

## 既設フーチングに対する補強効果の確認実験

(独)土木研究所 CAESAR 正会員 工修 ○河野 哲也  
 大日本コンサルタント(株)(元(独)土木研究所CAESAR) 豊島 孝之  
 (独)土木研究所 CAESAR 工修 七澤 利明  
 (独)土木研究所 工博 中谷 昌一

Abstract : Some footings for the bridge foundations are damaged by Alkali Silica Reaction(ASR) with fracturing steels. For these footings, we have to perform some maintenance or reinforcement. The generally method for maintenance is prastaring the cracks and connecting steels, and for reinforcement is increase the volume. But, it is not known how much the capacities are reduced by ASR, and increased by these maintenance. And another thing, by under the conditions, for example footings are in the water, they can't be reinforced by increasing volumes. The piers or else structures are reinforced by pasting the carbon fiber sheet or introducing prestressed. The Footings may be reinforce by these methods. But, it is not known that these methods can increase footings capacity. So, we conducted the experiments for the footing models were not damaged by ASR, damaged by ASR, maintenance. And we know that the ASR add critically damage for footing capacity, and the capacity of the footings are increased by maintenance and reinforcement for these methods.

Key words : footings, ASR, load test, maintenance, reinforce

### 1. はじめに

近年、既設フーチングにおいて、アルカリ骨材反応(以下、ASR)による損傷が生じた事例が確認されている。鉄筋破断を伴うような重大な損傷もあり、補修や耐力向上のための補強が必要となっている。しかし、ASRによる損傷を受けたフーチングの剛性や耐力はどの程度低下するのか、補修によりどの程度回復するのかは明らかでない。また、一般的に、フーチングの補強は、増厚や拡幅など、部材体積を増加させることが多いが、例えば河川内や市街地の高架橋等、用地の制約上、部材体積を増加させることが困難な条件にあるフーチングに対しては他の方法による補強が求められる。部材体積を増加させる方法以外の補強法として、橋脚等で実績のある炭素繊維巻き立てや鋼材の導入による補強が想定されるものの、フーチングに対する適用性は検討されておらず、これらの補強により剛性や耐力が回復するかは否かは不明である。そこで、これらについて基本的な知見を得ることを目的とし、損傷や補修・補強の有無をパラメータとして、フーチング模型に対する載荷試験を実施した。

### 2. 供試体および実験概要

実験供試体は、昭和40年～50年に設計された場所打ち杭基礎を想定して作製した。これは、①昭和61年に建設省より通達されたアルカリ総量規制により、昭和61年以降の構造物にはASRが生じる可能性が低いと考えられるため、②当時の杭基礎としては場所打ち杭が多いためである。また、一般的に道路橋のフーチングは、下面鉄筋に比べて上面鉄筋が少ないため、本研究における供試体も相対的に上面鉄筋を少なく配している。

実験ケースは表-1に示す9ケースであり、その内訳は曲げ耐力に比べてせん断耐力が小さいもの(以降、せん断破壊型)とせん断耐力に比べて曲げ耐力が小さいもの(以降、曲げ破壊型)について、損傷していないものと損傷しているもの、損傷しているものに対して補修したもの、補修したものに

対してさらに補強したものとなっている。ここで、補修は、曲げ破壊型・せん断破壊型とも破断した鉄筋に対する重ね継手による継筋及びひび割れ充填を行うものである。また、曲げ破壊型に対する補強方法として、炭素繊維シートの貼り付け(Case AA3)、水平方向へのプレストレスの導入 (Case AA4)の2種類、せん断破壊型に対する補強方法として、鉛直方向へのプレストレスの導入 (Case AB3)を採用した。

