建築基礎構造設計指針<sup>2)</sup>では、耐震設計に関して「今後の研究に待つところも多い」と具体的な記述はない。また、地震時の水平抵抗(水平地盤ばね、上限値等)に関する知見は非常に少なく限られているが、地震時にはフーチング下面部と杭部の鉛直の分担割合によって水平の地盤抵抗が変化するなどの報告が示されている<sup>3)</sup>。

## 2. 3 まとめ

調査の結果、既設道路橋基礎における一般的な杭間隔ではフーチング下面部の地盤抵抗が期待できないこと、水平抵抗について既往の知見が少なく不明な点があることなどから、パイルド・ラフト基礎の設計法をそのまま既設道路橋杭基礎の耐震性評価に適用することは困難であることが分かった。

## 3. 橋台背面土の地盤抵抗

### 3. 1 研究の背景

橋台の地震時挙動には背面盛土が影響し、その影響には偏土圧の作用効果に加え、橋台背面側への挙動時には地盤抵抗が考えられる。従前より、道路橋橋台の設計では、静的照査時の設計法には偏土圧の作用効果が考慮されているが、地盤抵抗や動的影響に対する知見は十分ではなく、これらの影響を踏まえた設計法は確立していない。橋台の地震時挙動を解明し、構造物と背面盛土の動的相互作用効果を適切に考慮した評価手法を確立することで、より合理的に橋台の耐震性能を評価できると考えられる。

そこで、本研究では、橋台背面土に着目して、橋台の耐震設計評価法の検討を行った。平成28年熊本地震で損傷した道路橋を対象に、実橋の損傷状況と静的解析の比較をすることで、橋台背面土の地盤抵抗を考慮

表-3.1 対象橋の諸元

上部工	プレテンション方式PC単純T桁橋		
下部工	逆T式橋台，張出式橋脚		
基礎工	既製PC杭φ450		
橋長	63.00m (3径間)	幅員	12.25m
適用道示	S55道路橋示方書	竣工	S59年1月

表-3.2 対象橋の主な損傷

部位	主な損傷状況
橋台	堅壁の亀裂 A2:最大幅10mm
	背面側へ傾き A2:2.7°
	背面沈下 A1:80~140mm A2:200mm 遊間異常 A1:5mm A2:0mm
橋脚	A1側へ傾き P1:0.4° P2:0.1°
支承	変形・破断・移動

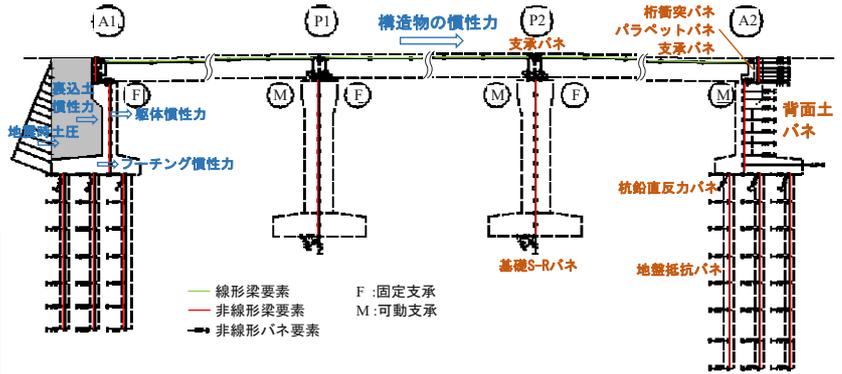
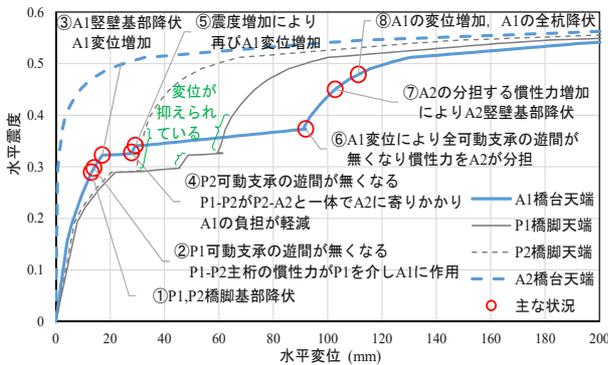
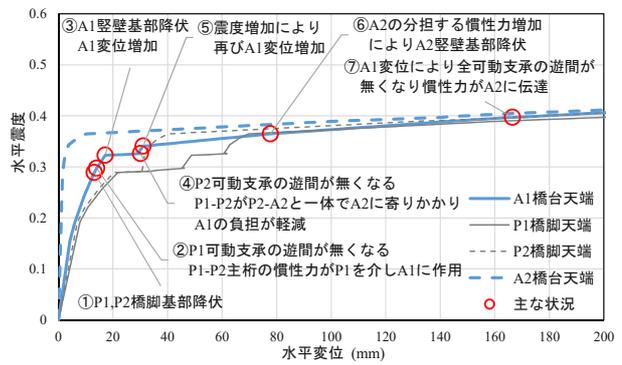


