

大規模地震に立ち向かう超高性能建築への挑戦

新構造システム建築物 研究開発プロジェクト



府省連携プロジェクト「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発」の実大実証実験が、茨城県つくば市の（独）建築研究所でこのほど公開された。震度7クラスの大地震でも建築物を無損傷に保つ長寿命の構造システム建築物を開発する同プロジェクトには、（社）日本鉄鋼連盟と（社）日本鋼構造協会が参画しており、新日鉄は建築物のメインフレームに必要な800N/mm²級高強度鋼と、その鋼材を接合する1,800N/mm²級高強度ボルト・接合技術を開発し、弾性架構システム技術の確立に貢献した。



- 震度7クラスの地震にも無損傷のスケルトン技術を確立
- 耐用年数200年で用途を変更可能
- 従来建物と同程度の鉄骨量で高耐震性を実現
- ライフサイクルCO₂や産業廃棄物発生量を大幅削減
- 社会資産としての建物評価法を確立

震度7でも無損傷の建築構造物を目指して

本プロジェクトは、内閣府の総合科学技術会議「ナノテクノロジー・材料分野の産業発掘の推進」を受け、官民協働で2004年度から始まった。内閣府、総務省、文部科学省、経済産業省、国土交通省の5府省のもと、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本鋼構造協会、(社)新都市ハウジング協会が研究主体となって、新構造システム建築物の開発を推進してきた(図1)。同プロジェクト発想の原点について、新日鉄建材開発技術部部長の永田匡宏は次のように語る。

「中央防災会議の報告によれば、首都圏直下型地震が発生した場合、経済的損失は112兆円にのぼります。最近の地震被害を見ても、2004年の新潟県中越地震、05年の福岡県西方沖地震、07年の新潟県中越沖地震、08年の岩手・宮城内陸地震と各地で頻発しています。大地震が発生すれば、都市の規模を問わず莫大な被害が想定され、復興には時間がかかります。特に新潟県中越沖地震では、自動車産業における機会損失が浮き彫りになりました。国民生活と日本産業にとって大きなリスクとなる大地震による被害を防ぐため、建築物の耐震性能を高めることは極めて重要な課題です。そこで高強度鋼と制震ダンパーを組み合わせた弾性架構によって、震度7クラスの大地震でも損傷しない建築構造物を目指しました」

耐震性だけではない多彩な特性を創出する

現在の建築基準法では、震度5弱までは全く壊れない構造設計を求めているが、震度5強～6強になると人命を守るため倒壊しないものの建築物の一部が曲がったまま戻らないなどの損傷発生は許容している。しかし、阪神淡路大震災を機に、被災後でも建築物を再使用できるという資産価値向上ニーズが高まっている。震度5と震度6強～7における地震エネルギー



新日鉄
建材開発技術部部長
永田 匡宏

の差は4倍以上あると言われており、震度7クラスの揺れを制御して無損傷を目指すことは、建築基準法のレベルをはるかに上回る耐震性能を追求するハードルの高い挑戦だ。さらに、日本の社会資本を取り巻く状況を見ると、社会資本総投資が頭打ちとなり、更新・維持コストの増大により新規投資が抑制されている。その中で、環境負荷が小さくライフサイクルコストの視点から安価

で、安心・安全、長寿命な21世紀にふさわしい都市インフラを構築する経済合理性も求められる。

こうした背景のもと、同プロジェクトでは、材料側ニーズと建築側ニーズをすり合わせ、鋼材強度を従来の2倍とし、耐震性能は震度7クラスでも主要構造体が無損傷、耐用年数は200年、主要部材・部品システムはスケルトン・インフィルとすることなどを目標に掲げた。新構造システム建築物研究開発合同委員会委員長として、本プロジェクトを推進してきた東京大学名誉教授の高梨晃一氏は次のように語る。

「私たちは、従来にない建築システムの創造を目指し、まず、構造躯体に十分な耐震性を持たせる高強度鋼材と、その鋼材を用いた高強度乾式接合技術の開発を行いました。その上で、居住空間の安全性向上の観点から、躯体を強くするだけでなく内部空間の揺れを小さくする、新しい発想による建築構造システムの開発を進めてきました」

その結果、本プロジェクトでは、部材の高強度・軽量化とそれに伴う輸送効率の向上、部材のリユース、製造・施工段階での省エネルギー・省力化を実現した。



新構造システム建築物研究開発
合同委員会委員長
高梨 晃一氏
(東京大学名誉教授)

