

あと施工した耐震補強部への 軸力伝達性状に関する解析的検討

植村 佳大¹・高橋 良和²

¹正会員 工博 京都大学助教 工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

²正会員 工博 京都大学教授 工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚の耐震補強法の一つであるRC巻立て補強は、他の補強法と比較して経済的で確実な方法として知られ、これまでに数多くの既設橋脚に用いられている。また、中空断面を有するRC橋脚 (中空断面RC橋脚) に対しては、中空断面部にコンクリートを充填することが補強法の一つとして挙げられる(コンクリート充填補強)。このような RC巻立て補強やコンクリート充填補強などの、あと施工による橋脚の耐震補強法に関しては、その補強効果についての検討の他、あと施工鉄筋と既設フーチングとの定着性状や、既設橋脚部とあと施工部との継ぎ目の付着性状などの影響についての検討がこれまでになされている^{1),2)}。

一方で、橋脚の耐震補強は死荷重支持下で行われるため、あと施工部には死荷重による鉛直軸力が伝達されないと考えられる。しかし、既設部とあと施工部との軸力伝達性状の差異の影響については、これまでに検討がなされていない。そこで本研究では、RC巻立て補強やコンクリート充填補強を対象に、あと施工部への軸力伝達性状について解析的検討を行い、その影響について明らかにした。

2. あと施工部への軸力伝達性状に関する検討の概要

(1) 検討対象について

本研究では、軸力作用下でコンクリート充填補強を施した中空断面RC橋脚と、軸力作用下でRC巻立て補強を施した中実断面RC橋脚を対象として、あ

と施工部への軸力伝達性状に関する解析的検討を行う。検討対象は、コンクリート充填補強を施した中空断面RC橋脚に関しては、高原ら³⁾の検討で用いられた実験供試体No.5を採用し、RC巻立て補強を施した中実断面RC橋脚に関しては、幸左ら⁴⁾の検討で用いられた実験供試体No.8を採用する。

なお、コンクリート充填補強およびRC巻立て補強におけるあと施工部の断面積が、軸力伝達性状に与える影響を考慮するため、上述の対象橋脚に加えて、既設部の断面積を減少させ、あと施工部の断面積を増大させた場合についても検討を行う。その際、既設部の軸方向鉄筋比は、上述の対象橋脚と同様となるよう設定する。

また、RC巻立て補強は、地震によって損傷した橋脚の補修工法として用いられることも多い。地震被害により橋脚基部が損傷している場合、無損傷の場合と比較して、あと施工したRC巻立て部への軸力伝達性状が変化する可能性も考えられる。そのため、RC巻立て補強に関しては、無損傷の中実断面RC橋脚を対象とした検討に加え、地震被害により橋脚基部が損傷している場合を想定した検討も併せて実施することとする。

(2) 解析モデルについて

本検討では、ファイバーモデルを用いた数値解析を行う。その際、実際の耐震補強が上部構の死荷重支持下で行われることを考え、既設部のみのモデルに死荷重相当の軸力を作用させた後、そのモデルにあと施工部を取り付けて正負交番載荷解析を実施した。具体的には、図-1に示すように、軸力による初期圧縮応力が発生している既設部の各断面に対し、あと施工部の断面にあたるファイバーを追加するこ

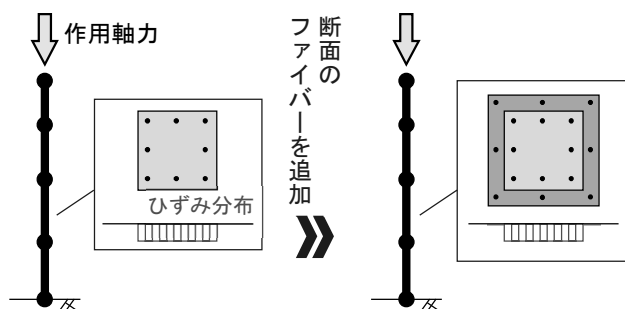


図-1 解析モデルにおけるあと施工部の取り付け

とで、軸力作用下における耐震補強を再現する。

なお本検討では、既設部とあと施工部間での完全付着を仮定する。また比較として、あと施工を考慮せず、全断面に軸力を作用させた場合の数値解析を併せて実施する。

3. コンクリート充填補強を施した中空断面RC橋脚に対する検討

(1) 解析モデルおよび解析条件について

各解析モデルの全体図および断面図を図-2に示す。本解析モデルでは、コンクリートの材料モデルにはHognestadモデルを、鉄筋の材料モデルには完全弾塑性型のMenegotto-Pintoモデルを採用した。また、作用軸力は1755kNとし、各材料諸元および載荷パターンは高原ら³⁾による検討を参考としている。