図-3.3 解析モデルの概要



(a) Case1 (橋台背面地盤抵抗を考慮)



(b) Case2 (橋台背面地盤抵抗を考慮しない)

図-3.4 水平震度と水平変位

したモデルの妥当性を検証した。また、H29年度に実施された大型模型実験により得られた計測データを分析し、背面盛土が橋台の挙動に与える影響を確認した。

### 3.2 被災橋の静的再現解析

#### 3.2.1 解析対象とした被災橋の概要

本検討の対象とした橋の諸元を表-3.1に、熊本地震における主な損傷を表-3.2に示す。直下型地震による橋の損傷は、振幅の大きい数回の地震波の繰り返しにより生じると考えられる。対象橋の損傷も、いくつかのステップに分類されるが、本検討では、背面盛土による偏土圧の作用効果及び地盤抵抗が生じるステップを対象に整理した。すなわち、慣性力の作用方向がA1からA2で、A1橋台は橋台前面側に慣性力が作用（以降、主働）し、A2橋台は橋台背面側に慣性力が作用（以降、受働）する状況を対象とした。

#### 3.2.2 再現解析モデル

図-3.3に解析モデルを示す。上部構造は線形はり要素、下部構造は非線形はり要素、周辺地盤等は非線形バネ要素でモデル化し、主働側となるA1橋台には地震時土圧を考慮した。解析方法は、構造物、橋台フーチ

ング上載土及び主働側土圧に地震時慣性力を考慮し、これを静的に漸増载荷するプッシュオーバー解析とした。受働側となるA2橋台には地盤抵抗を考慮するケース(Case1)の他、地盤抵抗を考慮しないケース(Case2)の解析も実施した。ここで、地盤抵抗はケーソン基礎の設計式<sup>6)</sup>より地盤反力係数と地盤反力の上限值を用いた。

#### 3.2.3 解析結果

図-3.4に各ケースの水平震度と各部位の水平変位及び主な状況を示す。Case1では、A1橋台は水平震度0.3を超えた付近(図中③)で降伏して変位が急増し、90mmを超えた付近(図中⑥)で変位の増加率は低下した。これは、全ての可動支承の遊間が無くなって慣性力がA2橋台に伝達され、A2橋台が抵抗したためと考えられる。その後、A2橋台が降伏し再びA1橋台の変位の増加率は上昇する(図中⑦)。A2橋台の降伏は、実際の損傷状況である堅壁の亀裂とも整合している。橋脚は、P1・P2橋脚の降伏から終局に至る(図中①)まで、P2橋脚よりP1橋脚の変位が大きくなっており、この解析結果は実際の損傷状況と一致している。橋脚の可動支承の遊間が無くなった後(図中②及び④)、