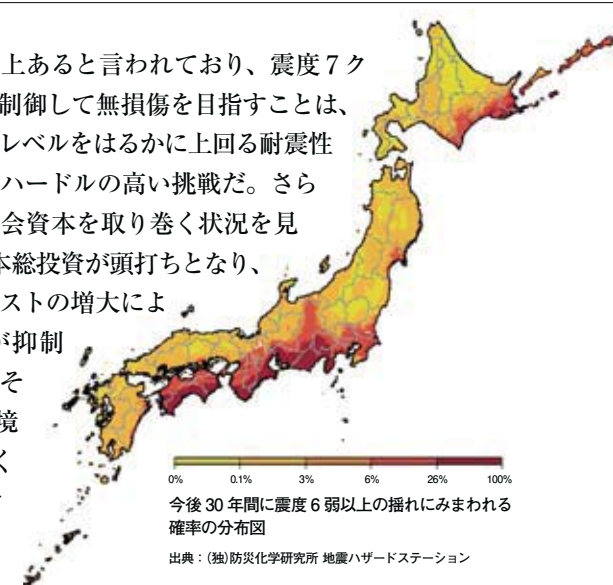
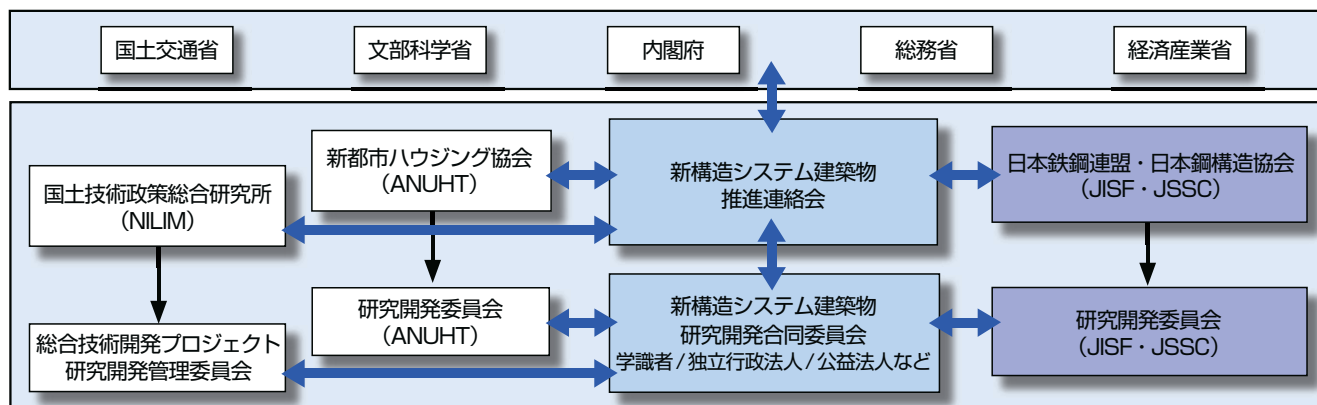


図1 府省連携・官民協働による研究開発推進体制



多彩な要素技術を融合して新たな建築構造物を

① 構造材料 — 鋼材と接合部の高強度化を目指す

800 N/mm²級高強度鋼の利用技術開発に踏み込む

新日鉄をはじめ日本鉄鋼連盟に加盟する鉄鋼メーカー4社は、震度7クラスの極大地震においても建築物を損傷しない弾性構造を合理的に実現するため、800 N/mm²級高強度鋼と1,800 N/mm²級高強度ボルトを用いた、乾式接合技術を開発した。現在の建築構造用鋼材の主流は引張強度400 N/mm²レベルであり、一気に2倍に高めた。

新日鉄建材開発技術部建築建材技術グループマネジャーの志村保美は、高強度鋼開発について次のように語る。

「鋼材強度を高めて柱や梁の断面はそのままの設計にし、風を受ける柳のようにしなやかに揺れて、地震動を逃がす。800 N/mm²級高強度鋼はこうした構造設計の思想に合致する技術です」

鋼材の高強度化のためには高価な合金元素を添加する

ことが多いが、同プロジェクトでは、コストやリサイクル性の観点から低合金鋼を前提として、高強度化を追求した(図2)。その結果、圧延時のTMCP(熱加工制御)技術の適用による結晶粒の微細化などを活用し、800 N/mm²級高強度鋼を開発することに成功した。

