

令和 4 年 5 月 5 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14819

研究課題名（和文）杭の影響を考慮した既設橋フーチングの耐震評価法と破壊形態に応じる耐震補強法の提案

研究課題名（英文）Proposal of seismic evaluation method for existing bridge footing considering the influence of piles and seismic retrofitting method corresponding to its fracture mode

研究代表者

楊 勇（Yang, Yong）

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（構造物メンテナンス研究センター）・専門研究員

研究者番号：20867733

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、杭の影響を考慮したフーチングの耐震評価法と破壊形態に応じた耐震補強法の提案を目的とし、載荷実験と数値解析により検討を行った。その結果、提案した耐震評価法においては、杭列配置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響を調べた上で、フーチングの照査断面の曲げ耐力を精度よく評価するために有効幅を全幅と設定し、また、杭列配置によるフーチングの曲げ耐力の増加分に関する修正係数を新しく導入した。提案した耐震補強法は、フーチングの破壊形態に応じて格子状の補強材を用い、実橋を想定した上で補強詳細を設計し、ひび割れの抑制や補強材とフーチングの一体化などの観点から補強効果を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、フーチングを単純な梁部材として耐震評価及び耐震補強を行う現状に対して、杭の影響を新しく考慮したフーチングの破壊メカニズムを解明した上で、高精度な耐震評価法を、また、施工性の高い、かつ有効的な耐震補強法を提案した。限られた財源を効率よく利用する観点からみると、高精度な耐震評価法により膨大な数の既設道路橋基礎の耐震補強優先順位を合理的に決めることが期待できる。また、耐震補強法を実橋に適用することにより、自然災害に負けない社会づくりに貢献することも期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a seismic evaluation method for footing considering the influence of piles and a seismic retrofitting method corresponding to its fracture mode, by loading test and numerical analysis. In the proposed seismic evaluation method, the influence of the pile arrangement on the fracture mechanism of the footing was investigated. The effective width was set as the full width to accurately evaluate the bending strength of the inspection cross section of the footing. In addition, a correction coefficient has been newly introduced to consider the increase of bending strength of footing due to the influence of pile arrangement. In the seismic retrofitting method, a grid-like reinforcing material was adopted corresponding to the footing fracture mode, and the reinforcement details were designed for practical bridge structure. The reinforcement effect was confirmed from the viewpoint of crack restraint and integration of reinforcing material and footing.

研究分野：構造工学 耐震工学

キーワード：フーチング 杭列 破壊形態 破壊メカニズム 耐震評価 耐震補強

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁杭基礎におけるフーチング部材は、道路橋示方書において梁部材として設計することを標準とされるが、橋脚や杭と接合するために梁部材より複雑な地震時挙動を有すると考えられる。フーチングを梁として設計する場合には、杭の影響を考慮せず、杭がフーチングの破壊メカニズムに与える影響が明らかになっていなかった。また、現在まで開発された既設橋フーチングの耐震補強法の多くは、梁部材の破壊形態に応じる耐震補強法であるが、フーチングの破壊形態に応じる補強法はまだ開発されていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、旧基準で設計された既設橋フーチングを対象として、杭の影響を考慮したフーチングの高精度な耐震評価法と、フーチングの破壊形態に応じる耐震補強法の提案を目的とした。ここで、研究代表者が研究開始当初に主として考慮した杭の影響は、杭の本数と配置位置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響であった。また、提案しようとした耐震補強法は、梁部材の破壊形態でなく、放射線状なひび割れ分布を有するフーチングの破壊形態に応じる、高い補強効果が期待できる補強法であった。

3. 研究の方法

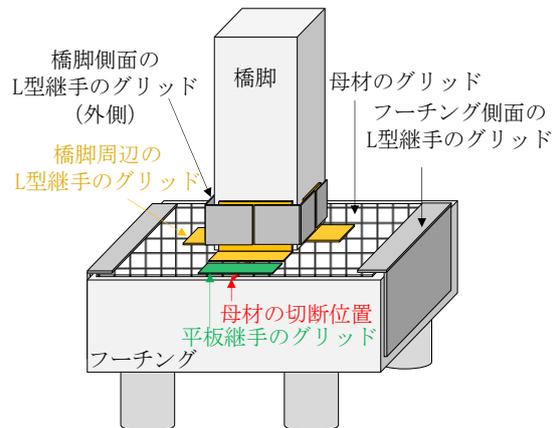
上記の研究の目的を達するため、採用した研究の方法は、載荷実験と数値解析の2種類である。下記でそれぞれ説明する。

