

京都大学	博士 (工 学)	氏名	鍾 育 霖
論文題目	Existing Performance and Effect of Retrofit of High-Rise Steel Buildings Subjected to Long Period Ground Motions (長周期地震動を受ける高層鋼構造建物がもつ耐震性能評価と耐震補強効果)		
(論文内容の要旨)			
<p>わが国における高層建物の歴史は 1960 年代後半にさかのぼる。以来 40 年にわたって関連技術は磨かれ、いまでは国内で 2000 棟を超す高層建物が建設されている。一方で今世紀前半には南海トラフの巨大地震がわが国の都市を襲うことが確実視され、ここにおいて、巨大地震に特有の長周期地震動と高層建物の共振によって、無視し得ない被害が生じうる懸念が高まっている。このような背景のもと、実大寸法をもつ高層建物が長周期地震動を受けたときの応答と損傷を大型振動台実験から明らかにするとともに、起こりうる損傷を低減するための耐震補強法を提案した本論文は、全 7 章から構成されている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景とそれを解決する実験手法、論文全体の構成を記述している。</p> <p>第 2 章では、高層建物の挙動を過度の縮小模型に頼ることなく振動台上で再現するために、地震応答が特に大きいと予想される部分には実寸規模の試験体を配し、その他の部分はバネと質量によって縮約した等価層で代替するという、サブストラクチャ振動台実験法を新たに提案している。具体的には、1970 年代に建設された高層建物を模擬した 21 層建物を原型とし、この建物の下層 4 層分を現実の試験体とし、一方上層については、数層分を 1 つのバネ-質点系に置換した等価骨組からなる試験体を構築した。バネ-質点系に付与すべき特性は一連の数値解析から同定し、さらに上層部においても若干生じる塑性化を模擬するために、置換層にダンパーを組み入れることによって、固有周期と耐力特性が原型とほぼ同一になる試験体を構築することに成功している。この試験体にランダム波や複数の地震動を入力することから、ここで構築した試験体の原型建物がもつ動特性（固有周期特性、固有モード特性、減衰特性）を適切に表現できていることを明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、第 2 章で構築した試験体に対して、現行の耐震設計で用いられる設計地震動、記録直下型地震動、模擬長周期地震動を入力することから、試験体がもつ復元力特性と損傷の進展を詳細に検討している。機能性確保を前提とするレベル 1 の設計用地震動、安全性確保を前提とするレベル 2 の設計用地震動いずれに対しても、最大層間変形角度が 1/200, 1/100 を越えることはないこと、最大層せん断力の分布も耐震設計が想定するせん断力分布にほぼ等しいことを示すことによって、本試験体が適切に耐震設計されていることを確認している。一方長周期地震動を受けた場合には、最大層間変形角度が 1/50 を越すことはないが、長周期地震動特有の継続時間の長い揺れによって、累積層間変形角は、設計用地震動に対して期待される累積層間変形角の 15 倍にも至ることを実証するとともに、この累積によって、柱梁接合部の一部がその下フランジから破断しうることも明らかにしている。</p>			

第4章では、第3章で詳述した一連の実験において、特に柱梁接合部に着目し、接合部がもつ保有耐震性能を詳細に分析している。この試験体においては、1970年代に標準的に使われた接合形式と詳細をできるだけ忠実に再現するために、溶接用スカラップや高力ボルトの配置に工夫を凝らしている。また、フランジを溶接によってウェブ部分を高力ボルトでつなぐ現場接合形式と、フランジ、ウェブともに溶接でつなぐ工場溶接形式を採用し、両者がもつ保有性能の違いにも言及している。工場溶接形式の方が現場接合形式よりもはるかに大きな（5倍以上）累積塑性変形能力を有していること、工場溶接形式であれば想定される長周期地震動下においても破断のような深刻な被害は生じにくいことを明らかにしている。さらに現場溶接形式については、下フランジ溶接において溶接工の頻繁な繰り返し移動が要求されること、高所作業によって溶接品質検査が難しくなること等に起因して、特に下フランジにおいては溶接欠陥が誘発されやすいことを実証している。