また、施工時の溶接熱による鋼材の強度低下を避けると同時に、施工効率やリユース性の向上を図るため、溶接によらない新たなボルト接合方法を考案し、接合に使用する1,800 N/mm²級高強度ボルトを開発。こうした構造用鋼材の利用技術に踏み込んだ技術提案が新構造システム実現の原動力となった。

「水素脆化」への挑戦で1,800 N/mm²級高強度ボルトを開発

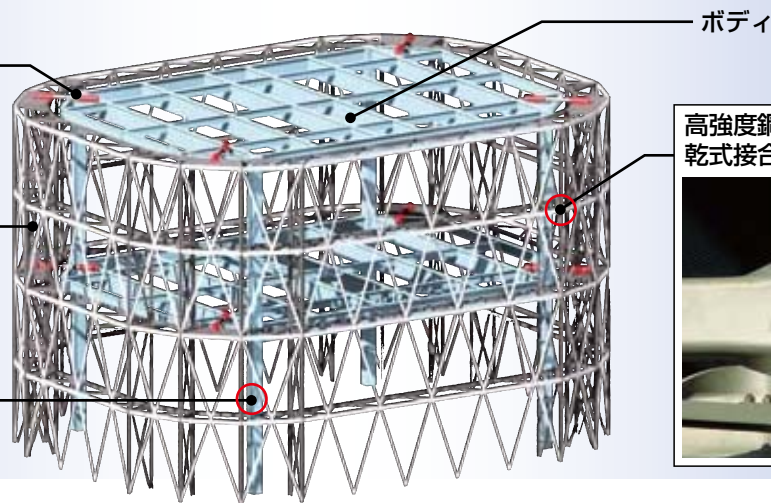
800 N/mm²級高強度鋼をボルト接合して構造体の強度を高める場合、従来のボルト強度(1,000 N/mm²級(10T))

新構造システム建築物概要

外殻とボディを連結する
ボディ制震ダンパー

外殻架構

座屈補剛式高軸力柱



高強度鋼と高強度ボルトを用いた
乾式接合技術



図2 鋼材の高強度化の現状と開発の方向性

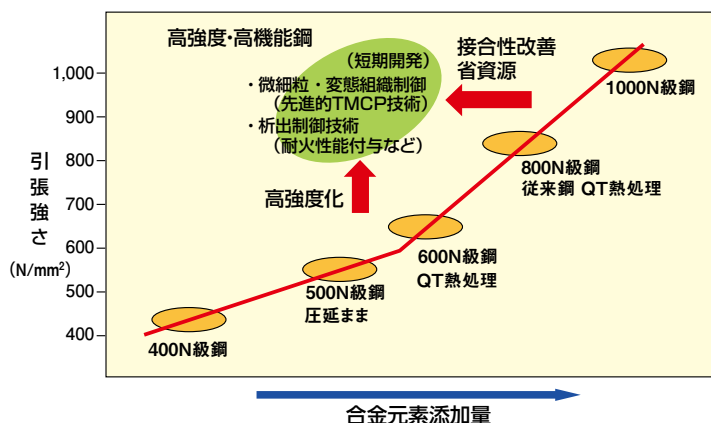
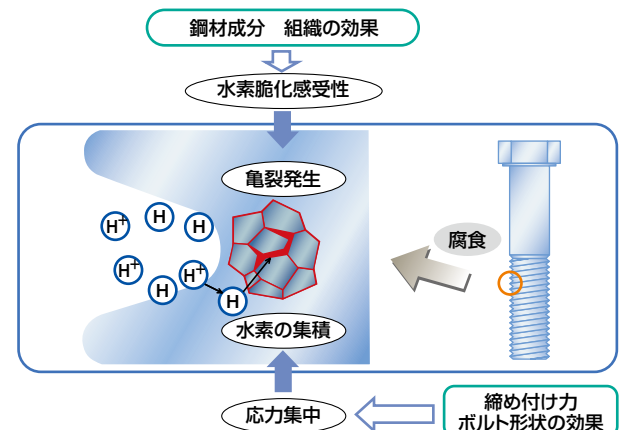


図3 水素脆化による破断の発生プロセス



では必然的に本数が増えてしまい、施工効率・コストの点で負荷が高くなる。現在の建築構造物では、溶接の熟練工不足や、接合部の信頼性向上ニーズにより、1,400 N/mm²級 (14T) のボルトが開発され市場に浸透しつつある。今回、新日鉄などの鉄鋼メーカーは14Tの開発で培った知見を活かし、1,800 N/mm²級 (18T) 高強度ボルトの開発に成功した。