実験供試体の概要を図-1 に示す。供試体はいずれも基礎(2×2 の杭)とフーチング、柱からなる。9 体の供試体の諸元は同じであり、フーチングは平面寸法 2500 mm×1600 mm、高さ 650 mm であり、実橋の 1 / 3 程度を想定したものである。なお、実験供試体の損傷は、反応性骨材を用いて ASR を実際に発生させたものではなく、鉄筋破断を伴うようなレベルの損傷を模擬したものである。具体的には、膨張材によりコンクリートにひび割れを発生させるとともに、隅角部(図-1 の丸囲み部)の鉄筋の折り曲げ部を予め切断した。鉄筋破断の位置は、実橋の損傷事例を踏まえて決定した。また、膨張材の量は、投入量を何通りかに変化させたコンクリートを用いた小規模な供試体を作成し、小規模供試体に生じたひび割れの性状や超音波試験による内部の劣化状況を、実橋の損傷事例と比較して定めた。

表-1 実験ケース一覧

| ケース    | 損傷  | 補修 | 補強       |
|--------|-----|----|----------|
| 曲げ破壊型  | CA1 | 無し | 無し       |
|        | AA1 | 有り | 無し       |
|        | AA2 | 有り | 有り       |
|        | AA3 | 有り | 有り       |
| AA4    | 有り  | 有り | 水平プレストレス |
| せん断破壊型 | CB1 | 無し | 無し       |
|        | AB1 | 有り | 無し       |
|        | AB2 | 有り | 有り       |
|        | AB3 | 有り | 有り       |

