

## 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	Huihui Yuan
氏名	袁 輝輝
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第44号
学位授与	平成25年 9月12日
学位授与条件	学位規定第3条第3項該当
論文題目	Experimental study and analytical method of partially concrete-filled steel bridge piers under bi-directional dynamic loading (コンクリート充填鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験と解析手法の開発)
論文審査委員	(主査) 教授 鈴木森晶 <sup>1</sup> (審査委員) 教授 岡田久志 <sup>2</sup> 教授 正木和明 <sup>1</sup> 名誉教授 青木徹彦 <sup>1</sup>

### 論文内容の要旨

#### Experimental study and analytical method of partially concrete-filled steel bridge piers under bi-directional dynamic loading

(コンクリート充填鋼製橋脚の水平2方向載荷ハイブリッド実験と解析手法の開発)

1995年の兵庫県南部地震では、高速道路の倒壊により地震直後の緊急支援の遅れや物流機能が停止し、経済的損出は極めて大きかった。今日我が国の物流の大半は高速道路による陸上輸送であるから、その機能維持のための耐震安全性の向上は社会経済活動上、極めて重要な研究課題である。

高速道路を支える鋼製橋脚では、大規模地震による非線形挙動が現れ、簡単な震度法による設計が適切に行われなくなる。そのため非線形動的解析を行って地震応答を求め、設計に反映させるようになっている。しかし現行の設計基準では、地震動による照査に関して、橋脚への慣性力を橋軸方向、橋軸直角方向それぞれ独立に作用させて耐震設計を行うこととしている。これは水平2方向からの慣性力が同時に最大値をとる可能性が低いこと、また2方向載荷の実験方法が複雑で困難なため、今日までに2方向載荷の実験データがほとんどないことが理由である。しかし実地震波は3方向の成分を持っているため、鉛直地震動の影響が小さいとしても、橋脚は少なくとも

水平2方向成分の地震動の影響を受けるから、1方向のみの地震波に対する橋脚の挙動をもとに耐震性能を照査することには問題がある。

一方、都市内の高速道路高架橋の鋼製橋脚は、兵庫県南部地震以前から、車両の衝突による損傷防止のため、橋脚基部に部分的にコンクリートを充填しているものがあり、震害報告では、このような橋脚の被害程度が低いことが示された。その後の新設橋梁の鋼製橋脚には、基部へのコンクリート充填が積極的に行われている。またこのような橋脚に対して1方向載荷実験を行った結果、耐震性能が格段に向上することが示されている。しかし水平2方向地震動を受ける場合の研究はほとんどなされていない。そこで本研究ではこれらの問題を解決するための実験的および解析的研究を行う。

第1章では、本研究の背景及び研究目的、鋼製橋脚の水平2方向載荷実験及び解析手法の関与を示した先行研究を紹介した。

第2章では、コンクリート充填した矩形断面および円形断面鋼製橋脚の水平1方向静的繰返し載荷実験を述べている。矩形断面供試体は断面寸法450x450mm、高さ約2.4mの比較的大型の供試体で、コンクリート充填率は0%、20%、40%である。円形断面供試体の断面寸法は外径480mm、板厚6mm、径厚比パラメータ0.08で、コンクリート充填率は0%、25%、50%である。つぎに地震波の影響を調べる実験に先立ち、その基礎となる水平1方向静的繰返し実験を述べている。この実験は簡単であるため、阪神大震災以後、橋脚について行われた大量の実験の約9割以上を占めるもので、地震波による応答は不明であるが、

- 1 愛知工業大学 工学部 都市環境学科 (豊田市)
- 2 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

その橋脚の有する最大強度、変形能力等の基本的特性が明らかにできる。

第3章では、コンクリート充填鋼製橋脚の水平1方向および2方向ハイブリッド実験を述べている。ハイブリッド実験とは、橋梁システム全体をコンピュータによる数値解析で行い、解析では正確な挙動を把握できない橋脚の非線形挙動を実験を行って求め、地震波の時刻暦データの微小時間ごとに両者を同時に進めるという手法である。実地震波の影響を比較的正確に把握できる優れた手法であるが、高度なシステム解析プログラムの開発や、複雑で高精度の実験装置およびその自動制御システムの開発が必要である。本研究では、まず兵庫県南部地震記録のJMA、JRTおよびPKBの設計用地震動記録の水平1方向および2方向加速度データを用いたハイブリッド実験を行い、橋脚の最大応答変位、残留変位、最大耐力およびエネルギー吸収量などの耐震性能を求め、1方向および2方向ハイブリッド実験の結果の相違を比較、検討した。また、コンクリート充填率の影響を考察している。実験の結果、従来の設計基準の基となった1方向載荷実験では、ある地盤種、コンクリート充填率では危険な設計となる場合があることが明らかにした。

