

連携記事

780N/mm² 級鋼による新構造システム建築物の開発

Development of New Building System Using 780N/mm² Class High Strength Steel

東京大学 名誉教授 高梨晃一 Koichi Takanashi

新日本製鐵(株) 建材事業部建材開発技術部 マネジャー 志村保美 Yasumi Shimura

(株) 竹中工務店 副本部長 油川真広 Masahiro Yukawa

1 はじめに

1.1 開発の目的

ここで紹介する技術開発プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の研究開発」は、平成15年7月の総合科学技術会議（議長：小泉首相／当時）において、府省連携による推進が決定されたテーマであり、革新的な構造材料（鉄鋼材料）の開発を基盤として環境に配慮したサステナブルな都市基盤を構成する建築インフラを実現させる新構造システム建築物の開発を目指したものであり、5ヵ年の研究開発課題として平成16年度から取り組みがスタートし平成20年度がその最終年度となる。

この新構造システム建築物は、最大規模の地震（震度7クラス）に対しても主要部材を弾性範囲にとどめ無損傷とする建築構造システムであり、新しい高強度鋼を用いて実現を目指すものであり、近い将来発生が懸念される首都圏直下型地震、東海地震、東南海地震などによる人的被害や建物の損傷・損害等による経済的損失を大幅に低減し、安心安全社会の構築に資することを目的としている。また、同時に、省エネルギー、リデュース、リユース、リサイクルの促進に寄与することも可能となり、地球温暖化ガスの削減など環境負荷の低減を一層図ることを開発の狙いとしている。

そのための研究開発課題は、高強度鋼材とそれによる部材の特性評価、高強度鋼材の利用に合理性を持たせ得る接合部品や接合構造の開発（溶接接合ではなくボルト接合を指向）、さらには、地震外力の設定方法、それに対する構造設計方法、高い耐震性能を有する建築物の事業性評価など多岐にわたるものであり、経済産業省と国土交通省による補助事業として、日本鉄鋼連盟、日本鋼構造協会、新都市ハウジング協会が研究開発を進めてきたものである。

以下では、「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物の研究開発」として取り組んだ課題の中で、震度7クラス

の地震力に対して弾性設計を行うことから、その要求性能に適合する鉄鋼材料の開発、その部材性能に関する実験的研究、震度7クラスの地震力の設定方法、震度7クラスの地震力に抵抗する骨組として従来の構造骨組である「ラーメン構造（柱と梁による構造形式）」とは異なりボルト接合を主体とした新構造システム「外殻構造」の開発について紹介する。

2 780N/mm² 級鋼の性能と建築部材の性能

2.1 新構造システムと780N/mm² 鋼の性能

我が国における建築構造物は、耐震設計の手法として塑性設計が採用されており、大規模地震の際には部材の部分的な塑性化が許容されている（崩壊しないが損傷を許容している）。鉄骨構造の場合、粘り強い鋼材特性を活かした利用法であり合理的なものとも考えることも可能で、建築構造用鋼材として表1に示す性能を保有したSN鋼（平成6年）が規格化されている。

これに対して、新構造システム建築物では、前述のように「大規模地震時においても柱梁部材を弾性に留め無損傷とする」ものであり、部材の塑性変形（地震時のエネルギー吸収）に対する要求性能は低くなるはずである。具体的にはSN鋼において規定されている降伏比（降伏点または耐力／引張強さ）については、部材の十分な塑性変形を確保するための規

表1 SN鋼の機械的性質の既定値と780N/mm² 級鋼の規格目標

記号	降伏点 又は耐力	引張強さ	降伏比	伸び	シャルピー吸 収エネルギー	Ceq
SN400B	235～ 355	400～ 510	≤80	22≤ (1A)	27 J ≤	≤0.36
SN490B	325～ 445	490～ 610	≤80	21≤ (1A)	27 J ≤	≤0.44
高強度鋼 当初の狙い	650≤	750≤	無し	16≤	47 J ≤	≤0.60

単位: 耐力、引張強さはN/mm², 降伏比、伸び、Ceqは%。

定値 (0.8 以下) であり、緩和することができると考えられる。また、降伏点または耐力に対する上下限值規定 (120N/mm² のバンド) については設計で想定する塑性化部材の特定 (実現) のためであり、部材を弾性範囲に留める設計を行う場合は下限値のみの既定で良いものと考えられる。かつ、地震外力が震度 7 クラスと大きくなることから、弾性範囲が大きい鋼材が活用できることになる (これまでの外力の大きさでは鋼部材には座屈現象があるため高強度化のメリットが出せないことが多く強度的には SN490、SA440 鋼などで十分であった)。この高強度化により、板厚を薄くでき、構造物の軽量化が図れるとともに、長大スパン化、運搬・架設の効率化、薄肉化による加工・溶接の効率化などのメリットが期待できる。

この 780N/mm² 級高強度鋼材の建築構造物への利用を考える場合、経済合理性を確保することも重要な事項であり、鋼材の溶接性確保を犠牲にし、柱梁部材などの接合部 (厳しい接合性能が要求される) については溶接接合ではなくボルト接合等の乾式接合で行うことを想定し、溶接性に関して特に考慮しない鋼材を目標仕様とした。