(1) 載荷実験

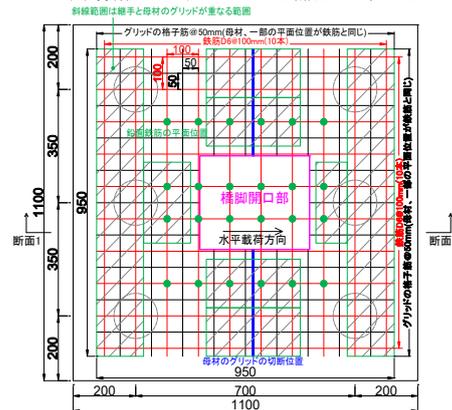
まず、令和2年度には、3体の縮小杭基礎供試体を設計・製作し、載荷実験を実施した。3体の供試体は、橋脚・フーチング・杭の寸法や配筋の詳細が同様で、杭列配置及びフーチングの補強有無をパラメータとした(供試体1: 杭列2×2、無補強; 供試体2: 杭列2×2、補強; 供試体3: 杭列2×3、無補強)。なお、令和2年度の補強供試体(供試体2)の載荷実験は、新材料である繊維グリッドと既設フーチングとの一体化性にのみ着目し、繊維グリッドによる耐震性能向上の可能性を確認した。

また、令和3年度には、令和2年度に載荷した無補強の供試体3を再利用して補強施工を行い、載荷実験により補強効果を検証した。繊維グリッドによる補強の考え方及び補強詳細を、供試体3を例として杭基礎供試体の詳細に合わせて図1に示す。なお、繊維グリッドによる補強の詳細に関しては、実橋の補強施工を想定した上で、橋脚位置により母材のグリッドにおける切断位置、及びそれに伴う継手のグリッドの配置を設けた。

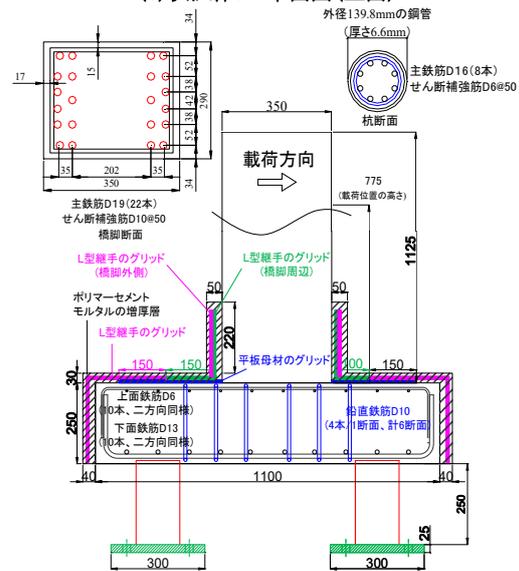
令和2、3年度に実施した載荷実験においては、供試体の杭底面を反力床に固定し、上部構造の自重を考慮せずに軸力を0とした状態で、橋脚位置に一方向繰り返し水平載荷を変位制御で行った。フーチングの上面鉄筋の初降伏時に載荷位置の水平変位を基準値1yとし、各レベルの変位に対して繰り返し載荷の回数を1回とした。水平載荷の段階において、橋脚の載荷位置の荷重・変位、フーチング上面の鉛直変位、フーチング側面の水平変位及び鉄筋・グリッドのひずみを計測した。



(a) 繊維グリッドによる補強の考え方



(b) 供試体3の平面図(上面)



(c) 供試体3の断面図(断面1)

図1 繊維グリッドによる補強の考え方及び補強詳細(単位mm)

(2) 数値解析

杭列配置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響を調べたため、鉄筋コンクリート部材の非線形解析機能に優れた解析ソフト DIANA を用い、前述した供試体 1 の詳細を基に基本解析モデルを構築し、杭列配置をパラメータとして 3 ケース (Case1 ~ 3) の FEM 数値解析を実施した (図 2)。各解析モデルにおいては、コンクリート部分を 3 次元の立体形状を有するソリッド要素にて、鉄筋部分は DIANA の機能にある埋め込み鉄筋要素にて構築した。

