

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420580

研究課題名(和文) 内陸直下地震等の過大入力対策としての超高強度鋼材の建築構造への活用に関する研究

研究課題名(英文) Use of Ultra-high Strength Steel in Building Structure Aiming at Major Countermeasure for Huge Earthquakes

研究代表者

多賀 謙蔵 (TAGA, KENZO)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40578259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、法の想定を超える巨大地震に対しても建物の損傷を低減するために、柱に高強度鋼材、梁に相対的に強度の低い鋼材を用いた耐震性の高い架構を実用化する目的で、解析的・実験的研究を行ったものである。

まず解析的検討により、一定の過大変形が生じる条件下においても架構の損傷を低減するための断面選定方針を示した。次いでフランジに780N/mm<sup>2</sup>級鋼材を、ウェブに490N/mm<sup>2</sup>級鋼材を用いた異種鋼材H形断面材の短柱圧縮実験・曲げせん断実験ならびに、十字架構実験を行い、性能確認を行った。これらの解析的検討ならびに実験的検討から知見を体系的に整理し、異種鋼材H形断面柱の設計方針をまとめた。

研究成果の概要(英文)：This study is conducted to store information about hybrid frame consists of high strength steel column and conventional steel girder, and implement it to eliminate the damage of structure against earthquake greater than envisaged in law.

At first, we examined the selection method of cross section that enables elimination of structural damage by analyzing. Secondly, Stub-column tests, bending and shear tests and beam-to-column sub-assemblies test adopting hybrid H-section column consists of flange with high strength steel of 780N/mm<sup>2</sup> and web with conventional strength steel of 490 N/mm<sup>2</sup> were performed to examine the strength and ductility performances. In this study, knowledge obtained from series of analysis and experiment is organized systematically and summarized the design method of hybrid H-section column.

研究分野：工学

キーワード：鋼構造建築物 高強度鋼材 異種鋼材H形断面 短柱圧縮実験 曲げせん断実験 十字架構実験 有限要素解析

## 1. 研究開始当初の背景

わが国では安心・安全を確保するにあたって地震対策を避けて通ることはできない。1995年に兵庫県南部地震が発生し、大きな被害を目の当たりにして大地震に対する建物の機能維持・財産保全の重要性が改めてクローズアップされた。その後も2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震、2007年中越沖地震等の被害地震に続き、2011年の3月には東北地方太平洋沖地震という巨大地震が襲い、甚大な被害があった。

大都市のひとつである大阪市では、とりわけ内陸直下地震である上町断層帯地震に対してどのように対策するかが課題となっている。この地震の今後30年間の発生確率は2~3%と活断層としては高い部類に入っている。研究代表者らは、いくつかの研究機関による予測等を参考にして、上町断層帯地震を対象とした設計用地震動に関する研究を行い、現行法で規定する設計用地震動を大きく上回る地震動を考慮すべきこと、また、この予測地震動には、パルス周期が1秒程度以上で、かつ大きなパワーを有するものが含まれており、これらいわゆるパルス性地震動は構造物に大きな応答変位を与えることを文献等で示している。今後の設計において考慮すべきレベルの設計用地震動を入力すると、現行法を満足する建築物の場合、約2倍の応答変位ならびに大きな損傷が生じ得ることが想定される。また、パルス性を入力のため付加減衰の効果はあまり期待できない。

このような地震動に対しても損傷の低減を図るためには、大きな変形能力を付与する必要があり、近年実用化されはじめた高強度鋼材を活用することにより弾性限変形を大きくすることは有効な方法のひとつである。

高強度鋼材の建築構造材料としての実用化研究は、2002年度から開始された府省連携プロジェクトとして行われ、引張強度800N/mm<sup>2</sup>級のものが実用化されつつある。また、申請者らもそれとは別に2003年から引張強度950N/mm<sup>2</sup>級の超高強度鋼材を建築構造物に適用するための研究に関わり、実物件への適用も既に果たしているが、これらの高強度鋼材に共通する課題として、高強度鋼材同士の溶接接合は現状では難度が高く、普及にあたっての大きな障害のひとつとなっている。

## 2. 研究の目的

以上を背景として、上町断層地震に代表される、法律を超えるレベルの大きな地震動に対して、実用段階に入った超高強度鋼材を、その施工性・合理性を十分踏まえうえで有効に活用する方法を確立することが本研究の目的である。