なお、780N/mm² 鋼による部材をボルト接合する場合、鋼材強度が高いため従来のボルト強度 (現状では 1400N/mm² 級が最高強度) では接合部に要するボルト本数が多くなるため、さらに超高強度のボルトの開発にも取り組んでいる。ただし、通常の摩擦接合を想定する超高力ボルトでは遅れ破壊の克服という極めて難易度の高い課題があるため、通常の摩擦接合で導入する軸力の量を低減させ、さらに最終的にはボルトが支圧接合形式となる接合方法を開発しており、設計方法の構築については目処を得ているものの、超高力ボルトの実用化までは暴露試験による評価等について今後解決を図る必要がある。なお、詳細はここでは割愛する。

表 2 に示す仕様の 780N/mm² 鋼材の製造法については、経済合理性を追及する必要から、従来の高強度鋼のように「合金元素添加+調質 (熱処理)」による製造方法に代えて、「合金元素添加量の低減」と TMCP 技術を駆使し金属組織の細粒化、析出強化並びに変態強化を通じて高強度化を実現す

ることを目指している (概念図を図 1 に示す)。これまでの取り組みで各メーカーが工場試作した 780N/mm² 鋼材の機械的性質について以下に紹介する。

試作した 780N/mm² 鋼材の引張試験 (YP: 耐力、TS: 引張強さ、YR: 降伏比) とシャルピー試験 (vE) の結果に関するヒストグラムを図 2～5 に示す¹⁾。なお、耐力と引張強さに関して図中には試作鋼板の当初の目標仕様として、YP ≥ 650、TS ≥ 750 を記載している。各試験結果は 110 枚の鋼板に関するもので、図中に平均値 (Ave)、標準偏差 (s) を示している。試験結果によれば耐力は 700～850N/mm²、引張

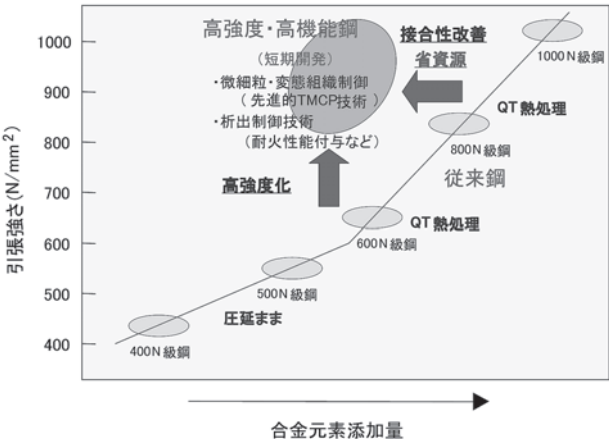


図 1 780N/mm² 級鋼の製造技術

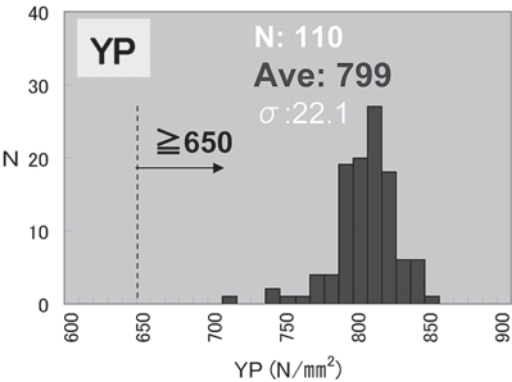


図 2 試作鋼材の耐力分布

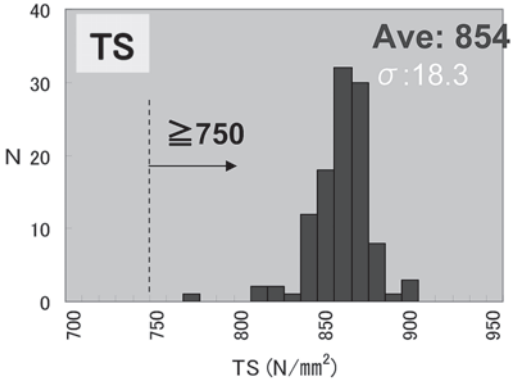


図 3 試作鋼材の引張強さ分布

表 2 780N/mm² 鋼材の仕様案

用途	鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (mass%)						
			C	Si	Mn	P	S	Ceq	PCM
乾式接合用	HSA700A	6～50	≤0.25	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.015	≤0.65	≤0.32
溶接接合用 ^{*1}	HSA700B					≤0.025		≤0.60	≤0.30

用途	鋼種	板厚 (mm)	機械的性質				
			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	YR (%)	vE (J)
乾式接合用	HSA700A	≥ 6	700～	780～	≥ 16	≤ 98	≥ 47(0℃)
溶接接合用 ^{*1}	HSA700B	≤ 50	900	1000			≥ 47(-20℃)

^{*1}:溶接性に関する品質は、現状建設機械用780N鋼材と同等レベル。

強さは770～1000N/mm²の範囲に分布しており、降伏比は最大で90～98%の範囲とかなり高い値となっている。引張試験時の応力ひずみ関係を図6に示すが、降伏比が高いことから耐力点到達以降の耐力上昇は少ない。しかし、伸び性能については、破断伸びの値として18%以上であり、一様伸びの値は7～8%となっている。

これらの試作材の試験結果に基づいて、建築構造部材で弾性設計使用を前提とする鋼材仕様を表2のように設定した。また、溶接性に関しては、現状の建設機械用780N鋼材と同等レベルとして設定している。