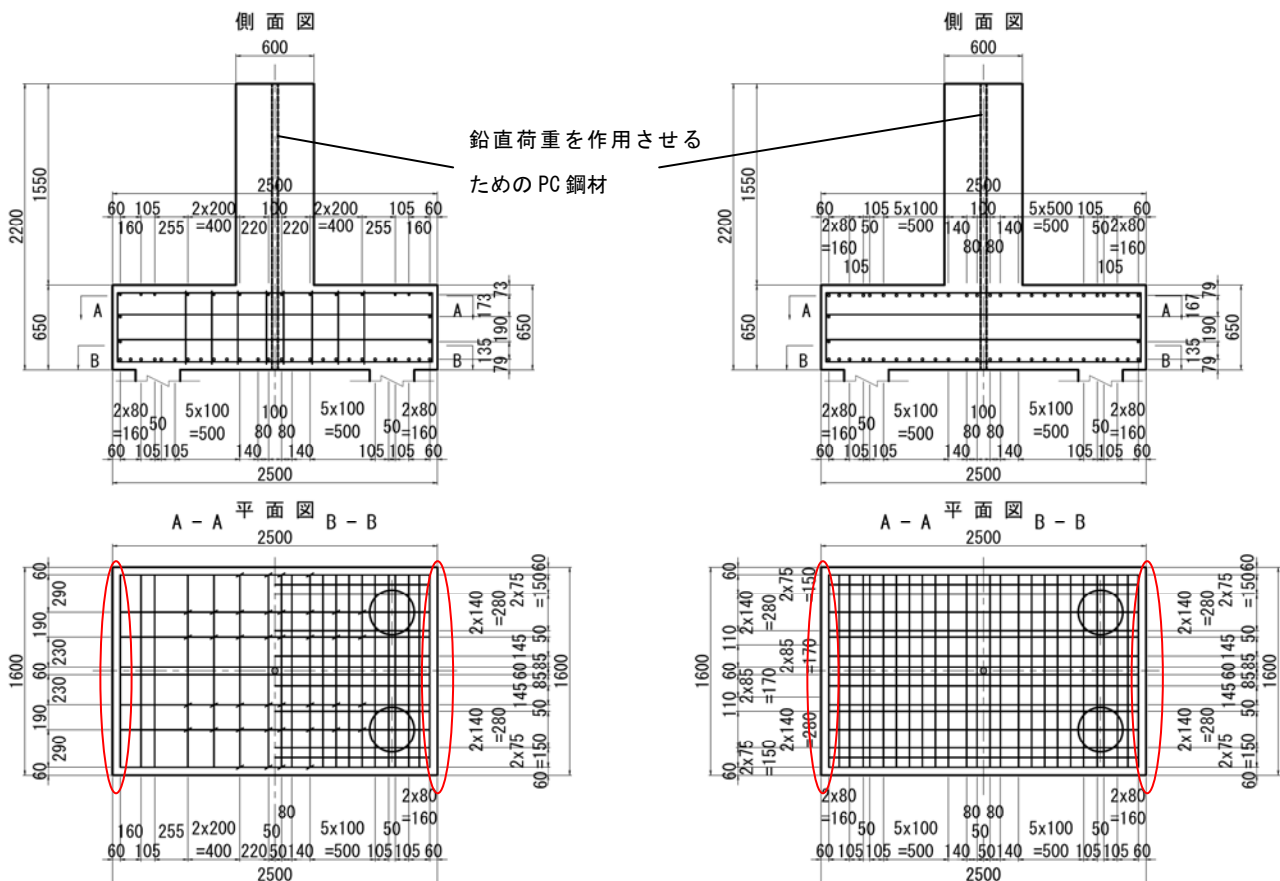


図-1 供試体概要図(左：曲げ試験用, 右：せん断試験用, 丸で囲まれた部分：鉄筋破断を模擬)

写真-1, 図-2 に載荷試験の概要を示す。供試体に上部構造および下部構造躯体分の死荷重(600kN) を作用させた状態で柱部に単調水平荷重を作用させた。鉛直荷重は供試体中央に PC 鋼材を埋め込み、これに引張荷重を与えることで作用させた。水平荷重はジャッキにより作用させ、その作用位置は、無

補修・無補強のケースでそれぞれ曲げないしせん断破壊が生じるように設定し、全ての供試体でフーチング上面から 1m 上の位置とした。なお、杭先端はボルトで床に固定した。また、補修・補強を行うケースの載荷実験では、補修・補強により生じたひずみを保持したまま載荷した。したがって、本文に示す結果は補修・補強により生じたひずみも踏まえた結果である。

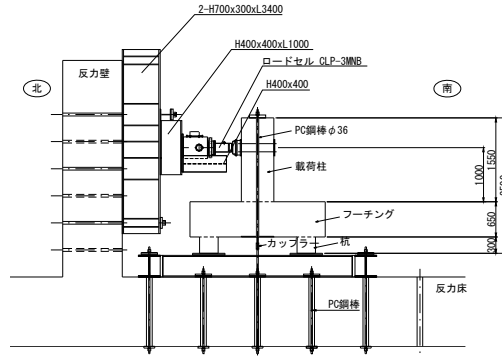


図-2 フーチングの載荷試験概要

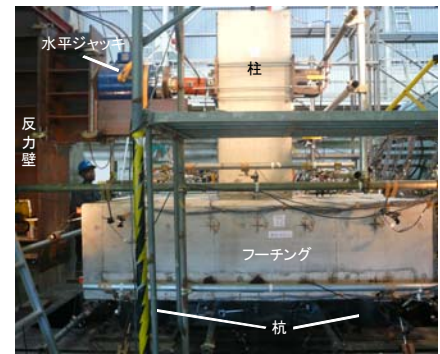


写真-1 載荷試験の状況

### 3 補修・補強の実施

実橋における補修・補強は、上部構造及び下部構造躯体重量が作用している状況下で実施されるため、死荷重の影響によってひび割れ充填剤の充填率やプレストレスの導入量が低下し、得られる効果が低減する可能性がある。そこで、本研究では、供試体に前述の死荷重(600 kN)を作用させた状況下で補修・補強した。