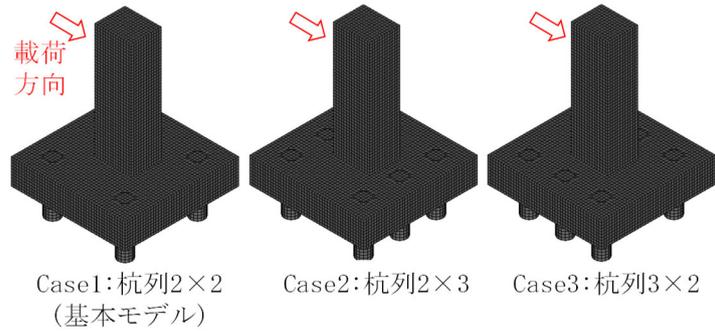


図 2 杭列配置をパラメータとした数値解析

4. 研究成果

得られた研究成果を下記 (1) ~ (3) に示す。

(1) 杭列配置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響

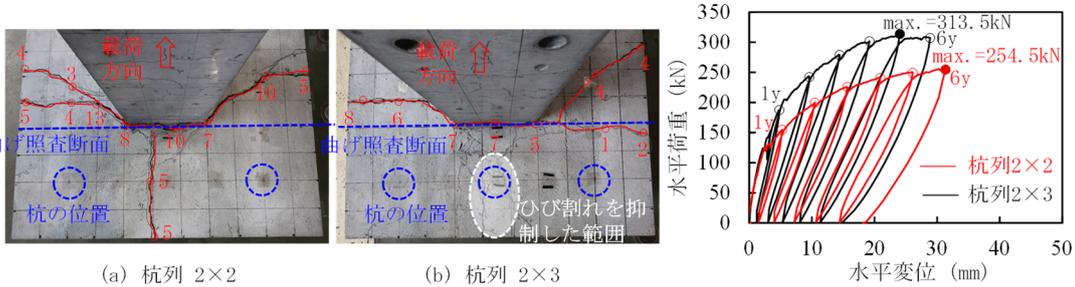


図 3 除荷後のフーチング上面の主要なひび割れ分布と幅 (mm) 図 4 荷重位置の荷重一変位関係

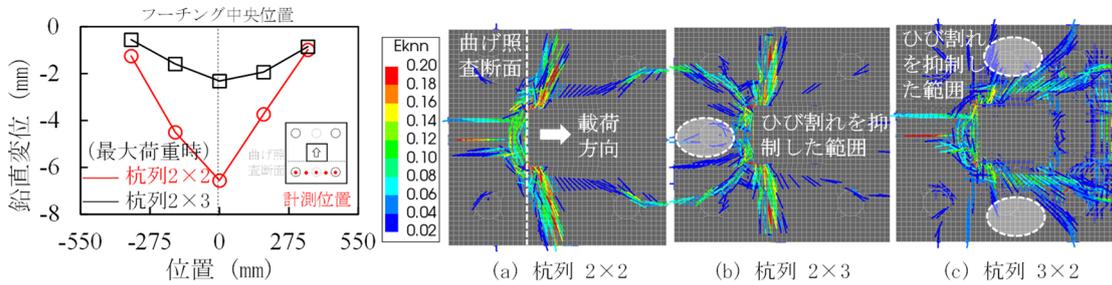


図 5 フーチングの鉛直変位の分布 図 6 フーチング上面のひび割れ分布 (水平変位が約30mmの時)

図 3 に示すように、杭列 2×2 と杭列 2×3 の供試体においては、杭列配置の違いによりフーチング上面の主要なひび割れの分布及びひび割れ幅が明らかに異なる。特に、杭列 2×3 の供試体においては、曲げ照査断面と平行する辺の中央位置に杭を配置することにより、曲げ照査断面とほぼ直交するひび割れを有効に抑制できた。

両供試体における荷重一変位関係 (図 4、水平変位: 1y ~ 6y) の結果も杭列配置の違いにより明らかに異なる。同図に示すように、杭列 2×3 の供試体において上面鉄筋の初降伏時 (1y) の水平剛性は、杭列 2×2 の供試体ほど低下せず、その原因は、図 3 に示す杭列 2×3 の供試体において曲げ照査断面とほぼ直交するひび割れを有効に抑制されたと考えられる。

また、杭列 2×3 の供試体における最大耐力は、杭列 2×2 の供試体より大きい結果となった。その原因は、杭列 2×3 の供試体において中央位置に杭を配置することによりフーチングの拘束条件が変化したことが考えられる。図 5 に示すように、杭列 2×3 の供試体において曲げ照査断面と平行する辺の中央位置の鉛直変位は、杭列 2×2 の供試体と比べて明らかに小さかった。つまり、杭列 2×3 の供試体におけるフーチングの鉛直変位や回転への拘束は、杭列 2×2 の供試体より強くなったことが分かる。

