

氏名	渡部 太一郎		
博士の専攻分野の名称	博士（工学）		
学位記番号	医工博乙第88号		
学位授与年月日	平成28年3月23日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当		
専攻名	環境社会創生工学専攻		
学位論文題目	段落しを有する既設RC橋脚を対象とした側面剛体補強工法の開発		
論文審査委員	主査	准教授	齊藤 成彦
		教授	鈴木 猛康
		准教授	後藤 聡
		准教授	吉田 純司
		准教授	高橋 良輔

## 学位論文内容の要旨

1978年に発生した宮城県沖地震以降、日本で発生した大きな地震において、既設RC橋脚の軸方向鉄筋が橋脚高さ方向の中間部で途中定着されている、いわゆる「段落し部」とよばれる部分において、RC橋脚の損傷が多数発生している。1995年に発生した兵庫県南部地震では、高速道路橋の橋脚が何径間にもわたって横倒しになる被災を受けた。この高速道路橋の被災事例も段落し部が起点となって破壊したことがその後の調査で明らかになっている。

既設のRC橋脚においては、曲げモーメントが小さくなる橋脚高さ方向の中間部において、経済性や施工性の観点から軸方向鉄筋の一部を途中定着（段落し）している。主鉄筋の段落しは、コンクリートの引張部に定着される部分となるので、引張鉄筋の定着長に関する規定が必要となる。しかしながら、1970年代までの日本における土木学会、鉄道、道路におけるコンクリートの設計基準では、段落し部で途中定着する引張主鉄筋の定着長に関する規定が定量的に定められていなかった。これらの基準でつくられた橋脚は、段落し部で途中定着される引張主鉄筋の定着長が不足しているものが多く、これが、地震による既設RC橋脚における段落し部の損傷の主要因となっている。

2011年3月11日には、東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震を受けた耐震補強済みの既設RC橋脚は無損傷であったが、一部の補強されていない既設RC橋脚において段落し部の損傷が発生した。南関東地域では、今後首都直下地震の発生も想定されている。

そのため JR 東日本では、東北地方太平洋沖地震を踏まえた耐震補強対策と首都直下地震に備えた耐震補強対策が新たに進められ、既設 RC 橋脚のうち未補強であった曲げ破壊先行型の橋脚の耐震補強工事に 2012 年に着手して、現在施工を行っている状況である。

既設 RC 橋脚の耐震補強では、段落し部で損傷が発生すると耐力や変形性能で表される耐震性が低くなるのがこれまで行われてきた既往の研究で判明している。そのため、既設 RC 橋脚の耐震補強では、基部やく体のせん断補強およびじん性補強を行うほか、段落し部の耐震性が基部に比べて低い橋脚においては段落し部で損傷させないように段落し部を補強する方法をとっている。これにより、段落し部での損傷を防止して基部で安定した曲げ損傷する損傷形態とすることにより、地震時水平力に対して基部の塑性回転性能によりエネルギー吸収を行えるよう、耐震補強を行うものである。

ラーメン高架橋柱の耐震補強工事と同様に、橋脚の耐震補強工事においても高架下が店舗や事務所等で使用されている箇所の補強工事が課題となっている。橋脚の既往の耐震補強工法は、特に壁式橋脚の場合、断面が扁平であり、一般に引張鉄筋が段落しされていることから、橋脚 4 面を巻き立てる工法が標準となっている。そのため、高架下が利用されている箇所における橋脚の耐震補強工事では、高架下施設の移転復旧工事を補強工事の前後で行った上で、橋脚 4 面を RC 巻き立て工法等にて補強する工事を行っているのが現状である。高架下施設の移転復旧工事は、一般的に補強工事そのものよりも工事費や工期を要している場合が多い。

高架下の利用用途では、高架下を信号通信機器室として利用している場合もある。そのような橋脚において耐震補強工事を行う場合、信号機器の移設には多大な工事費と工期を要することが大きな問題となっていた。本研究では、そのような箇所でも高架下の機器室に支障することなく施工できるよう、橋脚側面のみから橋脚段落し部を補強する工法を提案し、補強工法を模擬した試験体による模型載荷実験により段落し部の補強効果を確認したうえで、実橋脚に適用した。

本研究では、まず初めに、側面から橋脚段落し部を補強する耐震補強工法（以下、側面剛体補強工法という）の曲げ補強効果をはりの曲げ載荷実験で確認し、補強後の降伏曲げ耐力を定量的に評価する方法を提案した。次に、側面剛体補強工法の適用を予定している、段落し部の曲げの安全度が基部の曲げの安全度に比べて小さい諸元である実橋脚を模擬した縮小模型試験体による交番載荷実験を行い、側面剛体補強工法で段落し部を曲げ補強することにより、段落し部での損傷を防止して基部での曲げ損傷とすることができ、損傷部位および損傷形態を補強により移行することができることを確認した。併せて、補強後の段落し部と基部の降伏曲げに関する安全度の比率で表される損傷形態判別係数と損傷部位