第4章では、新たに開発した解析的手法を述べている。2方向載荷された橋脚の耐荷性能を明らかにするためには、できるだけ様々な地震波を用いたハイブリッド実験を行う必要があるが、現実には経済的かつ時間的に困難である。そこで、ハイブリッド実験の代わりに、橋脚の水平2方向載荷時の履歴挙動や応答特性を正確に表現し、大量の地震波を用いた応答計算に応じられる高精度の解析手法の開発が必要である。そのような解析手法の1つにマルチパネモデルを用いた解析が提案されている。本研究では特に2方向載荷時の橋脚の非線形履歴を高精度に求めるために、まず第2章で述べた静的繰り返し実験による履歴曲線を用い、構成則に必要な各履歴パラメータを求めた。つぎに、マルチパネモデル解析の定式化を行うため、コンクリート充填鋼製橋脚に対するパネの曲線近似履歴構成則を述べた。最後に、解析手法の妥当性と適用性を検証するため、コンクリート充填する鋼製橋脚に対して静的繰り返し実験と1方向および2方向ハイブリッド実験の結果を用い、解析と実験の比較検討を行い、本提案の解析モデルが実用上ほぼ十分な精度で実験結果を再現できることを明らかにした。

第5章では、コンクリート充填した矩形断面および円形断面鋼製橋脚のハイブリッド実験および解析手法についての研究結果をまとめ、研究の発展について論じた。各コンクリート充填率での最大応答変位及び残留変位は、Ⅱ種地盤とⅢ種地盤では2方向載荷の結果は1方向載荷に

比べ著しく大きくなるから設計法の改善が必要である。またコンクリート無充填と同様、地盤種の違いによって、大きく影響を受ける。したがって、合理的設計法の確立のためにはできるだけ多くの地震波を用いた検討が必要であると思われる。十分な高さまで部分的にコンクリートを充填することにより、基部鋼版の座屈が抑制されるため、最大応答変位及び残留変位は低減され、1方向と2方向載荷実験の差も小さくなった。

#### 論文審査結果の要旨

本論文は、1995年の兵庫県南部地震において、高速道路の倒壊により地震直後の緊急支援の遅れや物流機能が停止し、経済的損出が極めて大きかったことを受けて実施されたものである。論文の要旨は以下のとおりである。

今日、我が国の物流の大半は高速道路による陸上輸送であり、その機能維持のための耐震安全性の向上は社会経済活動上、極めて重要な研究課題であると言える。高速道路を支える鋼製橋脚では、大規模地震による非線形挙動が現れ、簡単な震度法による設計が適切に行われるとは言いがたい。そのため非線形動的解析を行って地震応答を求め、設計に反映させるようになってきている。しかし現行の設計基準では、地震動による照査に関して、橋脚への慣性力を橋軸方向・橋軸直角方向それぞれ独立に作用させて耐震設計を行うこととしている。これは水平2方向からの慣性力が同時に最大値をとる可能性が低いこと、また2方向載荷の実験方法が複雑で困難なため、今日までに2方向載荷の実験データの蓄積がほとんどないことが理由となっている。しかし実地震波は3方向の振動成分を持っている。鉛直地震動の影響は水平方向と比較して小さいとしても、橋脚は少なくとも水平2方向成分の地震動の影響を強く受けるため、1方向のみの地震波に対する橋脚の挙動をもとに耐震性能を照査することには問題があると言える。一方で、都市内の高速道路高架橋の鋼製橋脚は、兵庫県南部地震以前から、車両の衝突による橋脚本体の損傷防止のため、橋脚基部に部分的にコンクリートを充填しているものがあり、兵庫県南部地震の震害報告では、このような橋脚の被害程度が低いことが示された。その後の新設橋梁の鋼製橋脚には、基部へのコンクリート充填が積極的に行われている。また、このような橋脚に対して1方向載荷実験を行った結果より、耐震性能が格段に向上することも示されている。しかし、水平2方向地震動を受ける場合の研究はほとんどなされていない。そこで本論文では、これらの問題を解決するための実験的および解析的研究を行ったものである。