(2) 検討結果

図-3を見ると、あと施工を考慮して軸力作用後にコンクリート充填部を取り付けた場合と、あと施工を考慮せず、全断面に軸力を作用させた場合で、得られる荷重-変位関係に大きな差は確認できないことがわかる。これは、あと施工部の断面積を増大させた場合でも同様である。

ここで、コンクリート充填部に作用する軸力と柱変位の関係を図-4に示す。図-4より、柱の降伏変位である変位振幅23mm以降の領域では、コンクリート充填部への軸力の伝達性状に大きな差異はないものの、それまでの変形領域では、コンクリート充填部に作用する軸力に、一部1.5倍程度の差異が確認できる。しかしながら、この差異が柱の荷重-変位関係に影響を与えることはなかったのは、先述の通りである。これは、既設部である断面外縁部のRC断面の寄与分が柱の荷重に支配的であるため、あと施工したことによりコンクリート充填部に軸力が伝達されなかったとしても、柱の荷重に大きな変化

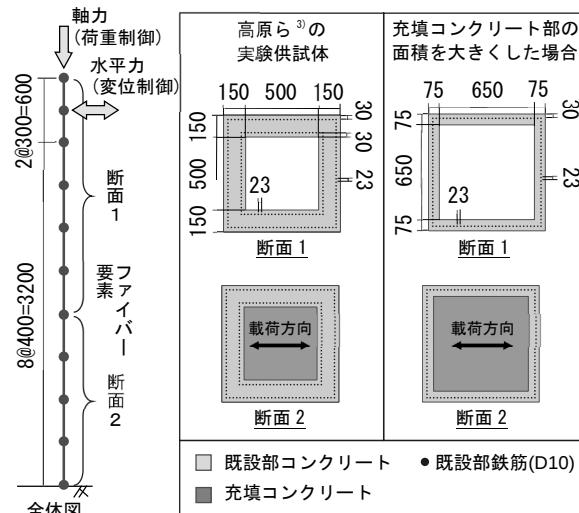
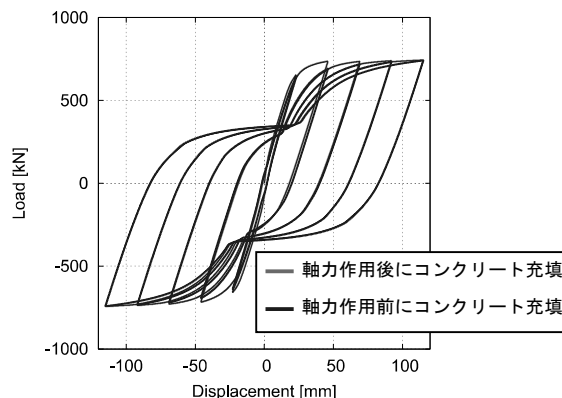
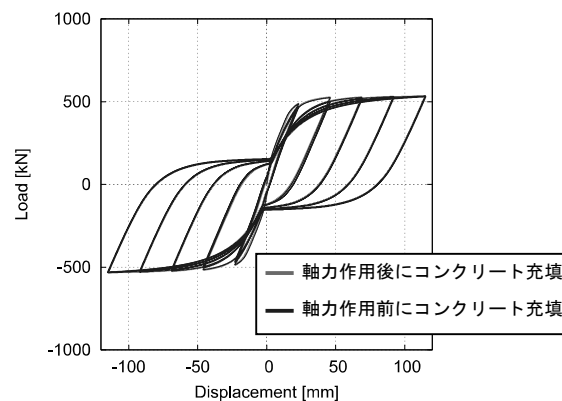


図-2 コンクリート充填補強を施した中空断面 RC 橋脚の解析モデル (Unit[mm])