具体的には、以下のことを明らかにする。

① 所用の剛性と耐力ならびに過大入力に対する塑性変形能力を有する架構を形成するための、超高強度鋼材による部材と汎用鋼材による部材の適切な組み合わせ方法を、数値解

析により明らかにする。

② 高強度鋼材同士の溶接接合を最小限とするための、フランジのみを超高強度鋼材、ウェブを汎用鋼材としたハイブリッド柱部材の有効性と適用限界を、数値解析ならびに試験体載荷実験により明らかにする。

## 3. 研究の方法

近年開発された建築構造用の超高強度鋼材を有効活用することにより、大都市を襲う可能性のある内陸直下型地震等に対抗するための建築構造設計の具体的な方向性を見出すことを目的として、以下の方法で研究に取り組んだ。

1) 数値解析による有効かつ合理的な高耐震性架構方式の探索

2) フランジに超高強度鋼材、ウェブに汎用鋼材を用いて施工性を向上させたH形断面柱部材を対象とした解析的ならびに実験的検討による弾塑性挙動の解明

## 4. 研究成果

### 4.1 解析的検討による研究成果

施工性ならびに過大入力時の変形能力確保を意図して柱に高強度鋼材を、梁に汎用鋼材を用いた架構(図1)に対する時刻歴応答解析等により、以下の知見を得た。

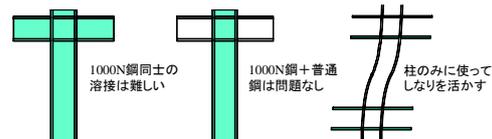


図1 高強度鋼材柱、普通鋼材梁による架構

1) 柱に高強度鋼材、梁に相対的に強度の低い従来鋼材を用いることで、一定の過大変形が生じる条件下において架構を高耐震化する断面選定方針を示した。高強度鋼材を利用することで、パルス性地震動に起因する過大な応答変位に対し、層の塑性率を4程度から2.5程度まで、部材塑性率を5程度から3程度まで低減し得る。

2) 履歴型ダンパー、粘性減衰の付加のみによる損傷低減効果は、付加量に対してそれほど大きくないが、柱に高強度鋼材を用いたうえでダンパーを付加したモデルでは、塑性率に加えて層間変形角を低減できる。

3) 鋼材種の各組み合わせにおいて、それぞれの損傷低減目標の限界値の目安が存在する。

4) 高耐震性架構は大幅なコスト増を伴うことなく有意な損傷低減効果を示す。大きな変動軸力を受ける際、高強度化に伴う柱断面積の減少により柱の軸方向変形が増加する点には注意を要する。

5) 高強度鋼材を用いずに、剛性と耐力を増大させたモデルについても高耐震性架構と同程度の損傷低減効果が得られる可能性があるが、大幅な鋼材量の増加を伴う。

### 4.2 実験的検討による研究成果

高強度鋼材である780N/mm<sup>2</sup>級鋼を、鉄骨製作コストを抑えながら有効に活用する方法の一つとして、フランジに780N/mm<sup>2</sup>級鋼、ウ

ウェブに 490N/mm<sup>2</sup>級鋼の汎用鋼材を用いた異種鋼材 H 形断面柱（図 2）の適用可能性を実験的に検討し、以下の知見を得た。

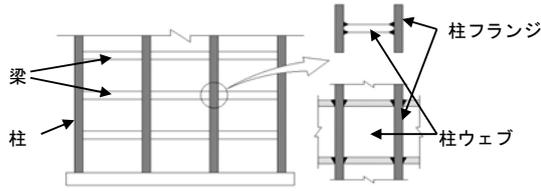
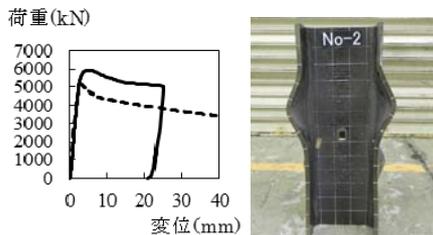


図 2 フランジに超高強度鋼材、ウェブに汎用鋼材を用いて施工性を向上させた H 形断面柱部材

#### 4.2.1 短柱圧縮実験

ウェブが先行して全面軸降伏する異種鋼材 H 形断面材の局部座屈挙動に関する基本的性状を把握する目的で、ウェブ（鋼種 SN490B）の幅厚比等をパラメータとして計 5 体の短柱圧縮実験を行った。荷重—変形関係の一例を図 3 に示す。実線が実験結果、点線が 4. に示した各試験体の FEM による再現解析結果である。