以下、各章の内容について記述する。

第1章では、本研究の背景及び研究目的、鋼製橋脚の水平2方向載荷実験及び解析手法の関与を示した先行研究を紹介している。

第2章では、コンクリート充填した矩形断面および円形断面鋼製橋脚の水平1方向静的繰返し載荷実験について述べている。矩形断面供試体の断面寸法450x450mm、高さ約2.4mの比較的大型の供試体で、コンクリート充填率は0%、20%、40%である。円形断面供試体の断面寸法は外径480mm、板厚6mm、径厚比パラメータ0.08で、コンクリート充填率は0%、25%、50%である。つぎに地震波の影響を調べる実験に先立ち、その基礎となる水平1方向静的繰返し実験を述べている。この実験は簡単であるため、兵庫県南部地震以後、橋脚について行われた大量の実験の約9割以上を占めるもので、地震波による応答性状は把握できないが、その橋脚の有する最大強度、変形能力等の基本的特性が明らかにできることを示している。

第3章では、コンクリート充填鋼製橋脚の水平1方向および2方向ハイブリッド実験を述べている。ハイブリッド実験とは、橋梁システム全体をコンピュータによる数値解析で行い、解析では正確な挙動を把握できない橋脚の非線形挙動について実験を行って求め、地震波の時刻暦データの微小時間ごとに両者を同時に進めるという手法である。実地震波の影響を比較的正確に把握できる優れた手法であるが、高度なシステム解析プログラムの開発や、複雑で高精度の実験装置およびその自動制御システムの開発が必要である。本論文では、まず兵庫県南部地震記録のJMA(I種地盤)、JRT(II種地盤)およびPKB(III種地盤)の設計用地震動記録の、水平1方向および2方向加速度データを用いた供試体40本に対するハイブリッド実験を行い、橋脚の最大応答変位、残留変位、最大耐力およびエネルギー吸収量などの耐震性を求め、1方向および2方向ハイブリッド実験の結果の相違を比較・検討をしている。また、コンクリート充填率の影響を考察している。実験の結果、各コンクリート充填率での最大応答変位および残留変位について、I種地盤とIII種地盤での2方向載荷の結果は、1方向載荷に比べ著しく大きくなること、またコンクリート無充填と同様、地盤種の違いによって、大きく影響を受けることから、従来の設計基準の基となった1方向載荷実験では、ある地盤種、コンクリート充填率では危険な設計となる場合があることを明らかにしている。

第4章では、新たに開発した解析的手法を述べている。2方向載荷された橋脚の耐荷性能を明らかにするためには、できるだけ様々な地震波を用いたハイブリッド実験を行う必要があるが、現実には経済的かつ時間的に困難である。そこで、ハイブリッド実験の代りに、橋脚の水平2方向載荷時の履歴挙動や応答特性を正確に表現し、大量の地震波を用いた応答計算に応じられる高精度の解析手法の開発が必要である。そのような解析手法の1つにマルチバネモデルを用いた解析が提案されている。本研究では特に2方向載荷時の橋脚の非線形履歴を高精度に求めるために、まず、第2章で述べた静的繰返し実験による履歴曲線を用い、構成則に必要な各履歴パラメータを求めた。つぎに、マルチバネモデル解析の定式化を行うため、コンクリート充填鋼製橋脚に対するバネの曲線近似履歴構成則を述べている。最後に、解析手法の妥当性と適用性を検証するため、コンクリート充填する鋼製橋脚に対して静的繰返し実験と1方向および2方向ハイブリッド実験の結果を用い、解析と実験の比較検討を行い、本提案の解析モデルが実用上ほぼ十分な精度で実験結果を再現できることを明らかにしている。

第5章では、コンクリート充填した矩形断面および円形断面鋼製橋脚のハイブリッド実験および解析手法についての研究結果をまとめ、研究の発展について論じている。

以上本論文についての審査および公聴会を開催し、本研究で得られる知見が工学上高い価値を有すると認められ、生産・建設工学専攻の博士学位論文に十分達しており、適格であると判定される。

(受理 平成25年10月15日)