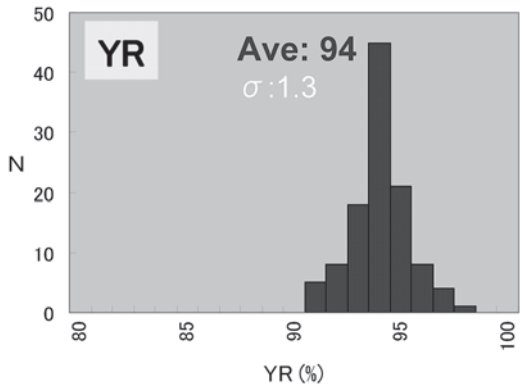


図4 試作鋼材の降伏比分布

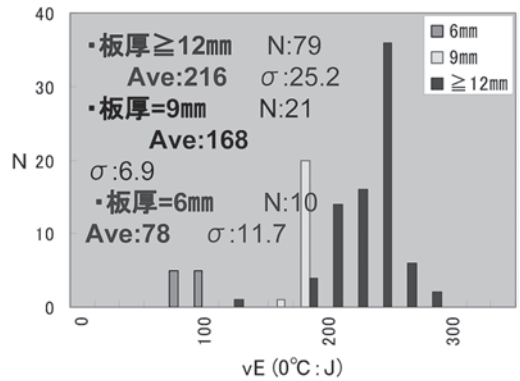


図5 試作鋼材のシャルピー値分布

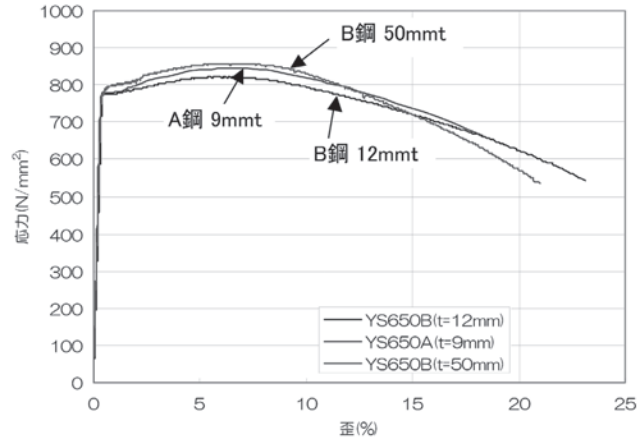


図6 試作鋼材の応力歪関係

2.2 建築構造部材としての性能

建築構造物における主要構造物材として780N/mm²鋼材を使用した場合の性能を確認するために、様々な部材断面を対象として性能確認を行っている。ここでは、H形鋼や円形鋼管、角形鋼管に加工した部材の性能について紹介する。

2.2.1 短柱圧縮試験

鋼材に圧縮荷重が作用すると座屈現象が現れ耐荷性能が極度に低下する。また、板厚が部材の径や幅に対して小さい場合は耐力に到達した後に耐力は急激に低下する。780N/mm²鋼材を用いた場合の性状を確認するために、780N/mm²鋼板から溶接により組み立てたH形鋼と角形鋼管、プレスとシーム溶接により成型した円形鋼管と角形鋼管について、図7に示す方法で圧縮試験を行った²⁾。パラメータは板厚と幅もしくは径の比(幅厚比)である。

試験終了時の各試験体の外観を写真1に示すとともに、プ

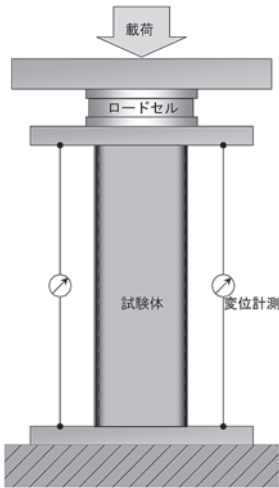


図7 圧縮試験の概要

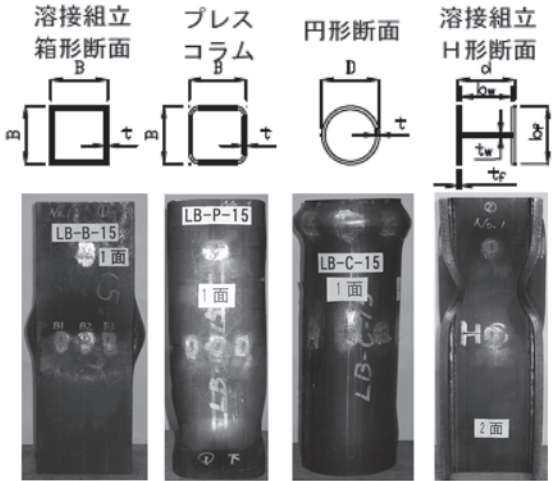


写真1 試験結果

レス成型による角形鋼管に関する試験結果の例を図8に示す。試験体符号28(板幅の厚さに対する比が28という意味)の試験体は、部材の板要素が鋼材の耐力までは局部座屈が生じない限界幅厚比近傍の試験体であり、試験結果は耐力到達後(図では縦軸1.0の位置)急激に耐力低下を生じており、予想通りの挙動が得られている。また、幅厚比(板幅/板厚)が小さい試験体ほど、耐力到達後も塑性変形が進むことがわかる。これらの基礎的な試験結果より、 780N/mm^2 鋼の局部座屈特性は従来の評価式が適用可能であることがわかる。