ボルトの高強度化における最大のハードルは、使用中ある一定期間を経過した時点で突然ボルトが破断する現象 (図3) への対応だ。この現象は、腐食によってボルト内部に水素が侵入し、ねじ部など荷重のかかる部分に集積することで材料の強度が低下する「水素脆化」により起こる。したがって、高強度ボルトの破壊を防止するためには、水素の侵入をなくし、たとえ侵入しても集積・脆化をできるだけ抑える必要がある。技術開発本部技術開発企画部研究推進グループマネジャーの東清三郎は開発プロセスについて語る。

「水素脆化による破断を起こりにくくさせる方法として“張力が低ければ破断しないのではないか”という新たな切り口で、今回開発した18Tと16Tについて、さまざまな評価試験を行った結果、破断しない水素量の目安が明らかになり、水素脆化を制御する基盤を固めることができました (図4)」

「支圧接合」の積極的な利用で ボルト接合部のさらなる高強度化を達成

新日鉄ではさらに、ボルト軸部にかかる「張力 (軸力)」を通常仕様 (ボルト強度の0.7倍程度の引張張力) の2分の1に低減することで、18Tや16Tでも水素脆化しにくく、ボルト破壊の抑制効果が高いことを立証した。

これらの結果を基に、震度7クラスの地震を想定した本プロジェクトでは、「支圧接合」を積極的に設計に取り入れた「軸力低減型摩擦接合」を採用した。

一般的にボルト接合は、ボルトを締め付けて軸部に導入する張力を利用し、荷重レベルの低い自重や積載荷重など

に対しては、接触面に発生する摩擦力で力を伝達し (摩擦接合)、それ以上に大きな外力が作用する大地震時には摩擦力が切れ (接触面がずれ)、ボルト軸部と鋼板が接触して軸部の支圧・せん断により力を伝達する (支圧接合) という、摩擦接合主体の設計がなされている (図5)。その際、支圧接合の接合部への損傷は許容した耐力設定がされており、本プロジェクトが目指す「無損傷設計」には合致していなかった。新日鉄では、開発した高強度鋼材と高強度ボルトを用いた接合部について構造実験とFEM解析 (※1) による検討を積み重ねることで、本プロジェクトの思想に沿う支圧接合耐力を設定し、利用法も含めた総合的な提案を行っている。

「摩擦接合主体から、材料の高強度化が接合部の強度向上に直接結びつく支圧接合主体の形式へと大胆に発想を転換させました。その結果、軸力を低減して水素脆化によるボルト破壊を防止しつつも従来並みの摩擦接合性能は保持させ、かつ、震度7クラスの地震に対しては接合部を損傷させない範囲で支圧接合を積極的に利用して材料の高強度化も有効に活用するという、新たなコンセプトを見出しました」 (東)。

こうした新たな試みにより接合部の強度は1.5倍になり、18Tを用いた支圧接合の強度は10Tを使用した摩擦接合の強度に比べて2.7倍向上した。高強度ボルトと支圧接合の組み合わせは、ボルト本数低減による施工効率化や、鋼材リユース化の促進への大きな布石となった。