#### 3. 1 補修の概要

構造物の補修のためのひび割れ充填剤としてはいくつか開発されているが、本研究ではセメント系のものを用いた。これは、充填剤の中でもセメント系の充填剤が湿潤状態にある環境での付着性に優れているとされているためである。本実験では、これをフーチング側面から注入した。注入完了の判定は目視および注入量管理により実施し、充填剤が注入孔からあふれる、もしくは注入量が増加しなくなる時点を注入完了とした。注入完了後にフーチングからコアを採取して目視で確認したところ、かぶり部分程度までは充填剤が注入されていることが確認できたが、コアコンクリートには、充填剤が十分に注入されていないことが確認された。これは、ひび割れ幅が小さいために、十分に充填出来なかったものと考えられる。本実験ではかぶりコンクリート部分程度が充填されたものと想定して、実験を継続した。

充填剤注入後、表面コンクリートをはつり、破断した鉄筋を重ね継手により継筋した後、モルタルを打設した。コンクリート打設後に内部のひずみを計測した結果、補修によって鉄筋に生じた引張ひずみは最大で  $100\mu$  程度であり、補修における一連の施工により、内部の応力・ひずみ状況に大きな変化が生じていないことを確認した。

#### 3. 2 補強の概要

本研究で採用した方法によるフーチングの補強の概要を、図-3 に示す。本研究においては、補強したフーチングが柱に先行して破壊しない程度の補強を行うこととした。

##### (1) 炭素繊維シートの貼り付け

フーチング上面に炭素繊維シートを貼り付け、フーチングに作用する曲げ荷重に対して鉄筋、コンクリートと一体となって抵抗することで、フーチングの曲げ耐力を向上させる方法である。載荷実験に使用した繊維シートの試験値は、引張強度 $\sigma_{tu}=4665 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数 $E=2.63 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、破断ひずみ $\varepsilon_{tu}=1.74\%$  (3 枚の平均値) であった。載荷実験は一方向であるため、繊維方向が載荷方向に

一致するように1枚のシートを柱の下から300mmの位置からフーチング天端・側面のフーチング下端まで接着剤で貼り付けた。なお、目付量は $200\text{g/m}^2$  設計厚さは $0.111\text{mm}$ である。

(2) 水平プレストレス導入

フーチングの载荷方向に貫通する掘削孔を設け、そこにプレストレス鋼材を設置してプレストレスを導入する方法である。プレストレスを導入することでコンクリートに初期から圧縮力が作用し、フーチング内部に発生する引張応力度が減少することにより、フーチングの曲げ耐力の向上を期待する方法である。また、設計では考慮しないが、導入する鋼材が補強筋として抵抗することも考えられる。