図 6 に示すように、曲げ照査断面と平行する辺の中央位置に杭を配置する場合 (杭列 2×3)、数値解析におけるひび割れの発生範囲は、杭列 2×2 と比べて明らかに抑制され、上記の実験結果と同様な傾向が確認できた。また、曲げ照査断面と直交する辺の中央位置に杭を配置する場合 (杭列 3×2) においては、上記の実験結果と同様にひび割れの発生範囲が抑制された。ただし、杭列 2×3 と杭列 3×2 の場合においては、杭の配置位置の違いにより抑制されたひび割れの発生範囲が異なった。

以上の分析より、杭列配置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響が確認できた。杭本数の増加と共にフーチングのひび割れの発生範囲や杭基礎の水平剛性低下が抑制され、また、それによりフーチングの拘束が強くなり杭基礎の最大水平荷重が増加した。ただし、杭列配置がフーチングの破壊メカニズムに与える影響は、杭本数だけでなく杭の配置位置にも依存する。

(2) 杭の影響を考慮した既設フーチング耐震性評価法の提案

道路橋示方書においては、フーチングを梁部材として、規定された曲げ照査断面に対して抵抗モーメントと作用モーメントとの比較によりフーチングの曲げ照査を行う。抵抗モーメント算定の現行式、及び引張鉄筋の断面積算定に必要となるフーチングの有効幅の求め方を図7に示す。なお、有効幅の算定式における係数 n は、道路橋示方書において想定した永続・変動作用及びレベル2地震動に対して1と1.5と規定される。

上記の道路橋示方書の規定に基づき算定した有効幅は、通常、フーチングの奥行きの全幅より小さい結果となる。一方で、本載荷実験の両供試体においては、全幅にわたってひび割れが発生し、全ての上面鉄筋が降伏し、全幅における鉄筋が断面引張力に抵抗したと考えられる。有効幅を全幅と仮定した上で、算定した両供試体における最大水平荷重は、263.6kNであった。その算定結果は、杭本数が少ない杭列2×2の供試体における最大水平荷重の実験値(254.5kN)とほぼ一致した。これらの結果から、フーチングの曲げ照査断面における抵抗モーメントの算定にフーチングの有効幅を全幅と設定する可能性が分かる。

一方で、杭本数が多い杭列2×3の供試体においては、前述した最大水平荷重の算定値が実験値(313.5kN)より小さい結果となった。それは、前述したように杭本数の増加と共にフーチングの拘束が強くなり、現行の評価法において杭の影響を考慮していないために過小評価となることが考えられる。

以上の分析より、既設フーチング耐震性を精度よく評価するため、有効幅と杭の影響に着目してフーチングの曲げ耐力の算定精度が改善できることが分かる。具体的に、図7に示すように、有効幅をフーチングの奥行き全幅と設定し、また、杭の影響を考慮した修正係数を適用する。なお、本載荷実験における最大水平力の結果から逆算した杭の影響に関するフーチング曲げ耐力の修正係数の値は、1.23となる。

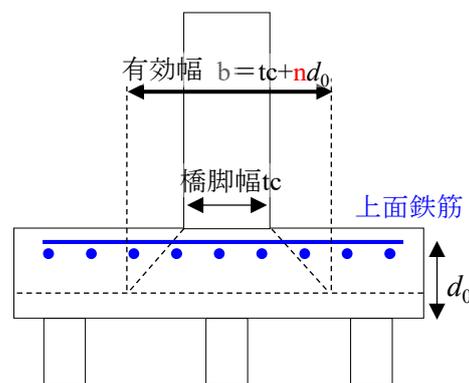
(3) 破壊形態に応じる既設フーチングの耐震補強法の提案

前述した実験結果や解析結果のように、水平地震力によりフーチングの上面に放射線状分布のひび割れが発生し、梁部材の破壊形態と明らかに異なった。本研究においては、繊維グリッドを用い、放射線状の破壊形態に応じる既設フーチングの耐震補強法を提案した。提案した耐震補強法は、既往の補強法と比べて上面増厚層が薄い、補強時に削孔などの工事が発生しないために既設フーチングへの影響が小さい、及び大型施工機械が不要のために狭いスペースでも補強施工ができるメリットを有する。

前述した供試体1及び供試体2の実験結果から、既往の補強法における繊維シートと既設フーチングの剥離のような破壊を、繊維グリッドにより有効に防止できることが分かった。つまり、耐震補強効果が発揮できる前提として、繊維グリッドによる増厚層と既設フーチングとの一体化が確認できた。