2.2.2 圧縮曲げ試験

建築構造物における柱部材は、建物の自重等の圧縮力や地震時水平荷重による曲げモーメントを受ける。この荷重状態における部材性能を確認するために、図9に示す圧縮曲げ試験(一定の圧縮力を試験体に作用させた状態で中央点に曲げ荷重を繰り返し载荷する)を行った。試験体の種類は、H形鋼、円形鋼管、角形鋼管であり、幅厚比や軸力比(圧縮力の大きさ)をパラメータとしている³⁾。

ここではH形鋼部材の場合の結果を図10と写真2に示す。図10には幅厚比が小さい試験体で、軸力比がゼロの場合(軸力が作用しない場合)と軸力比が0.3の場合(降伏耐力の30%に相当する軸力を作用させた場合)を示しているが、軸

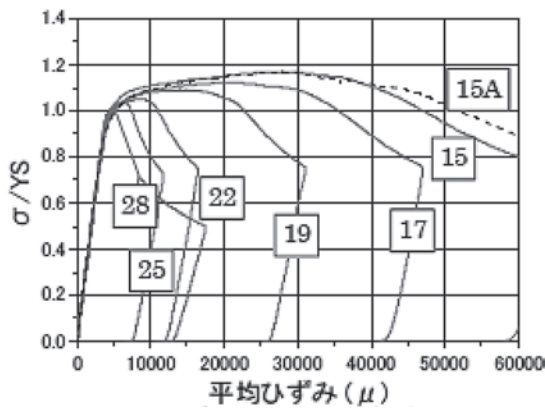


図8 圧縮試験結果の例

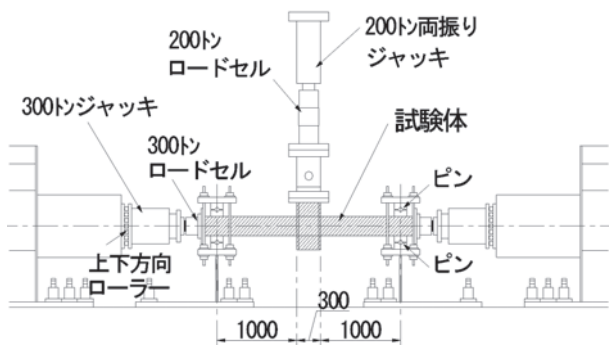


図9 圧縮曲げ試験の概要

力がない場合は塑性座屈が生じるまで安定した履歴ループが得られている(終局は破断で決定)が、軸力が0.3の場合は接合部近傍で局部座屈が生じ繰り返し回数も少ない結果が得られた。これらの結果より、 780N/mm^2 鋼部材に圧縮力と曲げモーメントが作用した場合の柱としての耐力、変形性能に関する知見が得られている。

なお、一連の試験結果は、弾性部材としての利用を前提としたものであり弾性挙動の把握が主目的であるが、本鋼材は従来の鋼材に比べて極めて高い降伏比($\text{YR} = \text{耐力} / \text{引張強さ}$)となっていることから、弾性挙動以降の終局状態も評価対象としており、構造物を設計する際に考慮するリダンダンシーを考える上で有効なデータとなる。

2.2.3 ボルト接合部

建築構造物の部材接合部では高力ボルト摩擦接合が多用されており、また今回の 780N/mm^2 鋼の利用においては高力ボルト等による乾式接合を指向しているが、高力ボルト接合部における部材の有孔部近傍には応力集中が生じるため鋼材の機械的性質における高い降伏比の影響が懸念されることから、その影響の有無を確認した。

有孔板の引張特性の確認方法は、図11に示すように平板にボルト孔を直列配置したものと千鳥配置した形状とした試験体の引張試験によることとした。千鳥配置の試験体についてはボルト孔相互の影響を確認するためにピッチとゲージをパラメータとしている。なお、試験体に用いた鋼材は板厚16mmで機械的性質は、耐力 816N/mm^2 、引張強さ 864N/mm^2 、降伏比94.4%で一様伸びが約6%である。