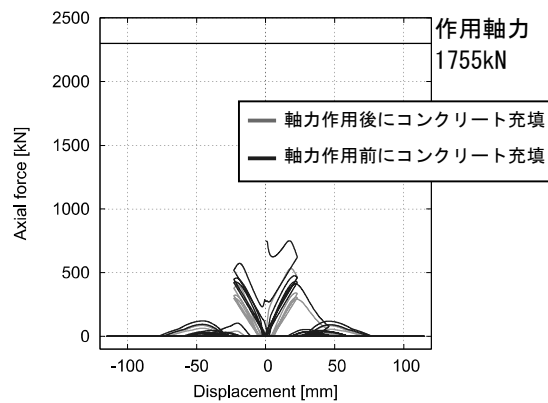
(a) 高原ら³⁾の実験供試体



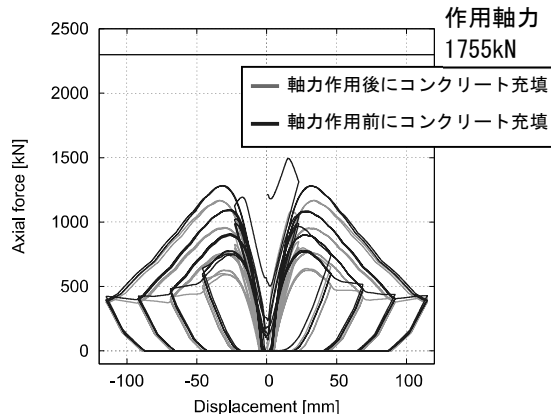
(b) 充填コンクリート部の面積を大きくした場合

図-3 コンクリート充填補強を施した中空断面 RC 橋脚の荷重-変位関係

が生じなかったためであると考えられる。以上から、コンクリート充填補強を施した中空断面RC橋脚では、あと施工によりコンクリート充填部に軸力が伝達されなかったとしても、柱全体の荷重-変位関係には大きな影響は発生しないことがわかった。



(a) 高原ら³⁾の実験供試体



(b) 充填コンクリート部の面積を大きくした場合

図-4 充填コンクリート部の負担軸力と柱変位の関係 (圧縮が正)

4. RC巻立て補強を施した中実断面RC橋脚に対する検討(既設部が無損傷の場合)

(1) 解析モデルおよび解析条件について

各解析モデルの全体図および断面図を図-5に示す。本解析モデルでは、3.での検討と同様に、コンクリートの材料モデルにはHognestadモデルを、鉄筋の材料モデルにはMenegotto-Pintoモデルを採用した。各材料の主な物性値を表-4に示す。また、作用軸力は563.5kNとし、各材料諸元および载荷パターンは幸左ら⁴⁾による実験的検討を参考としている。

(2) 検討結果

図-6を見ると、あと施工を考慮して軸力作用後にRC巻立て部を取り付けた場合と、あと施工を考慮せず、全断面に軸力を作用させた場合で、得られる荷重-変位関係に大きな差は確認できないことがわかる。これは、あと施工部の断面積を増大させた場合でも同様である。

ここで、巻立てコンクリート部に作用する軸力と柱変位の関係を図-7に示す。幸左ら³⁾による実験供

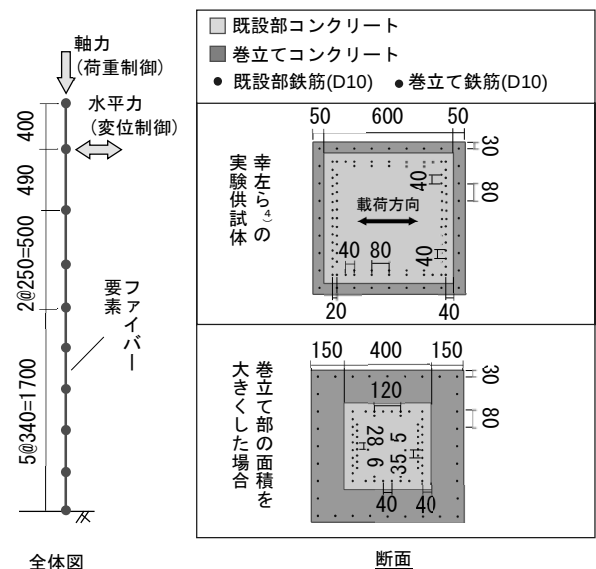
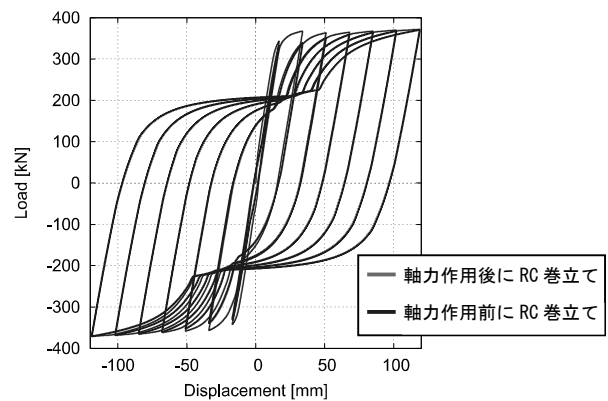
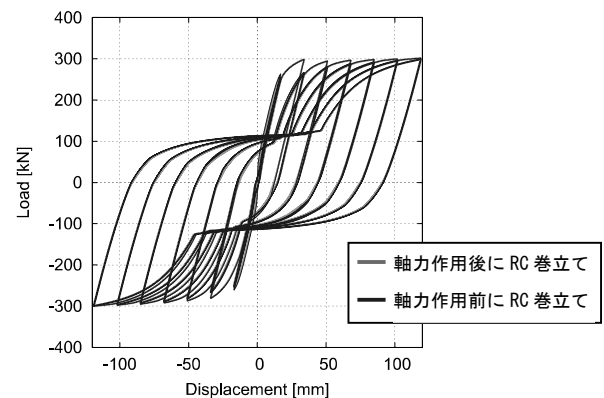