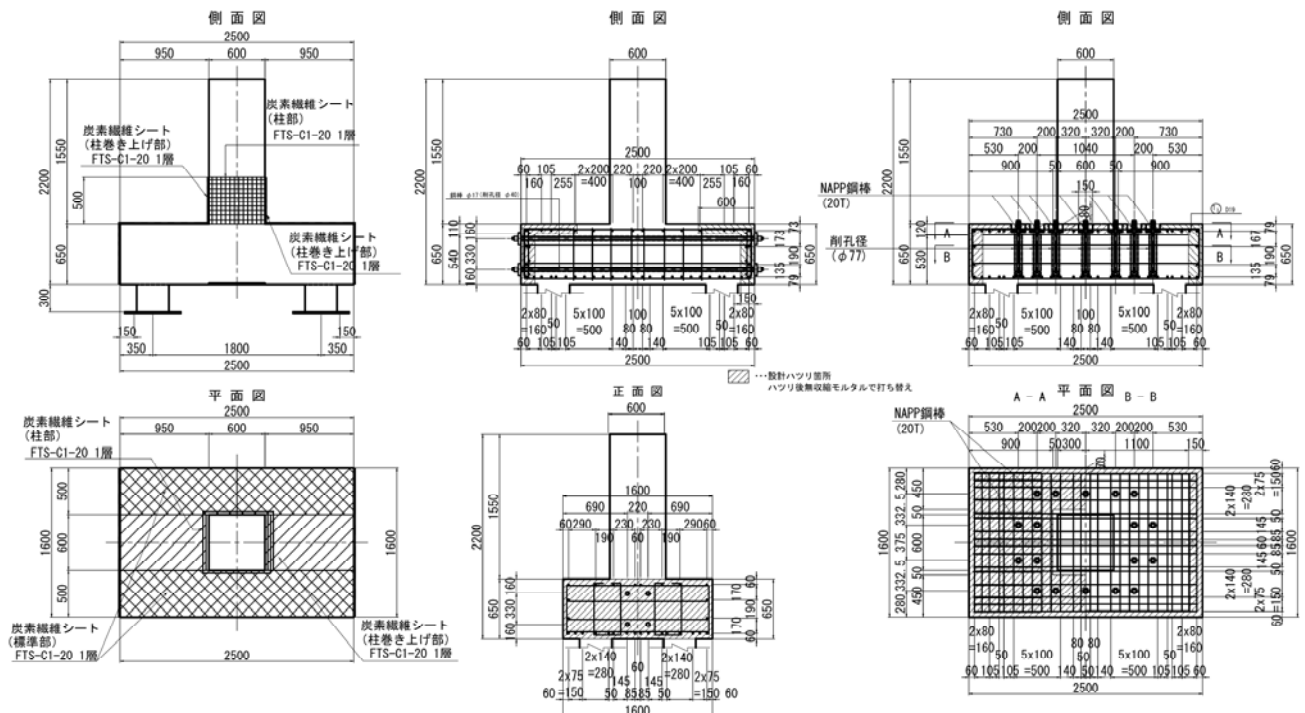
鋼材の配置にあたってはフーチングを削孔する必要があるが、杭周辺には杭頭鉄筋が多数配筋されているために、削孔により杭頭鉄筋を傷つける可能性や、杭頭結合部の剛結度を変化させる可能性がある。そのため、実橋において杭周辺に水平プレストレスを導入することは困難であると判断し、本実験では杭周辺ではなく杭間に配置することとし、フーチング上下縁から160mmの位置、フーチング軸方向鉄筋中心から100mmの位置に、1本あたり100kNのプレストレスを有するPC鋼材を合計4本配置した。

(3) 鉛直プレストレス導入

フーチング下面主鉄筋の上側でPC鋼材等の先端を内部定着させ、鉛直方向にプレストレスを導入する方法である。本方法によるフーチングの性能向上のメカニズムは、水平プレストレスと同じである。

水平プレストレスとは異なり、鉛直方向にプレストレスを導入する際には貫通孔を設け、両端を表面で固定することが難しい。すなわち、実橋のフーチングにおいて、フーチング下面を露わにして下面フーチング表面に鋼材の定着を取るとはほぼ不可能である。そこで、本実験では、鋼材先端をフーチング内部に定着してプレストレスを発揮すると考えられる方法を用いた。