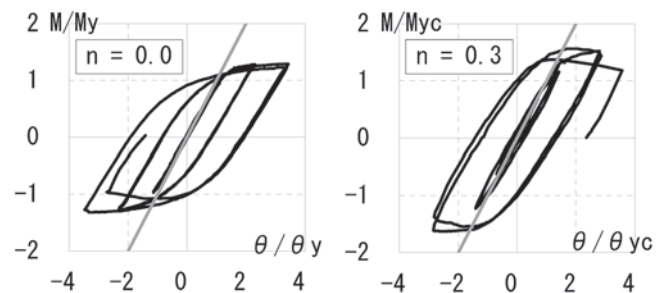


図10 圧縮曲げ試験結果の例

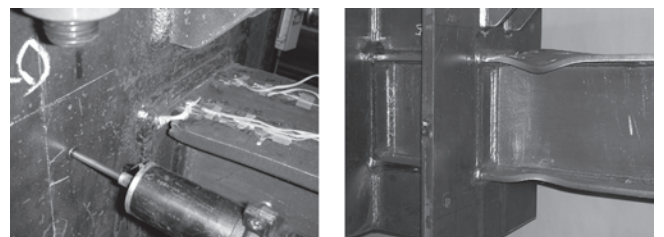


写真2 圧縮曲げ試験最終状態の例

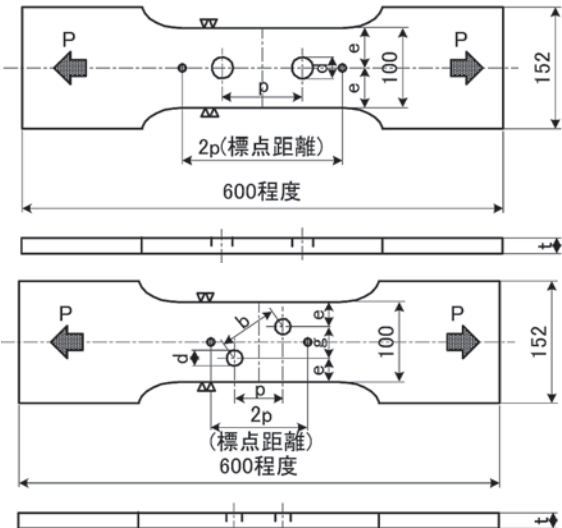


図 11 有孔板の引張試験体

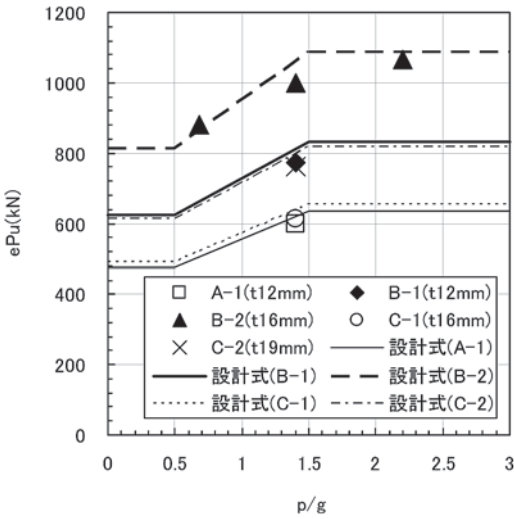


図 12 有孔板の引張試験結果

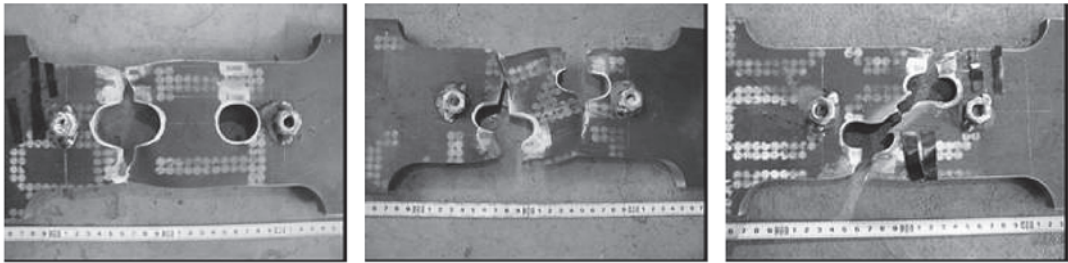


写真 3 有孔板の引張試験結果破断状況

引張試験後の試験体の破断状況を写真 3 に示すとともに、建築構造物の設計で使用している耐力評価式との対応を図 12 に示す。試験結果によれば、直列配置した試験片の場合の破断耐力は、孔欠損を考慮した鋼板の有効断面積に対応する強さと同等の性能が得られており、降伏比が 95% であっても応力集中により最大耐力が低下することはない。また、千鳥配置の場合においても、ピッチとゲージの関係から有効断面積を算定する評価式で概ね評価できることが確認できている。

3 震度 7 クラス無損傷構造システムの開発

3.1 構造システム

3.1.1 設計用地震力について

我が国において建築物を設計する際に遵守すべき建築基準法は、さまざまな性能項目に対して最低基準として定められているもので、耐震設計に関しては、震度 5 強までは主要構造体は弾性、震度 6 強の下限までは人命保護のため倒壊はしないが構造物の部分的な損傷は許容するものとなっている。したがって、現在発生危険度が高まっている最大規模の地

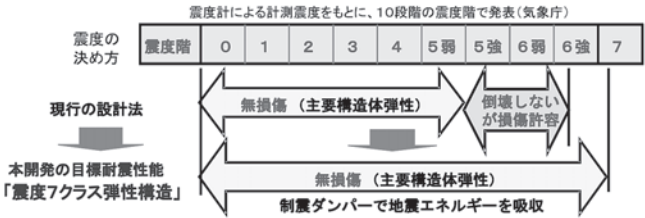


図 13 新構造システムの目標耐震性能

震 (震度 7 クラス) では、建物は倒壊もしくはかなりの損傷を受けることが予想される。そこで、今回の新構造システム建築物は想定される最大規模の地震に対しても主要構造体を弾性に留めることを最大の目標としている (図 13)。なお、建物に入力される地震エネルギーは、主要構造材は弾性であり塑性化によるエネルギー吸収はなく、低降伏点鋼などによるダンパーが地震エネルギーを吸収するものとして設計する。

この想定される最大規模の地震力については、現在、国土交通省／国土技術政策総合研究所と連携して検討を進めており、基本的な考え方は以下の通りである。

- ①工学的基盤の応答スペクトルとして与え、大きさは告示スペクトル「極めて稀に発生する地震動」の 1.5 倍以上とし、設計者が (建築主等と合意の上で) 設定する。