図-5 RC巻立て補強を施した中実断面 RC 橋脚の解析モデル (Unit[mm])



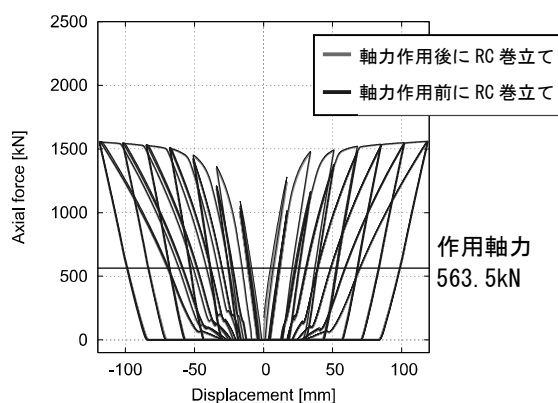
(a) 幸左ら⁴⁾の実験供試体



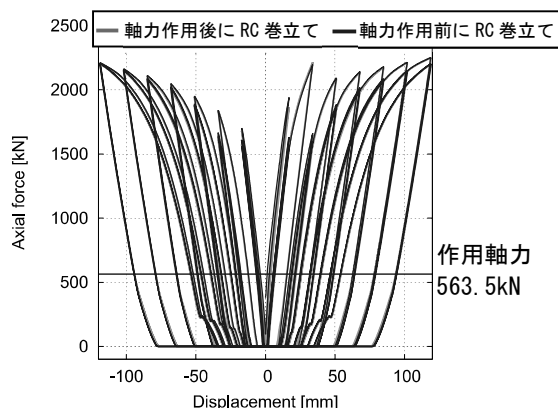
(b) 巻立て部の面積を大きくした場合

図-6 RC巻立て補強を施した中実断面 RC 橋脚の荷重-変位関係

試体のような、一般的なRC巻立て厚を有する場合には、橋脚の全断面に占めるRC巻立て部の面積が小さいため、全断面に軸力を作用させたとしても、その軸力の大部分は既設部のRC断面が負担していると考えられる。事実、図-7(a)を見ると、柱変



(a) 幸左ら⁴⁾の実験供試体



(b) 巻立て部の面積を大きくした場合

図-7 巻立てコンクリート部の負担軸力と柱変位の関係 (圧縮が正)

位0mmの段階で、あと施工を考慮して軸力作用後にRC巻立て部を取り付けた場合と、全断面に軸力を作用させた場合で、RC巻立て部のコンクリートが負担する軸力に大きな差異は見られないことがわかる。

一方、RC巻立て部の面積を増大させたケースでは、柱変位0mmの段階で、両ケース間でRC巻立て部のコンクリートの負担軸力に差異が見られる。しかしながら、柱変位が生じると、この差異は消失していき、両ケースとも同様の軸力伝達性状を示している。これは、RC巻立て部の面積を増大した場合、RC巻立て厚が大きくなることで、断面のひずみの中立軸がRC巻立て部に位置することとなり、RC巻立て部に軸力が伝達しやすくなるためであると考えられる。