本実験では、1本あたり100kNの導入プレストレスを有する鉛直PC鋼材を18本配置した。



(a) 炭素繊維シート貼り付け

(b) 水平プレストレス導入

(c) 鉛直プレストレス導入

図-3 補強概要図



#### 4. 実験結果

図-4(a)に曲げ破壊型、(b)にせん断破壊型の供試体に対して実施した荷重試験の結果得られた荷重—変位曲線と荷重試験で確認されたイベント点をあわせて示す。

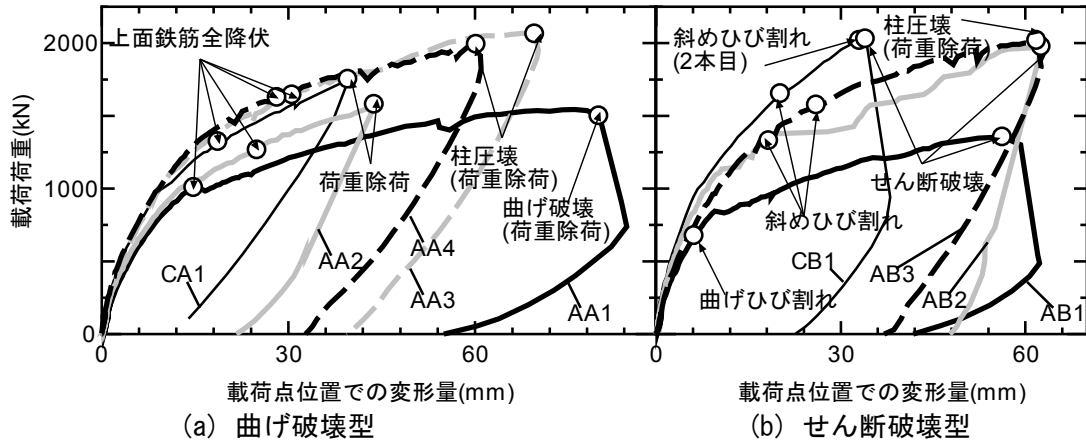


図-4 荷重—変位曲線

##### 4. 1 曲げ破壊型

ASRによる損傷を模擬していない Case CA1 は、荷重が約 1300 kN に達した段階でフーチング上面鉄筋が降伏した。その後も剛性が大きく低下することなく荷重は増加し続け、約 1750 kN で荷重治具の限界により試験を中止した。

ASRによる損傷を模擬した Case AA1 は、Case CA1 よりもおよそ 300 kN 小さい約 1000 kN で全ての上面鉄筋が降伏した。その後も荷重は緩やかに増加したものの、その剛性はひび割れ発生前に比べて極めて小さく、ひび割れ発生前後で剛性にほとんど違いが生じなかった Case CA1 とは異なる結果となった。そして、最終的に約 1500 kN で破壊した。Case CA1 では、1500 kN では大きなイベントが確認されておらず、1750 kN においても破壊しなかったことから、ASRによる損傷を模擬した結果、耐力が低下したものと考えられる。以上から、隅角部の鉄筋破断やコンクリートのひび割れにより、フーチングの剛性および耐力が低下することが確認された。

補修を行った Case AA2 は、Case CA1 よりも初期の剛性がやや落ちるものの、上面鉄筋の降伏荷重は Case CA1 とほぼ同程度であった。最終的には試験装置の限界により破壊に至ることは無かったが、Case AA1 が破壊した荷重においても Case AA2 は破壊することは無かった。以上から、補修したケースは損傷の無い場合に比べて ASRによる損傷で低下した性能が一部回復したことが分かる。

次に、補強したケースの実験について述べる。炭素繊維シートの貼り付けによる補強を行った Case AA3 の荷重変位曲線は、損傷を模擬していない供試体と同等の初期剛性を有しており、また、上面鉄筋が降伏した後も剛性が大きく低下することなく、健全な供試体とほぼ同一の荷重—変位関係を示している。加えて、全ての上面鉄筋が降伏する荷重を見てみると、炭素繊維シートの貼り付けにより補強したケースは約 1640 kN であり、損傷を模擬していない Case CA1 の 1300 kN よりも大きい。これは、炭素繊維シートを貼り付けたことにより鉄筋が負担する荷重が軽減したためであると考えられる。最終的に、当初の想定通り、柱部材基部の圧壊により、荷重が低下した。

水平プレストレス導入により補強した Case AA4 についても、Case CA1 および Case AA3 とほぼ同じ剛性を有しており、全ての上面鉄筋が降伏した後の剛性低下もほとんど見られない。また、全ての上面鉄筋が降伏に至ったのは約 1650 kN であり、損傷を模擬していない Case CA1 の 1300 kN よりも大きかった。最終的に、当初の想定通り、柱部材基部の圧壊により、荷重が低下した。