第5章では、第4章で詳述した接合部損傷を受け、接合部がもつ保有性能、とりわけ多数回にわたる繰り返し塑性変形に対する性能を向上しうる耐震改修法を詳細に検討している。ウェブのシアプレートを追加溶接するウェブ溶接補強、下フランジにウイングプレートを追加した水平ハンチ補強、下フランジの下に形鋼を配した鉛直ハンチ補強を提案し、それぞれの補強によって期待できる保有性能向上効果を準静的載荷実験から検証している。ウェブ溶接補強だけでは塑性変形能力を格段に向上させることは難しいが、溶接による接合部の一体化によってエネルギー消費能力は相当（約2倍）向上すること、水平ハンチ補強では、簡便でありつつ顕著な保有性能向上が期待できること、鉛直ハンチ補強は、施工上の難点を除けば最も高い保有性能を確保できることを明らかにしている。

第6章は、第5章の検討結果を受けて、第2章で記した試験体を再度構築し、これに第5章で検討した補強方法（ウェブ溶接補強、水平ハンチ補強、鉛直ハンチ補強）を施すことによって、補強によって期待しうる耐震性能向上を検討している。第2章と同一の地震動を与えることによって補強効果を直接比較することを可能とし、その結果、ウェブ補強においては、第5章で採用したウェブとシアプレートとの溶接に加えて、シアプレートと柱フランジにも溶接を加えることによって、その累積塑性変形能力は格段に向上すること、水平ハンチ補強、鉛直ハンチ補強も含めて、補強によって接合部が有する保有性能は累積塑性変形において5倍に至ることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

(論文審査の結果の要旨)

南海トラフの巨大地震によってわが国に林立する高層建物に無視し得ない被害が生じうる懸念が高まるなか、本研究は、実大寸法をもつ高層建物が長周期地震動を受けたときの応答と損傷を大型振動台実験から明らかにするとともに、起こりうる損傷を低減するための耐震補強法を新たに提案する内容である。本論文から得られた主な成果は次のとおりである。

1. 高層建物のうちその応答が大きいと予想される部分には実寸規模の試験体を配し、その他の部分はバネと質量によって縮約した等価層で代替するという、サブストラクチャ振動台実験法を新たに提案し、その妥当性を一連の数値解析と大規模振動台実験から検証した。
2. 長周期地震動を受ける高層建物の損傷を、特に多数回の繰り返し塑性回転を受ける柱梁接合部の累積塑性変形という指標を用いて定量化した。その結果、特に梁フランジ部を現場溶接で梁ウェブ部を高力ボルト接合で緊結した接合部（現場接合形式接合部）は、溶接品質確保の難しさ、ウェブにおける拘束が少ないことによるフランジ端への応力集中によって、相当低い累積塑性変形能力しか持ち得ない場合があることを突き止めた。
3. 現場接合形式接合部の累積塑性変形能力を向上させる耐震補強法として、ウェブの高力ボルト接合部の一部に溶接を追加する方法、下フランジ端部に水平ハンチを設ける方法、下フランジ端部に鉛直ハンチを設ける方法を考案し、それぞれの方法がもつ施工性や補強効果を、実寸規模準静的加力実験から明らかにした。さらにこれら補強法を施した試験体に対して、再度サブストラクチャ振動台実験を実施することから、これら補強法によって塑性変形能力が数倍以上向上することを検証した。

以上、南海トラフの巨大地震によって生じる長周期地震動を受けたときに、わが国の高層建物はどう揺れそして損傷するかという今日的課題に対して、実寸規模の大型振動台実験を通じて定量的な回答を与えとともに、その損傷を低減する具体的な方法を提案し、さらにその実効性を検証した本論文は、わが国のこれからの地震防災に関わる研究に対して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 2 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。