以上から、RC巻立て補強を施した中実断面RC橋脚では、既設部が無損傷の場合において、あと施工を考慮して軸力作用後にRC巻立て部を取り付けた場合と、全断面に軸力を作用させた場合で、RC巻立て部のコンクリートが負担する軸力に大きな差異は見られないことがわかった。

5. 地震により損傷した橋脚にRC巻立て補強を施す場合の軸力伝達性状について

(1) 損傷した橋脚に対するRC巻立てについて

一般的に、地震により損傷した橋脚をRC巻立てにより補修するのは、柱の損傷が軽微である場合に限られ、そうでない場合は、RC橋脚が再構築されるか、損傷鉄筋の取り替え及び損傷コンクリート部の除去後にコンクリートが再打設される。しかし、現場条件によっては、損傷鉄筋の取り替えが困難な場合も想定される。そのため、過去の研究において、危険側の状況を想定し、損傷鉄筋をそのまま再利用してRC巻立てによる補修を行った場合の影響が検証されている⁴⁾⁵⁾。特に、仁平ら⁵⁾は、軸方向鉄筋が座屈したRC柱に対して補修を行う場合を対象としており、補修後のRC柱の復元力特性やエネルギー吸収性能等について検討している。

ここで、筆者らが過去に行ったRC柱に対する正負交番荷重実験結果⁶⁾を図-8に示す。この実験では、RC柱は紡錘型の履歴を示す典型的な曲げ挙動を示し、軸方向鉄筋の座屈を機に荷重低下が発生している(図-8(a))。そして、軸方向鉄筋の座屈発生後、柱基部の損傷が進行し、図-8(b)に示すような柱基部における軸沈下が発生している。ここで、柱基部で軸沈下が発生している橋脚、すなわち基部の軸剛性が低下している橋脚に対し、損傷鉄筋をそのまま再利用してRC巻立てによる補修を行った場合、4.で示した無損傷の橋脚にRC巻立てを行う場合と比較して、RC巻立て部への軸力伝達性状、及びそれが柱の荷重-変位関係に与える影響が異なる可能性が考えられる。

しかし、過去の研究において、損傷したRC柱に対するRC巻立てについての検討を、軸力作用下で実施している検討は見当たらない。そこで本検討では、基部の軸剛性が低下したRC柱に対して、軸力作用下でRC巻立てを行った際の影響についての検討を行う。

(2) 解析モデルおよび解析条件について

本検討では、4.での検討で用いた解析モデルに対して、既設部の1D区間における要素の軸剛性を低下させた解析モデルを用いて検討を行う。その際、既設部の1D区間における要素の軸剛性は、以下のように設定した。まず、図-8に示した筆者らによる過去の実験的検討⁶⁾において、柱高さの約1/300 (4.4mm)の軸沈下が発生した状況を想定し、その軸沈下が実験供試体の1D区間にて発生したと仮定したときの基

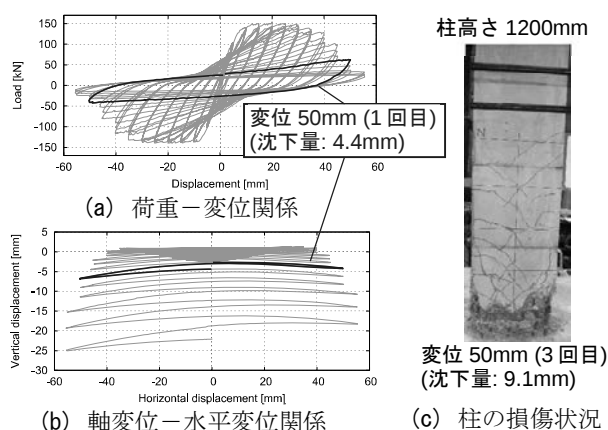


図-8 筆者らが過去に行った RC 柱の正負交番荷重実験⁶⁾

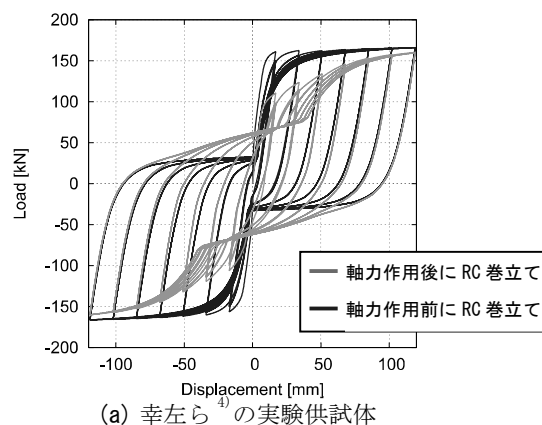
部の軸剛性低下率を算出する．そして，算出された軸剛性低下率と，解析モデルにおける既設部の1D区間の軸剛性低下率が等しくなるよう，要素の断面におけるコンクリートおよび鉄筋のヤング率を低下させた．なお，既設部の1D区間における要素の軸剛性以外は，4.での検討と同様の解析条件を採用した．