以上から、炭素繊維シートの貼り付けによる補強および水平プレストレス導入による補強は、フーチングの曲げ剛性および耐力の向上に寄与すると考えられる。

#### 4. 2 せん断破壊型

ASRの損傷を模擬していないCase CB1は、荷重が約1600kNでフーチング側面に斜めひび割れが発生した後も剛性が大きく低下することなく荷重は増加し続け、約2000kNでフーチング側面に2本目の斜めひび割れが発生したと同時にフーチングがせん断破壊し、荷重が低下した。

ASRの損傷を模擬したCase AB1は、Case CB1の約半分程度の約850kNでフーチング側面に斜めひび割れが発生した。その後も荷重は緩やかに増加したものの、その剛性はひび割れ発生前に比べて極めて小さく、ひび割れ発生前後で剛性にほとんど違いが生じなかったCase CB1とは異なる結果となった。最終的に約1300kNでフーチングのせん断破壊により荷重が低下した。

補修を行ったCase AB2はASRの損傷を模擬していないCase CB1よりもおよそ300kN小さい約1300kNの荷重でフーチング側面に斜めひび割れが発生したものの、その後も荷重は緩やかに増加し続け、約2000kNでフーチングがせん断破壊し、損傷を模擬していないCase CB1と同程度の耐力を有することが確認された。以上から、補修を行うことによって、損傷を模擬していない状態と同程度の耐力が発揮されることが確認された。ただし、補修を行ったとしても、損傷を模擬していない状態に比べて剛性は小さくなる結果となった。

鉛直プレストレス導入による補強を行ったCase AB3では、荷重が約1550kNでフーチング側面に斜めひび割れが発生した。一般に、プレストレスが導入されるとフーチングに圧縮力が作用するため、ひび割れの発生にはより大きな荷重が必要となる。Case AB3の斜めひび割れ発生荷重は、Case AB1やAB2よりも大きかったことから、プレストレス導入の効果がある程度認められたと思われる。ただし、損傷を模擬していないCase CB1とはひび割れ発生荷重に大きな違いが無かった。この理由としてはひび割れ充填剤で充填出来なかった内部コンクリートのひび割れの影響等が考えられる。フーチング側面に斜めひび割れが発生した後、フーチングのひび割れに顕著な発展は認められなかった。そして、荷重が約2020kNに達した際に、当初の想定通り、柱基部の圧壊により荷重が低下した。この荷重レベルはASRの損傷を模擬していないCase CB1でせん断破壊が生じた荷重レベルと同程度である。Case CB1はフーチングの損傷が、Case AB3が柱の損傷が先行した理由は、前述の通り、Case AB3は、PC鋼材を導入したことによりフーチングの耐力が増加したために斜めひび割れ発生後のフーチングの損傷が進展しなかった一方、柱基部周辺のコンクリートのひび割れ等の影響により、柱基部の耐力が相対的に低くなったためと考えられる。以上から、鉛直プレストレス導入による補強は、フーチングのせん断耐力向上に寄与することが分かった。

#### 5. まとめ

既設のフーチングの性能評価および補強方法に関する知見を得ることを目的に、ASRによる損傷の有無や補修・補強の有無および方法をパラメータとして載荷実験を行った。本実験で得られた主な知見は以下の通りである。

- ASRによる損傷を模擬した供試体に対して載荷試験を行った結果、曲げ耐力、せん断耐力ともに、大きく低下することが明らかになった。また、曲げ破壊型・せん断破壊型ともに、剛性も低下し、特に上面鉄筋の降伏・斜めひび割れの発生後の剛性の低下が顕著であった。
- 継筋やひび割れ注入による補修を行った供試体に対する載荷試験の結果、ASRによる損傷により低下した耐力・剛性がある程度回復することを確認した。補修に加えて炭素繊維シートの貼付けやプレストレス鋼材の導入による補強を行うと、耐力・剛性はさらに向上する結果となった。