いずれの試験体も、解析上の最大耐力を超えて耐力が上昇しており、実験最大耐力に達するまで局部座屈等の不安定現象は見られず、安定した荷重—変形関係が得られた。ウェブが FC ランクに近づくほど最大耐力に到達後の耐力劣化が大きくなることを確認した。



ウェブ幅厚比 12 の荷重変形関係と最終状況  
図 3 短柱圧縮実験例

#### 4.2.2 曲げせん断実験

曲げせん断によりウェブが先行降伏する異種鋼材 H 形断面材の局部座屈挙動に関する基本的性状を把握するため、短柱圧縮実験と同断面の試験体について図 4 に示すような荷重装置により正負交番漸増繰り返し荷重による曲げせん断実験を行った。

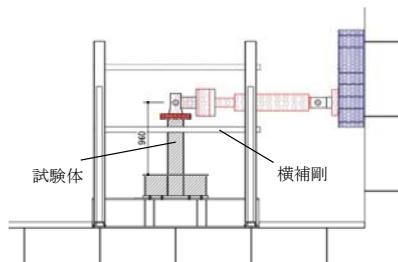
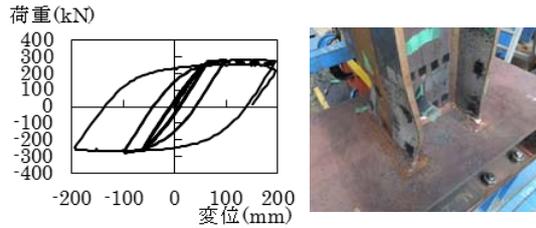


図 4 曲げせん断実験荷重装置

各試験体の荷重—変形関係を図 5 に示す。実線が実験結果で、点線が各試験体の FEM による再現解析結果である。FEM による再現解析は実験結果を精度よく追跡できている。

いずれの試験体も、全塑性モーメント  $M_p$  での 10 回の繰り返し荷重によってウェブの部分的な局部座屈が見られたが、大きく耐力が低下することはなかった。実験結果から全塑性耐力評価の妥当性ならびに適用範囲を確認でき、ウェブの厚さを FA ランクとすると最大耐力後の耐力低下も少なく望ましいことがわかった。



ウェブ幅厚比 12 の荷重変形関係と最終状況

図 5 曲げせん断実験結果例

#### 4.2.3 十字架構実験

高強度鋼材は一般に伸び能力に乏しいことから、異種鋼材 H 形鋼柱を用いた架構で柱が全塑性耐力に達するあるいはパネルが先行降伏するような場合、柱フランジが局部的な変形を受けて破断することが懸念される。このような現象を生じさせないために確保されるべき柱梁耐力比やパネル耐力比を明らかにする目的でフランジに 780N/mm<sup>2</sup>級鋼、ウェブに 490N/mm<sup>2</sup>級鋼を用いた異種鋼材 H 形鋼柱についての十字架構実験を行った。

試験体は、柱梁耐力比およびパネル耐力比をパラメータとした 6 体で、図 6 に示すような荷重装置により正負交番漸増繰り返し荷重を行った。

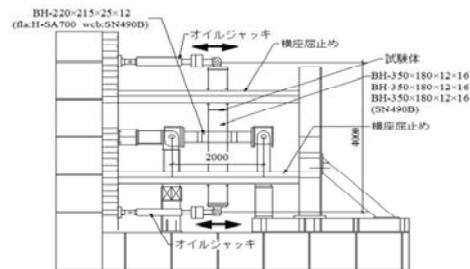


図 6 十字架構実験 荷重装置

図 7 に各試験体の荷重—変形関係を示す。6 体とも最終的には柱フランジの破断によって実験を終了した。柱梁耐力比 1.27 の場合でも梁の先行降伏、歪硬化に伴い柱が塑性化し最終的に柱フランジの破断により耐力が低下した。実験結果ならびに有限要素解析結果から、異種鋼材 H 形断面を十分に活用するためには梁降伏先行型かつパネル耐力比 1 以上の架構を形成することが望ましいこと、また、柱フランジの破断を防止することでより大きなエネルギー吸収を期待できることが