(2) 検討結果

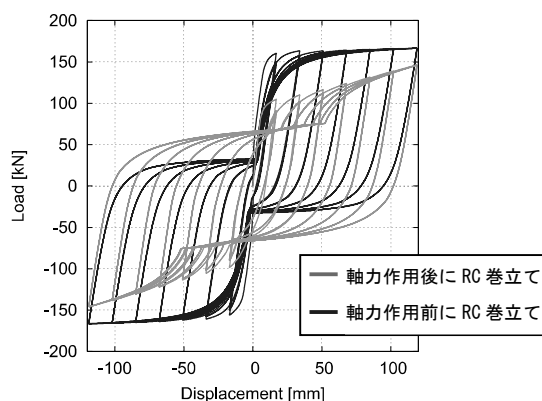
図-9を見ると，柱基部の軸剛性が低下している場合，RC巻立て部を取り付けた後に，全断面に軸力を作用させた場合では，通常のRC柱に類似した荷重－変位関係を示すのに対し，あと施工を考慮して軸力作用後にRC巻立て部を取り付けた場合では，RC柱の荷重－変位関係に降伏後の二次剛性が発現していることがわかる．

ここで，巻立てコンクリート部に作用する軸力と柱変位の関係を見ると(図-10)，あと施工を考慮して軸力作用後にRC巻立て部を取り付けた場合，柱変位の増大に伴い，巻立てコンクリート部に作用する軸力が徐々に増加していることがわかる．これは，RC巻立て部の取り付け前に既設部のみに作用していた軸力が，柱変位の増大に伴って，RC巻立て部に伝達しているためであると考えられる．一般的に，RC部材では，作用する圧縮軸力が増加すると，部材の断面曲げ耐力が増加することが知られている．そのため，図-9で確認されたRC柱の降伏後の二次剛性は，柱変位の増大に伴って，RC巻立て部に軸力が伝達することで，RC巻立て部の断面曲げ耐力が増加したことによるものであると考えられる．

また，RC巻立て部の巻立て厚が大きいケースでは，柱変位に伴うRC巻立て部への軸力伝達が鈍く



(a) 幸左ら⁴⁾の実験供試体

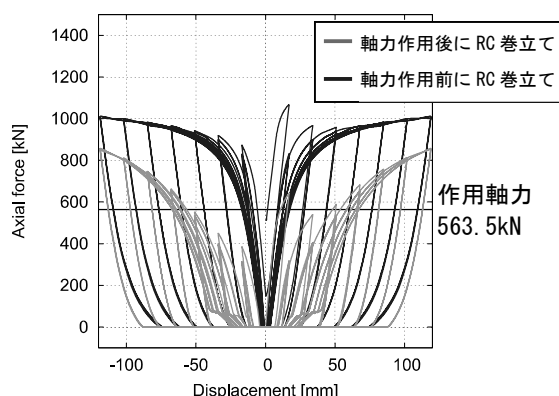


(b) 巻立て部の面積を大きくした場合

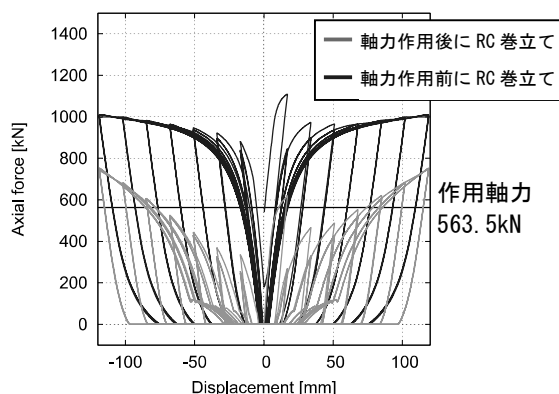
図-9 軸剛性が低下した橋脚に RC 巻立て補強を施した際の RC 橋脚の荷重－変位関係

