

氏名	水野 剛規
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第908号
学位授与の日付	平成25年9月4日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	水平2方向繰り返しを受けるアンカー部の損傷が鋼製橋脚の終局挙動に及ぼす影響 (EFFECT OF DAMAGED ANCHORAGE ON ULTIMATE BEHAVIOR OF STEEL BRIDGE PIERS UNDER BI-DIRECTIONAL CYCLIC LOADS)
論文審査委員	主査 教授 後藤 芳 顕 教授 梅原 秀 哲 教授 小畑 誠 教授 張 鋒

論文内容の要旨

兵庫県南部地震以後の鋼製橋脚のアンカー部は、これに修復が困難な損傷が生じるのを避けるため、鋼製橋脚躯体より大きな耐力を持つようにキャパシティーデザインの考え方で設計される。一方、兵庫県南部地震以前の鋼製橋脚の耐震補強においても同様な考え方が用いられるが、アンカー部には補修の困難さを考慮して緩和措置も取り入れられており、兵庫県南部地震以後の示方書に較べ比較的大きな損傷が許容される。しかしながら、耐震照査に用いる応答値を算定するための橋梁全体系のモデルにおいては、いずれも、橋脚躯体基部はフーチングへ剛結されたものとして扱われ、アンカー部の挙動が橋梁全体系へ与える影響は無視されている。そのため、既設橋脚躯体が補強された場合、レベル2地震動下ではアンカー部に無視できない損傷が生じることも考えられる。さらに、ほとんどの橋梁の耐震安全性照査では橋軸あるいは橋軸直角方向に入力した水平1方向の設計地震動に対してそれぞれ独立に照査されているので、設計地震動に対してアンカー部が損傷しない場合でも、水平2方向地震動が同時入力する現実の条件下ではアンカー部が損傷しないという保証はない。アンカー部に損傷が生じると橋脚躯体基部の固定度が低下し、もはや橋脚躯体基部の剛結条件が満足されず、橋梁全体系の耐震性能に影響を及ぼす可能性も考えられる。本論文では、今後の水平2方向地震動同時入力下での鋼製橋脚の照査の必要性が

より増すことを視野に入れて、水平 2 方向繰り返し荷重下での橋脚躯体とアンカー部に生じる損傷特性と橋脚躯体基部の固定度を水平 1 方向繰り返し荷重下での場合と比較することで明らかにし、アンカー部が鋼製橋脚の終局挙動に与える影響について検討している。

検討では、まず、対象とすべき鋼製橋脚についての絞り込みを行っている。このような鋼製橋脚は 2 種類に大別される。一つは兵庫県南部地震以前に建設され、地震後に耐震補強の照査がなされ必要な場合は補強されたものである。いま一つは兵庫県南部地震後の示方書に基づき新たに建設されたものである。橋脚躯体やアンカー部の耐震性能は準拠示方書に支配されるので、各示方書や指針類について、構造パラメータの制限や照査手法と許容値の観点からレビューし、整理することで、実在する鋼製橋脚の予測される性能について考察している。これらの考察結果に基づき、検討対象とすべき橋脚躯体とアンカー部からなる鋼製橋脚の代表的なモデルを複数選定している。なお、橋脚躯体は矩形断面形状の単柱式を、アンカー部は杭方式と鉄筋コンクリート方式（RC 方式）を対象としている。

数値解析に用いる鋼製橋脚の解析モデルとしては、橋脚躯体には鋼材の構成則に 3 曲面モデルを導入したシェル要素で離散化した有限要素モデル、アンカー部には構成要素ごとにモデル化した 3 次元モデル、さらに地盤も簡単なばねモデルを用い考慮することにより、なるべく現実に近い鋼製橋脚全体系の挙動が再現されるように配慮している。

検討結果として、兵庫県南部地震以前に設計され地震後に耐震補強が施された鋼製橋脚では、兵庫県南部地震以後の示方書に基づいた場合と較べてより大きい損傷がアンカー部に許容されているので耐震補強の照査を満足していても橋脚躯体基部を剛結と見なせない場合があることを明らかにしている。この傾向は、特に RC 方式のアンカー部において顕著であることを示している。2 方向繰り返しでは 1 方向繰り返しに較べアンカー部の損傷が大きく、杭方式、RC 方式とともに固定度が低下するが増加するが、RC 方式ではほとんどのケースで固定度が不十分になることを明らかにしている。一方で、兵庫県南部地震以後の示方書に基づき新たに建設された鋼製橋脚においては橋脚躯体が終局状態に到達しても杭方式および RC 方式のアンカー部は 1 方向載荷、2 方向載荷いずれにおいてもほとんど無損傷であることを明らかにしている。よって、1 方向地震動に対して設計されたアンカー部を持つ橋脚躯体基部の固定度は 2 方向地震動下でも十分であることを示している。また、アンカー部の損傷による橋脚躯体基部のフーチングへの固定度の低下を防ぐために必要最低限のアンカー部の橋脚躯体基部に対する耐力モーメント比を杭方式と RC 方式のアンカー部について載荷形式ごとに明らかにしている。