②中央防災会議による地震動波形を用いて、建築サイトで想定される直下型、海洋型地震に基づき時刻歴地震動（サイト波）を作成する。

なお、地表における震度を7クラスとするためには（震度7には上限がなく定量的な定義が困難なため、震度7の下限值に相当する計測震度6.5を目標としている）、「極めて稀に発生する地震動」スペクトルの2.2倍以上が必要となるが、建築サイトで想定される地震動は、図14に示すように、周期帯によっては、大きく上回る場合や下回る場合もあることから、一律に2.2倍するのではなく、告示スペクトル「極めて稀に発生する地震動」の1.5倍以上を最低基準とし、建築サイトで想定されるサイト波との併用により安全性を検証することが妥当であると判断している。

3.1.2 振動系分離型制振システムの提案

震度7クラスの地震に対しても主要構造体を弾性範囲内に留めるためには、地震による入力エネルギーの大部分を主要構造体以外で吸収する必要がある。そのためには、減衰装置等を用いて建物を高減衰化しなければならない。減衰装置によるエネルギー吸収は、一般に建物内で地震時に相対変位の大きくなる部分に装置を設置するのが効果的である。建物内に相対変位が大きくなる部分を意図的に設けた架構システムとしては、免震架構、連結制震架構、吊り制震架構等がある。今回は、これらの中で連結制震架構に着目して振動系分離型制振システムの検討を行った。

振動系分離型制振システムは地震力を負担する部分と人が居住・サービスに供する部分の構造体が独立に構築されており、この2つの構造体をダンパーで連結させた建築構造である（図15）。ここでは建物容積・重量の大半を占めている居住・サービスに供する部分をボディと呼び、建物外周に配置されて地震力を負担する耐震構造部分を外殻構造と呼ぶ。ボディに作用する地震力は、復元力と減衰力を持つダンパーを

介して外殻構造に伝達される際にエネルギーを吸収する。これにより、ボディに生ずる変形と応答加速度を大幅に低減することが可能である。

3.2 乾式組立部材・乾式接合による架構開発

外殻架構の開発においては、環境の世紀、持続可能な社会形成にふさわしい架構システムとすることを目的とし、構造部材は無溶接で組立てられる組立材としてリユース性に配慮している。さらに、組立材を用いた架構では、柱梁接合部はピン接合とすることが一般的であるが、本開発では新しい仕口システムとしてノンフランジ仕口（写真4）を使用することによって、非溶接で高剛性・高耐力な架構を実現することを狙った。

このノンフランジ仕口は、梁断面としてC形の形状の部材を使用し、C形の形状から柱接合部分の平板形状に連続的に変化させた「ねじれた形状」となる。この平板部を柱梁接合部分としてボルトで締結して剛接するものである。ノンフランジ仕口によって、従来のようなスプリットティなどの二次部材が不要であり、梁端に生ずる応力を柱に直接伝達することができるため、接合部の設計や管理が簡便化される。また、平板部は全面を摩擦抵抗面として利用できるため、ボル

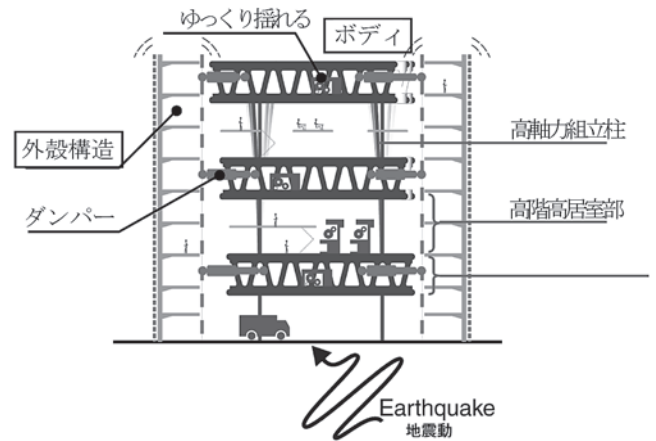


図15 振動系分離型制振システムの概念

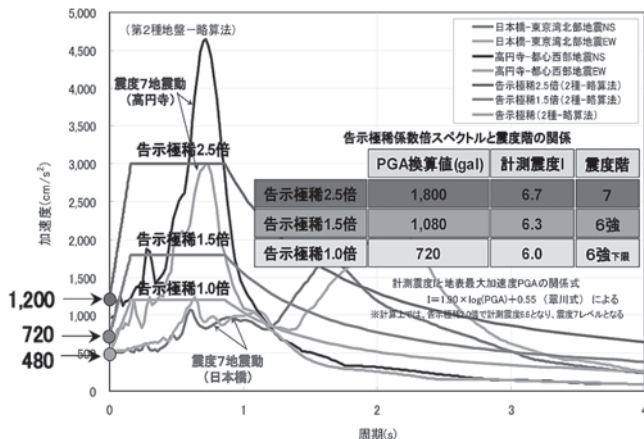


図14 現行設計スペクトルと震度7地震動スペクトルの関係

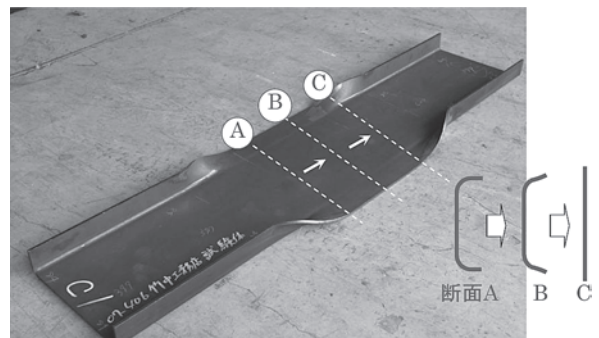


写真4 ノンフランジ仕口形状

ト配置の自由度が高く、ボルトの径・本数・鋼種を選択して接合部に要求される耐力を容易に確保することが可能である。このように高耐力が要求される高強度鋼部材の接合の場合、接合部にはノンフランジ仕口を使用することで部材強度を十分に伝達させることが可能である。さらに、組立部材との組合せや適用箇所は様々であり、図16は適用例を示したものであるが、これら以外にも新しい構造システムの創出が期待できる。