わかった。

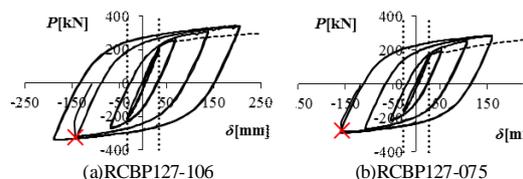


図7 十字架構実験 荷重変形関係例

#### 4.3 研究成果のまとめ

一連の検討結果をもとに、次の事項を方針としてまとめた。

- 1) 異種鋼材 H 形断面についての全塑性耐力は研究代表者らによる提案式により評価することができる。
- 2) 異種鋼材 H 形断面が全塑性耐力を確実に発揮するための適用限界を以下とする。
  - ① ウェブのせん断降伏を先行させない
  - ② ウェブの全面軸降伏が先行させない
  - ③ ウェブの幅厚比を FA ランクとする
  - ④ フランジの幅厚比を F C ランク以上とする
- 3) 柱梁耐力比を 1.5 程度以上かつ梁パネル耐力比を 1 程度以上として設計する。

高強度鋼材をフランジに用いた異種鋼材 H 形断面柱の設計に資するこれらの知見は、これまでに示されていなかったもので極めて新規性の高いものである。

#### 4.4 今後の展望

本研究成果の社会実装に向けて、論文発表やセミナーでの話題提供を通じて建築構造設計実務者向けにアピールしていく所存である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① 福間智之、多賀謙蔵、高強度鋼材を活用した全体崩壊形鋼架構の変形性能向上に関する研究、日本建築学会構造系論文集査読有、2016.7 掲載予定
- ② 加藤彰浩、山下怜士、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、780N/mm<sup>2</sup> 級鋼を用いた異種鋼材 H 形断面を柱材とする十字架構の力学特性、日本鋼構造協会年次論文報告集、査読有、第 23 巻、pp. 438-445、2015 年 11 月
- ③ 大和田尚吾、木下康仁、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、780N/mm<sup>2</sup> 級鋼を用いた異種鋼材 H 形断面柱の部材性能に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、第 22 巻、pp. 710-715、2014. 11
- ④ 穠山貴志、小早川拓、多賀謙蔵、鋼構造物の耐震性能向上における高強度鋼材の活用に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、第 22 巻、pp. 338-343、2014. 11
- ⑤ 小早川拓、三木佑斗、多賀謙蔵、高強度鋼材の利用による高耐震性構造に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、第 21 巻、pp.510-515、2013. 11

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 山下怜士、加藤彰浩、大和田尚吾、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、フランジに 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼材を用いた異種鋼材 H 形断面を柱材とする鋼架構の力学特性に関する研究(その 1 実験計画)、日本建築学会大会学術講演会、2015.9.5、東海大学(神奈川県平塚市)
- ② 加藤彰浩、山下怜士、大和田尚吾、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、フランジに 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼材を用いた異種鋼材 H 形断面を柱材とする鋼架構の力学特性に関する研究(その 2 実験結果)、日本建築学会大会学術講演会、2015.9.5、東海大学(神奈川県平塚市)
- ③ 多賀謙蔵、三木佑斗、福間智之、加藤彰浩、関西地区における内陸直下地震に対する取り組みの現状と課題、日本建築学会大会鋼構造 PD、2015.9.5、東海大学(神奈川県平塚市)
- ④ 加藤彰浩、大和田尚吾、山下怜士、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、フランジに 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼を用いた異種鋼材 H 形断面を柱材とする鋼架構の力学特性に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告会、2015.6.28、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)
- ⑤ 三木佑斗、穠山貴志、多賀謙蔵、鋼構造建築物の耐震性能向上における高強度鋼材の活用法に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告会、2015 年 6 月 28 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)
- ⑥ 大和田尚吾、木下康仁、遠藤千尋、浅田勇人、多賀謙蔵、田中剛、フランジに 780N/mm<sup>2</sup> 級鋼を用いた異種鋼材 H 形断面柱の部材性能評価に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告会、2014 年 6 月 21 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)
- ⑦ 小早川拓、穠山貴志、多賀謙蔵、パルス性地震動に対する損傷低減手法とその費用対効果に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告会、2014 年 6 月 21 日、大阪工業技術専門学校(大阪府大阪市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

多賀 謙蔵 (TAGA Kenzo)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40578259

##### (2) 研究分担者

田中 剛 (TANAKA Tsuyoshi)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90243328