最後に、固定度が不十分な RC 方式のアンカー部の比較的簡便な補強方法として、アンカーボルト頂部を上ベースプレートに締結し浮き上がりを防止する方法を提案している。妥当性を検討した結果、固定度が不十分であった橋脚の固定度は大幅に改善し過半数の橋脚で固定度が十分なものとなることを示している。

論文審査結果の要旨

鋼製橋脚アンカー部に重大な損傷が生じると修復が困難になるので、兵庫県南部地震以後においてはこれを防ぐために、アンカー部が橋脚躯体より大きな耐力を持つように設計するいわゆるキャパシティーデザインの考え方が導入された。このような考え方は、既設の鋼製橋脚の耐震補強においても準用されているが、アンカー部の補強の困難さから緩和措置も取り入れられているため新設構造に比べ比較的大きな損傷が許容されている。しかしながら、高架橋全体系の耐震照査に用いるモデルにおいては、いずれも、橋脚躯体基部がフーチングへ剛結されたものとして扱われ、アンカー部の挙動が橋梁全体系に与える影響は無視されている。既設橋脚躯体が耐震補強された場合、レベル2地震動下ではアンカー部に無視できない損傷が生じることも考えられる。また、新設構造、耐震補強された既設構造にかかわらず、高架橋の耐震安全性は、通常、橋軸あるいは橋軸直角方向に独立に入力した水平1方向の設計地震動に対してそれぞれ照査されるので、設計地震動に対してアンカー部が損傷しない場合でも、水平2方向地震動が同時入力する現実の条件下ではアンカー部に重大な損傷が発生しないという保証はない。アンカー部に大きな損傷が生じると橋脚躯体基部の固定度が低下し、もはや剛結条件が満足されず、橋脚さらには橋梁全体系の耐震性能に重大な影響を及ぼす可能性も考えられる。「想定外」の被害を防止するには、より現実的な水平2方向地震動成分の連成下での耐震性能を明らかにすることが重要である。

本論文では、上記のような観点から、2方向繰り返し荷重を受けるアンカー部が鋼製橋脚全体の終局挙動に与える影響を検討している。まず、検討すべき鋼製橋脚として兵庫県南部地震以前に建設され、地震後に補強されたものと、兵庫県南部地震以後の示方書に基づき新設されたものを対象に、構造パラメータの範囲や照査手法と許容値の観点からレビューし、代表モデルとして単柱式橋脚躯体と杭方式と鉄筋コンクリート方式（RC方式）のアンカー部からなる鋼製橋脚モデルを複数選定している。数値解析モデルとしては、橋脚躯体には鋼材の構成則に3曲面モデルを導入したシェル要素で離散化したモデル、アンカー部には構成要素ごとにモデル化した component method による3次元モデル、さらに、地盤もSRモデルで表すことで、なるべく実際に近い鋼製橋脚の挙動が再現されるように配慮している。数値解析により明らかになった結果として、耐震補強が施された既設鋼製橋脚では照査を満しても実際には大きい損傷がアンカー部に生じ、橋脚躯体基部とフーチングの結合部が剛結と見なせない場合があること、また、この傾向はRC方式のアンカー部に顕著であることを示している。2方向繰り返し載荷では1方向繰り返しに比べアンカー部の損傷が大きく、杭方式、RC方式ともに橋脚躯体の固定度が低下するが、RC方式ではほとんどのケースで固定度が不十分になることを明らかにしている。一方で、兵庫県南部地震以後の示方書に基づき新設された鋼製橋脚では2方向繰り返し載荷で橋脚躯体が終局状態に到達してもアンカー部はほとんど無損傷で、橋脚躯体基部の固定度は2方向地震動下でも十分であることを示している。さらに、2方向地震動下でのアンカー部の損傷による橋脚躯体基部の固定度低下を防ぐために必要最低限のアンカー部と橋脚躯体基部の耐力モーメント比を杭方式とRC方式のアンカー部について明らかにしている。最後に、固定度が不十分なRC方式のアンカー部の簡便な補強方法として、アンカーボルト頂部を上ベースプレートに締結し浮き上がりを防止する方法を提案している。この手法を導入すると固定度が不十分であった既設の橋脚の固定度は大幅に改善され、過半数の橋脚で固定度が十分になることを示している。

以上、本論文は、重要ではあるが非常に困難な課題であった2方向繰り返し荷重下でのアンカー部と鋼製橋脚躯体の連成問題を精緻な数値解析により明らかにすることで、既存構造における耐震性の問題点を指摘するとともに、適切な耐震性をアンカー部に確保するための設計法や耐震性が不十分なアンカー部の簡便な補強方法を提案している。本研究により、都市内高架橋の耐震安全性確保の上で最も重要な橋脚に対して、現実に即した合理的な耐震設計や耐震補強が可能になり、想定外の被害低減にも寄与するところが大きい。当該論文は新規性、独創性、実用性いずれも高く評価される。よって、博士(工学)の学位論文として合格と認める。