との関係について考察を行い、段落し部での損傷を防止できる補強後の損傷形態判別係数の値として 1.3 以上を提案した。これらの実験で得られた知見をもとに、補強後の降伏曲げ耐力と損傷形態判別係数により簡易に設計できる補強設計法を提案した。最後に、側面剛体補強工法の性能を発揮するために必要となる標準的な施工方法を定めて、実橋脚に適用した。

次に、実橋脚で適用した結果をもとに、側面剛体補強工法と既往の RC 巻き立て工法との比較を行った。補強工事に関わる工事費と工期は両工法で概ね同等であった。したがって、機器室の移転工事を不要とすることができる側面剛体補強工法は、RC 巻き立て工法に比べて大幅に工事費と工期を縮減できることがわかった。

2015 年現在、側面剛体補強工法は、高架下を信号通信機器室として使用している新幹線の 2 高架橋における橋脚 6 基に適用済みである。2016 年には、道路に近接して既往の巻き立て工法を採用することができない橋脚 1 基においても適用を予定している。今後も、本研究で開発した側面剛体補強工法は、高架下を移設が困難な施設に利用している橋脚や道路近傍や河川内に位置し巻き立て厚さに関する制約を大きく受ける橋脚への適用が期待される場所である。このように、既往の耐震補強工法では実現不可能であった、橋脚を巻き立てることなく既設 RC 橋脚の段落し部を補強できる工法を開発したことの意義は大きく、本研究は既設 RC 橋脚の耐震安全性の向上に少なからず寄与できた。

## 論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震の発生時には、震災後に運輸省から各鉄道事業者に向けて緊急耐震補強に関する通達が出され、各鉄道事業者において、ラーメン高架橋のせん断破壊先行型となる RC 柱の耐震補強が順次進められた。これにより、JR 東日本では 2008 年度までに、新幹線の全線、在来線では南関東地域、仙台地域の RC 柱の補強工事が完了している。RC 橋脚についても 2001 年に運輸省から出された通達により補強対象に加えられ、ラーメン高架橋柱と同様、せん断破壊先行型の橋脚の耐震補強工事が 2008 年度までに完了している。一方で、段落し部を有する既設 RC 橋脚も耐震補強の対象となっており、一般の構造では鋼板や RC による巻き立て工法が適用されている。ところが、高架下が店舗や機器室等で利用されている場合は、橋脚を巻き立てる工法の適用は困難であり、高架下施設の移転復旧工事は、補強工事そのものより工事費や工期を要するものが多いことが問題となっている。

本研究は、橋脚を側面から補強する新しい工法を提案したもので、高架下施設の移転を伴わないため、極めて経済的な補強工法となる。一般の橋脚を巻き立てる在来工法と異な

り、橋脚を側面から補強するため、補強部材の剛性や耐力が既設部材の補強効果に与える影響を定量的に評価する必要がある。そこで本研究では、まず諸元が単純で各種パラメータの影響が明確化しやすい RC はり部材を用いて系統的な実験を行うことで、側面剛体補強による補強効果の定量化を成功している。影響パラメータとして、曲げ剛性の影響：補強はり曲げ剛性比、補強部材長の影響：補強範囲有効高さ比、既設橋脚形状の影響：既設はり辺長比、アンカー鉄筋量の影響：アンカー鉄筋比を設定し、計 13 体の破壊実験を実施した。その結果、補強部材の形状寸法・配筋量による耐荷力および破壊形態の違いや、アンカー鋼材量による一体性の確保程度等を明らかにしており、最終的に補強はり荷重分担比と補強程度（補強範囲有効高さ比と補強はり曲げ剛性比の積）の関係に一定の傾向があることを発見し、補強部材の設計法の基本式を導出している。

本研究では、RC はり部材の実験に基づいて提案された補強効果の評価式に基づき、実際の橋脚を模擬した RC 模型橋脚の正負交番載荷実験を実施し、評価式の適用性と補強橋脚の地震時挙動について検討が行われている。ここでは、補強された RC 橋脚の性能評価に既往の研究で提案されている損傷形態判別係数を用い、その適用性についても検証がなされている。これら一連の実験結果から、本研究で提案された補強効果の評価式と既往の損傷形態判別係数を併用することで、段落し部を有する既設 RC 橋脚を適切に曲げ補強できることが確認されており、系統的な実験と適切なパラメータ設定によって、研究目的が十分に達せられているものと判断される。

本研究で提案された新しい補強工法は、高架下が利用されている新幹線高架橋に実際に適用されており、提案した設計法の妥当性と開発した補強工法の施工性が検証されている。実施工された補強橋脚は、東北地方太平洋沖地震後に損傷は確認されておらず、補強効果が実橋脚においても検証されたことは本研究成果の有用性を高めている。また、本補強工法の適用によって、補強工事費および工期を大幅に削減することができており、本研究の社会的意義も極めて大きいことが確認されている。

以上に基づき、同論文審査委員は全員一致で、本論文が博士学位論文として十分な水準にあると判断した。