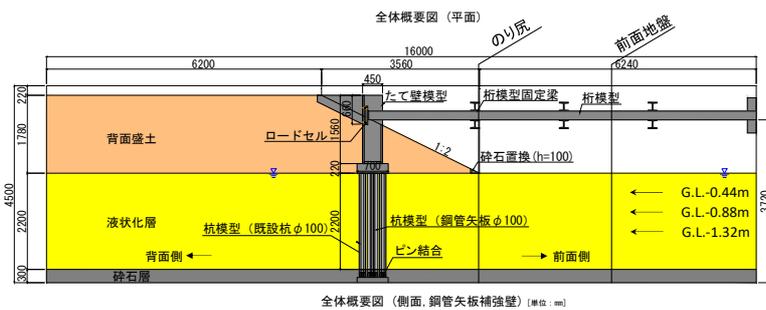


図-3.5 模型概要図

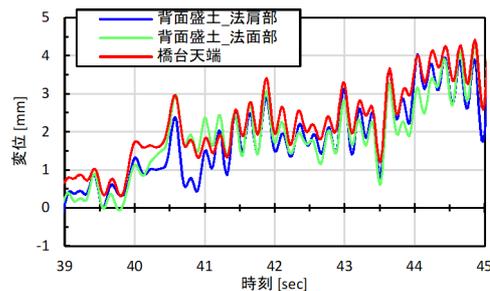


図-3.7 水平変位の時刻歴

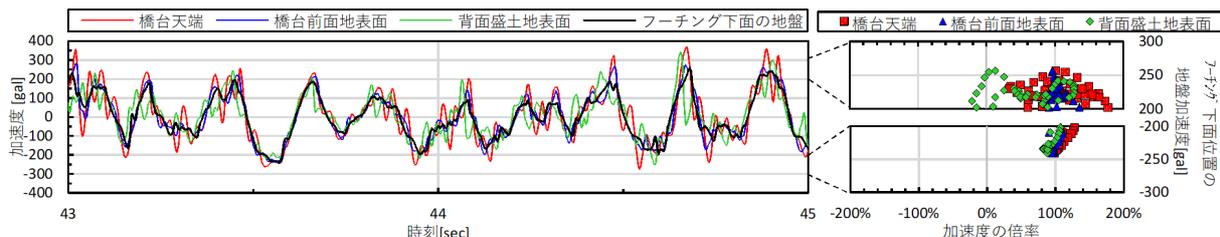


図-3.6 加速度の時刻歴とフーチング下面位置に対する加速度の倍率

P1-P2 径間が P2-A2 径間と一体で A2 橋台に寄りかかり、慣性力に対し A2 橋台が抵抗して P1・P2 橋脚の変位の増加率は低下している (図中緑字)。なお、橋全体系の耐力は水平震度 0.55 程度となった。

Case2 では、全可動支承の遊間が無くなる前の時点 (図中⑥) で既に A2 橋台は降伏している。A2 橋台の分担できる慣性力が Case1 と比べて小さいため、全ての部位の終局が早く P1・P2 橋脚の壊れ方も早くなった。なお、橋全体系の耐力は水平震度 0.4 程度となった。

### 3.2.4 まとめ

本検討では、橋台背面の地盤抵抗を考慮しないケースに比べ、考慮したケースの耐力が水平震度 0.15 程度上回り、橋全体系の耐震性は向上した。また、再現対象とした実橋の損傷状況と比べると、橋台背面の地盤抵抗を考慮したケースの解析結果で一致する部分が見られた。L2 地震動の耐震性能評価に際して橋台背面土の地盤抵抗を考慮することで、実挙動に即した合理的な評価ができる可能性が確認された。

## 3.3 大型模型実験による橋台挙動の分析

### 3.3.1 対象とした模型実験の概要

本検討の対象とした実験<sup>13)</sup>の概要図を図-3.5 に示す。実験は、液状化地盤上に設置された既設 RC 杭に支持される支承条件が可動の既設橋台の振動台実験である。加振にはレベル 2 地震動に相当する波形が用いられており、強振動下で液状化しているが、本検討では液状化前の橋台に対する背面盛土の作用及び地盤抵抗

に着目し、橋台の挙動を分析した。なお、液状化前の加振加速度はレベル 1 地震動相当である。

### 3.3.2 模型実験結果の分析

対象実験では、半断面モデルの無補強橋台と補強橋台を同時加振し、それぞれ計測しているが、両者の結果に傾向の差異はみられなかったため、無補強橋台の結果を整理したものを示す。

図-3.6 に橋台天端および周辺地盤の加速度の時刻歴とフーチング下面位置に対する各位置の加速度増幅率を示す。橋台天端および周辺地盤の加速度をみると、これらは概ね同じ位相であることがわかる。フーチング下面位置に対する橋台及び周辺地盤の加速度増幅率をみると、200~300gal では 100±50%程度に集約されることが確認される。また、増幅率のばらつきは、正負方向で傾向が異なることが確認される。レベル 2 地震動を考慮する橋台の設計は、道路橋示方書<sup>6)</sup>では、「橋台の地震時挙動は、橋台自体の振動よりも背面土の振動に一般に支配されると考えられる」とされ、地盤面における設計水平震度で照査される。今回の実験では、各所の加速度は同位相であり、200~300gal において、ばらつきはあるものの耐震設計上の地盤面の加速度の 100±50%程度以内であることから、現行基準の考えは、一定の妥当性があることが示唆される。

図-3.7 に橋台と背面盛土の地表面位置の水平変位の時刻歴を示す。橋台と背面盛土の変位は同位相で、盛土に比べ橋台が前面方向への変位を大きく保ちながら、同程度の相対変位差を伴って推移している。これ

より、橋台の変位応答特性は背面盛土の影響が大きいと考えられる。

図-3.8 に橋台背面土圧の土圧係数の時刻歴を示す。土圧係数は、橋台水平震度が正方向の時に減少し、負方向の時には増加しており、橋台慣性力方向と土圧の位相が逆転している。これは、背面土より橋台の変位が若干大きいことで、慣性力前面側作用時は土圧が減少し、慣性力背面側作用時は背面土が抵抗して土圧が増加したと考えられる。これより、橋台背面土圧は、橋台と背面盛土の相対変位と相関性があることが示唆される。