なり，荷重－変位関係に生じる降伏後の二次剛性が緩やかになっていることが確認できる．これは，作用軸力を変化させずに既設部の断面積を小さくしたことで，既設部断面における作用軸応力が増加し，RC巻立て部取り付け前の既設部の軸沈下量が増大したことが要因であると考えられる．そして，4.での無損傷の橋脚を対象とした検討において，5.での検討のような結果が得られなかったのも，既設部の軸剛性が低下していないことで，軸力作用時に既設部に顕著な軸沈下が発生しなかったことが要因であるといえる．

以上から，地震被害により，柱基部の軸剛性が低下し，軸沈下が発生している橋脚に対してRC巻立て補強を行う場合は，あと施工するRC巻立て部への軸力伝達性状が，RC柱の荷重－変位関係に影響を与える可能性が示唆された．しかしながら，本検討では，柱の軸剛性低下率を簡易的な方法で決定したため，柱の軸沈下量と軸剛性低下率およびRC巻立て部への軸力伝達性状との関係等について，今後より詳細な検討が必要であるといえる．



(a) 幸左ら⁴⁾の実験供試体



(b) 巻立て部の面積を大きくした場合

図-10 軸剛性が低下した橋脚に RC 巻立て補強を施した際の巻立てコンクリート部の負担軸力と柱変位の関係 (圧縮が正)

6. まとめ

本研究では、RC巻立て補強やコンクリート充填補強を対象に、あと施工部への軸力伝達性状の影響を解析的に検討した。また、RC巻立て補強に関しては、地震被害により橋脚基部が損傷している橋脚を対象とした検討を併せて実施した。本研究での解析的検討の範囲において得られた結果を、以下に示す。

- コンクリート充填補強に関する検討にて、軸力作用後にコンクリートを充填する場合と、軸力作用前にコンクリートを充填する場合では、充填部への軸力伝達性状の差異が、柱の降伏変位までの変形領域でしか発生せず、柱全体の荷重－変位関係には大きな影響は与えなかった。
- RC巻立て補強に関する検討にて、既設部が無損傷な場合は、軸力作用後にRC巻立てを施す場合と、軸力作用前にRC巻立てを施す場合で、RC巻立て部のコンクリートが負担する軸力に

大きな差異は見られないことがわかった。

- 地震により柱基部の軸剛性が低下し、軸沈下が発生している橋脚に対してRC巻立て補強を行う場合を想定した解析において、軸力作用後にRC巻立てを施す場合では、既設部に作用していた軸力が、柱変位増大に伴って徐々にRC巻立て部に伝達することで、柱の荷重－変位関係に降伏後の二次剛性が発現する結果が得られた。
- 上記の結果から、地震により、軸沈下が発生している橋脚に対してRC巻立て補強を行う場合は、あと施工するRC巻立て部への軸力伝達性状が、RC柱の荷重－変位関係に影響を与える可能性が示唆された。しかし本検討では、柱の軸剛性低下率を簡易的な方法で決定したため、柱の軸沈下量と軸剛性低下率およびRC巻立て部への軸力伝達性状との関係等について、今後より詳細な検討が必要であるといえる。

謝辞：本研究の一部は、2020年度京都大学と西日本高速道路株式会社における共同研究の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 塩畑英俊，野島昭二，前田晴人，林和彦：鉄筋コンクリート巻立て補強工法における軸方向鉄筋のフーチングへのアンカー定着に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1003-1008，2011。
- 2) Eduardo N.B.S.J and Fernando A.B.B.: Reinforced Concrete Jacketing - Interface Influence on Cyclic Loading Response, ACI Structural Journal, Vol.105, No.4, pp.471- 477, 2008.
- 3) 高原良太，青木圭一：RC中空断面橋脚の耐震性能に関する実験的検討，土木学会第70回年次学術講演会，I-118，2015。
- 4) 幸左賢二，大塚久哲，星隈順一，佐々木協一，新保弘：RC橋脚の変形性能向上に関する実験的研究，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.43-56，1997。
- 5) 仁平達也，谷村幸裕，岡本大，田所敏弥：曲げ損傷を受けたRC柱の補修後の部材特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1519-1524，2006。
- 6) 五島健斗，植村佳大，高橋良和：設計基準外事象に対する挙動が定性的に予測可能な埋め込みメナーゼヒンジRC構造の開発，土木学会論文集A1，Vol.75，No.4，pp.I-506-I-519，2019。