つぎに、ノンフランジ仕口の加工方法を図17に示す。鋼材には780N/mm²の強度を持つ開発鋼を使用するため加熱によって材料特性を変化させないように冷間プレスによって成形するものとして考えている。プレス成形では大きく分けて2つの工程があり、各段階でノンフランジ仕口特有の加工技術を使用している。

ノンフランジ仕口による柱梁接合部が高強度鋼材を使用した梁の曲げ耐力に応じた性能を十分に発揮できることを実験により検証している。実験では、ノンフランジ仕口を有するC形断面の梁と弦材を4本のL-200×200×16とする組立柱によって構築された十字形部分骨組を試験体(図18)を用いて、柱心から1750mmに位置する梁端部を逆対称に正負交番で繰り返し漸増载荷を行った。試験の結果は、図19に示すように、梁はC形断面の剛性(剛性②)を保持した状態で降伏荷重180kNまで弾性的に挙動した。また、図20より、この梁降伏荷重以下の範囲において柱梁接合部における高力ボルト摩擦接合部でのすべりは発生せず、ノンフランジ仕口

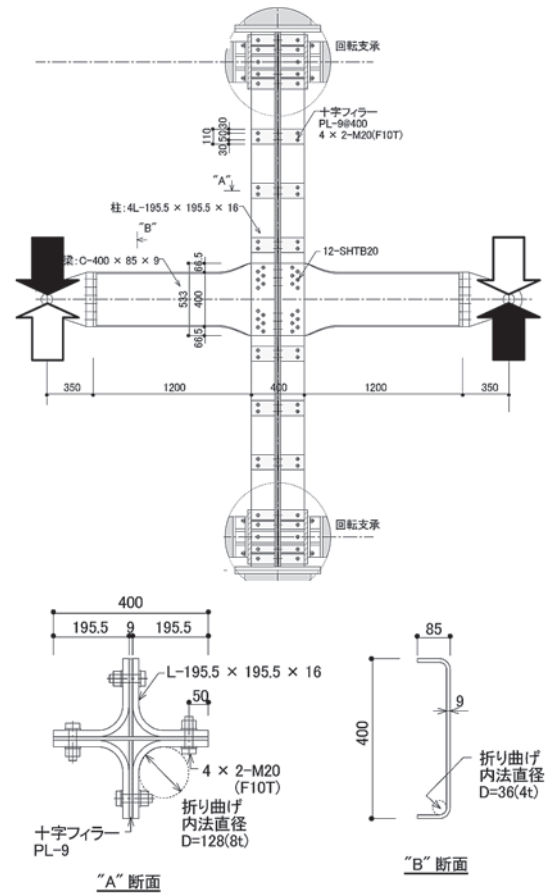


図18 十字型部分骨組試験体

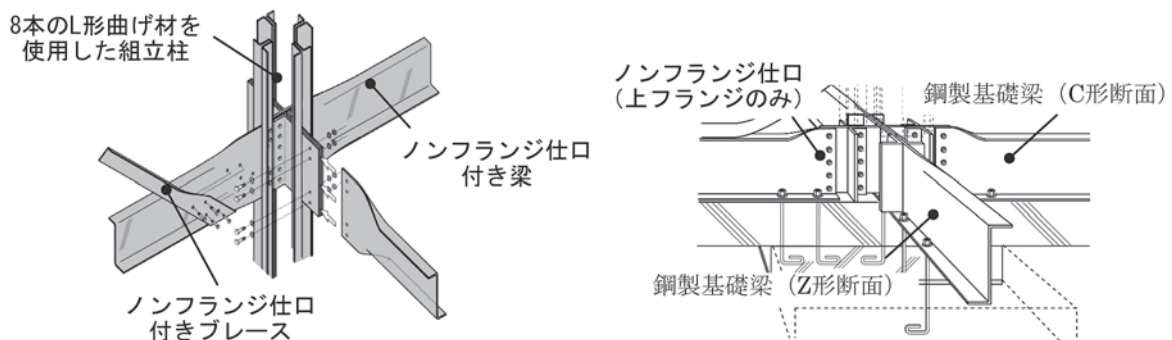


図16 ノンフランジ仕口の使用例

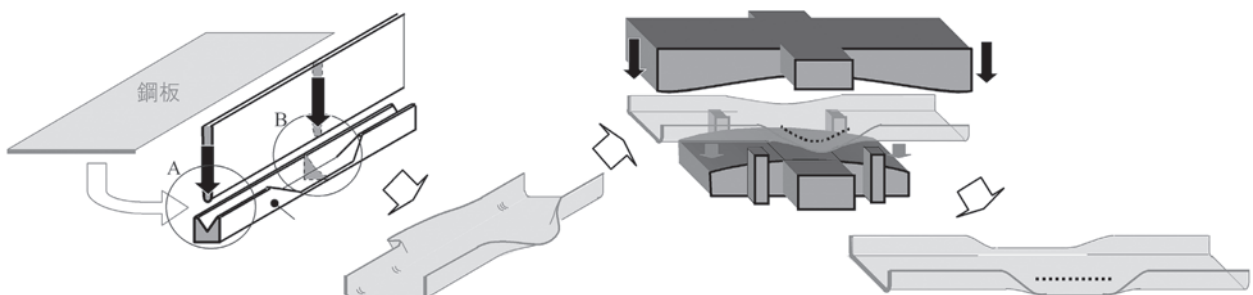


図17 ノンフランジ仕口の加工方法

による剛性の高い接合性能を確認できた。

3.3 実証実験

平成 20 年度は府省連携プロジェクトの最終年であり、これまでに開発してきた連結制振システムとしての外殻架構を対象として実大実証実験を計画している。実大実証試験の対象建物の概要は下記の通りである。