また、令和2年度に載荷した無補強の供試体3を再利用し、実橋に向けて繊維グリッドによる補強詳細を設計して補強施工を行い、載荷実験(水平変位:7y~14y)により補強効果を検証した。図8に示すように、補強後にひび割れの分布・向きが多少異なったが、ひび割れの幅及び進展に着目すると、補強後に曲げ照査断面付近や橋脚幅の範囲に発生したひび割れの幅が補強前と比べて明らかに小さかった。また、補強前にフーチング側面に発生したひび割れの幅は、ほとんど変化しなかった。これらの結果より、繊維グリッドによる増厚層は、既設フーチングと一体化となり、フーチング断面の作用力に抵抗しひび割れの進展を抑制したことが考えられる。

更に、図9に示すように、位置1~3における継手と母材のひずみは、最大水平荷重時まで水



現行式

$$\text{抵抗モーメント} \quad M = \sigma A_s d_0$$

$$\left[\begin{array}{l} A_s \text{ 有効幅} b \text{ における鉄筋断面積の合計} \\ \sigma \text{ 鉄筋の降伏強度} \end{array} \right]$$

提案式

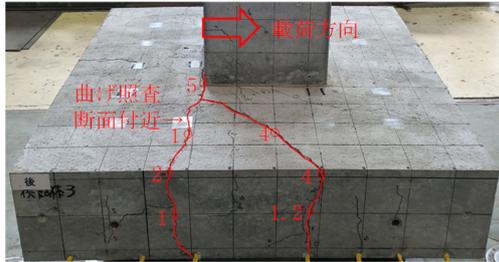
$$\text{抵抗モーメント} \quad M = k \sigma A_s d_0$$

$$\left[\begin{array}{l} k \text{ 杭の影響に関する修正係数} \\ A_s \text{ 全幅における鉄筋断面積の合計} \\ \sigma \text{ 鉄筋の降伏強度} \end{array} \right]$$

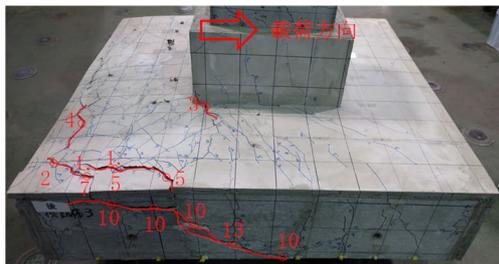
図7 フーチングの曲げ耐力の提案式

平変位の増加とともにほぼ同様に増加することが分かる。最大荷重時以降、継手と母材のひずみの大きさは、位置3においてひび割れの影響により大きく離れ、位置1・2においてほぼ同程度であった。これらの結果より、継手と母材のグリッドがほぼ一体化となりフーチング断面の作用力に抵抗することが考えられる。

以上の分析より、補強前のひび割れの抑制効果や継手・母材のグリッドと既設フーチングの一体化の観点から繊維グリッドによるフーチングの耐震補強の有効性が概ね確認できた。



(a) 補強前(水平変位6yの除荷後)



(b) 補強後(水平変位14yの除荷後)

図 8 補強前後の主要なひび割れの分布とその幅 (単位 mm)

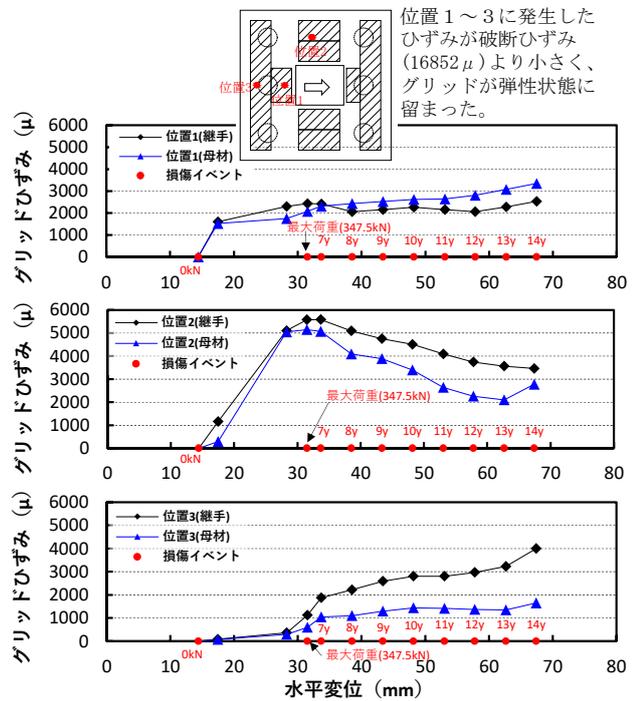


図 9 グリッドひずみと水平変位の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 楊勇
2. 発表標題 炭素繊維グリッドによる橋梁フーチングの曲げ補強の載荷実験
3. 学会等名 第49回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------