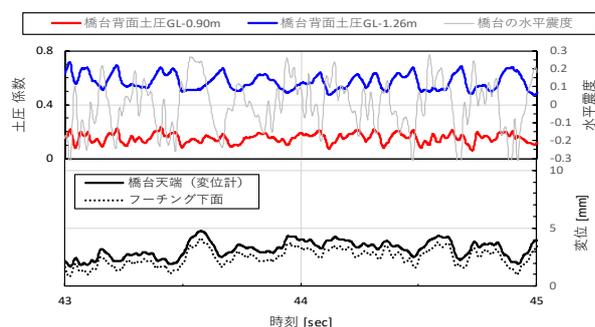


図-3.8 橋台背面土圧の土圧係数及び橋台水平震度、橋台変位の時刻歴

### 3.3.3 まとめ

振動台実験で得られた加速度、変位、土圧を分析した結果、背面盛土が橋台挙動に影響していることが示唆された。橋台の耐震性能評価を適切に評価するには、これらの影響を踏まえる必要があると考えられる。

## 4. おわりに

本研究では、副次的な地盤抵抗を考慮した合理的な耐震性能評価手法の開発のため、杭基礎フーチング下面の地盤抵抗及び橋台背面土の地盤抵抗について検討した。今回の検討により、以下の結果が得られた。

- 1) 既設道路橋基礎における一般的な杭間隔ではフーチング下面部の地盤抵抗が期待できない。また、水平抵抗は知見が少なく不明な点がある。
- 2) 橋全体系モデルによる静的解析では、橋台背面盛土の地盤抵抗を考慮することで、耐震性能の向上及びより実挙動に即した結果が得られた。
- 3) 橋台模型実験を分析した結果、背面盛土が橋台挙動に影響していることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木

研究所：国土技術政策総合研究所資料第 814 号，土木研究所資料第 4295 号，平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，2014.12

- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10
- 3) 日本建築学会：2011 年度大会（関東）研究集会資料，パネルディスカッション資料，パイルド・ラフト基礎設計の現状と課題 基調講演資料 パイルド・ラフト基礎の発展—グローバルな視点から—，2011.8
- 4) 土屋勉，長尾俊昌，永井宏：パイルド・ラフト基礎の簡易算定法の検討，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 679 号，pp.1421～1427，2012.9
- 5) 道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇，社団法人日本道路協会，1964 年 3 月
- 6) 道路橋示方書・同解説 IV～V，公益社団法人日本道路協会，2012 年 3 月
- 7) 塩井幸武，古屋敏夫，千野啓次：構造物基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料第 1285 号，1978 年 3 月
- 8) 岡原美知夫，小幡宏，小池信一：構造物基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料第 2528 号，1988 年 1 月
- 9) 福井次郎，中野正則，石田雅博，七澤利明，芦達拓哉，田口博文：橋梁基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料第 3500 号，1997 年 1 月
- 10) 中谷昌一，石田雅博，白戸真大，井落久貴：橋梁基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料第 4037 号，2007 年 2 月
- 11) 七澤利明，眞弓英大，河野哲也，坂本裕司，田辺晶規，河村淳，宮原清，今野貴元：橋梁基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料第 4339 号，2016 年 10 月
- 12) 真野英之，中井正一，高梨晃一：水平力を受けるパイルド・ラフト基礎の遠心模型実験（その 1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.661～664，2002
- 13) 中田光彦，谷本俊輔，高橋宏和，大住道生，七澤利明，河又洋介：液状化地盤における既設橋台基礎の非線形挙動を考慮した大規模振動台実験，第 21 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2018.7.

# A STUDY ON PERFORMANCE EVALUATION METHOD OF ROAD BRIDGE SUBSTRUCTURE CONSIDERING MULTIPLE GROUND RESISTANCE

Research Period : FY2015-2018

Research Team : Bridge and Structural Engineering

Research Group

Author : NANAZAWA Toshiaki

OHSUMI Michio

KOHNO Tetsuya

SAWADA Mamoru

IJIMA Shoichi

## Abstract :

In order to develop the rational seismic performance evaluation method for existing bridges, ground resistance of pile foundation was reviewed. In order to clarify the ground resistance on the bottom of footing, the design method for buildings and bridges were compared. As a result, it was confirmed that additional resistance cannot be counted on from their structural details. Regarding the ground resistance of the back of abutment, we examined the evaluation method of seismic performance of abutment through experiments and analysis of them. As a result, it was confirmed that seismic performance of abutment can be advantageously evaluated by considering the ground resistance.

Key words : pile foundation, abutment , ground resistance, interaction, seismic design