- ・規模：22.5m×17.5m×高さ 14.5m
- ・層数：ボディー部＝2 層、外殻部＝4 層
- ・固有周期：ボディー部＝2.2 秒、外殻部＝0.13 秒

外殻架構は柱に組立材を用い、溶接を一切使わない接合方式を採用している (図 21)。

実大の建物であるため実験項目は制約されるが、実験項目は以下の通りである。

- ・コンパクト AMD 加振による構造性能検証
- ・組立材に適合した生産計画技術検証
- ・リユースに対応した部材の履歴管理技術検証

4 おわりに

震度 7 クラスの地震に対しても建物の主要構造部材が損傷しない新構造システム建築物を目指して開発を進めてきたが、ここでは、弾性設計に適した鋼材として仕様を定めた 780N/mm² 鋼についてその性能と部材性能を紹介するとともに、乾式接合を主体とした構造システムとしての外殻架構に関する開発概要を紹介した。なお、ここで紹介していない従来形式の骨組形式も当然の事ながら設計は可能であり様々な建物用途に適した建築物が実現可能である。ただし、我が国では建築基準法が定められており、建築物の持つべき最低限の性能を規定しているのであるが、現実にはそれに示される性能が必要で十分な性能と誤解されることが多く、今回提案している「震度 7 クラス」の地震外力を想定するなど、より高い性能の建築物を実現する上での障害となっていることは否めない。

個々の建築物は個人の所有物であり、性能の良し悪しは個人が選定すべきものであるが、集団としての建築物、あるいは都市を考えた場合、全体として性能の高い建築物が望まれることに疑いは無い。大地震の度に報道される建築物の被害、人的被害、災害復旧の困難さに対して、より安全安心な社会の構築は喫緊の課題である。ここで紹介した新構造システム建築物をきっかけとして我が国の建築物の耐震性能が格段に高まり、地震災害が軽減され、結果として建物が長期利

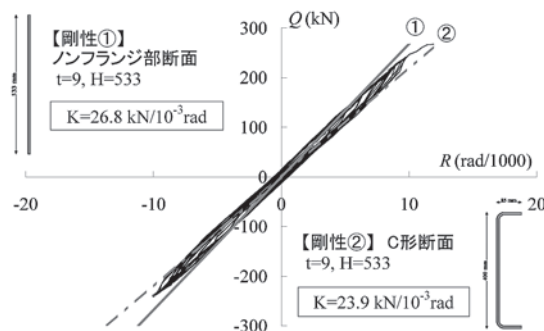


図 19 梁部材の荷重一部材角関係

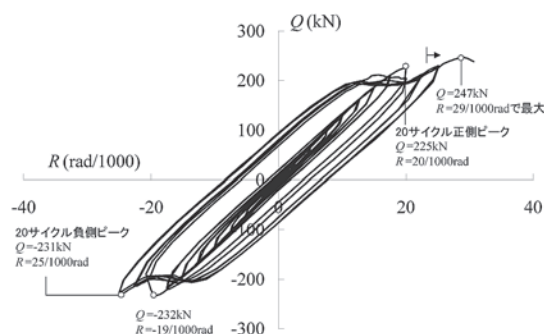


図 20 柱梁部分骨組の荷重一層間変形

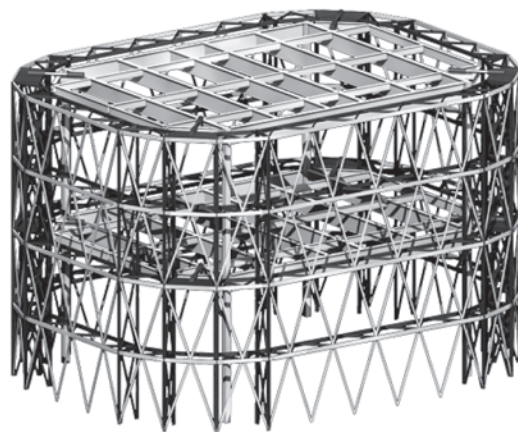


図 21 実証試験体鳥瞰図

用に資することが可能となれば、環境にも優しい社会作りに貢献できるものと期待する。

参考文献

- 1) 塩飽豊明, 吉田譲, 崎山哲雄, 福田多一郎: 大会学術講演梗概集, 日本建築学会, (2008.9), C1-613.
- 2) 難波隆行, 村上行夫, 藤沢一善, 一戸康生: 大会学術講演梗概集, 日本建築学会, (2008.9), C1-551.
- 3) 村上行夫, 難波隆行, 藤沢一善, 一戸康生: 大会学術講演梗概集, 日本建築学会, (2008.9), C1-553.

(2008 年 11 月 19 日受付)