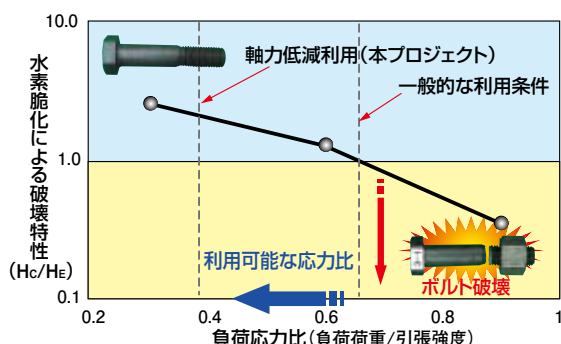


新日鉄
建材開発技術部
建築建材技術グループマネジャー
志村 保美



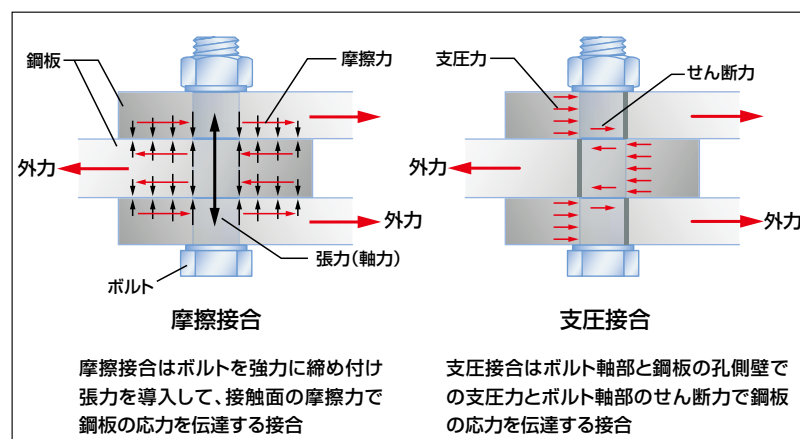
新日鉄
技術開発本部技術開発企画部
研究推進グループマネジャー
東 清三郎

図4 水素脆化によるボルト破壊の特性評価



負荷応力比と水素脆化による破壊の関係を調査し、ボルトが破断しない水素量の目安と張力の関係が明らかになった。
Hc: 水素脆化による破壊を起こさない上限の拡散性水素量
He: 環境から鋼材中に侵入する水素量

図5 摩擦接合と支圧接合



※1 FEM: Finite Element Method. 数値解析法の一つ。物体を小さな要素に分割し、それぞれの要素に負荷される力や変形の計算結果を足し合わせることで全体の挙動を近似値として求める手法。

② 構造設計 — 無損傷弾性設計を実現

本プロジェクトでは、新たに開発された800 N/mm²級高強度鋼と乾式接合技術を使って、震度7クラスの地震でも損傷しない架構を実現する「振動系分離型制振システム」が開発された。

同システムは柱支持で地震力を受け流す構造の柔軟なボディと、それを囲む軽量で剛性の高い外殻構造で構成されている(図6)。柔構造と剛構造の地震に対する揺れの違いを利用することで、建築物の振動エネルギーを制震ダンパーで吸収して揺れを抑え(図7)、大地震における居住者の安全確保と建築物の損傷を防ぐことが可能になった。材料・接合技術と構造設計の融合について、(社)日本鋼構造協会(JSSC)建築システム委員会委員長の油川真広氏は次のように語る。

「外殻構造に高強度鋼を全面的に採用し、スマートな部材で地震力の大部分を負担できる架構(骨組み)を構成しました。また、鋼材のリユースを前提に、溶接をしない、高強度ボルトを用いた乾式接合を採用したことで解体容易性を確保するとともに、プレート鋼材を曲げ加工した部材を用いた組立材(写真1中央)で全体を構成する設計・施工技術確立しました。一方、高強度鋼をボディの柱に使うことによって大きな揺れを弾性変形(形が元に戻る)で受けられるようになり、小断面でロングスパンの床架構が実現しました」

実用化に向け、社会資産建築の有用性をアピール

本プロジェクトでは、今年1月に茨城県つくば市の建築研究所で実大実証実験を公開し、その高度な技術成果



JSSC 建築システム委員会
委員長
油川 真広氏
(株)竹中工務店 エンジニアリング
本部副本部長



新構造システム建築物
推進連絡会主査
最上 公彦氏
(株)竹中工務店 常務取締役

に対して建設事業者やエンジニアなど多くの関係者から高い評価を受けた(写真1)。新構造システム建築物推進連絡会主査の最上公彦氏は次のように総括する。

「新構造システム建築物は、主に次のような狙いがありました。第1に高強度鋼を使って、建物の骨組みの耐久・耐用性を高めて『安心・安全』を満たすこと、第2に用途機能を変化できる『内部可変構造』を取り入れること、第3に鋼材を『3R(リデュース・リユース・リサイクル)』することです。これらを実現するため、まずシーズ側である鉄鋼業界と、ニーズ側である建設業界が共通の基盤をつくり、技術開発が実現する効果として、『社会資産建築』という考え方を打ち出しました。日本の建築物は社会資産として半永久的に残るものがほとんどありません。理由はさまざまですが、地震によって資産価値が失われていることも大きな要因の一つです。そこで『社会資産建築』イコール『震度7クラス弾性構造』というキーワードに置き換え研究開発に邁進し、5年間で相応の成果を挙げることができました」

図6 振動系分離型制振システムの基本概念

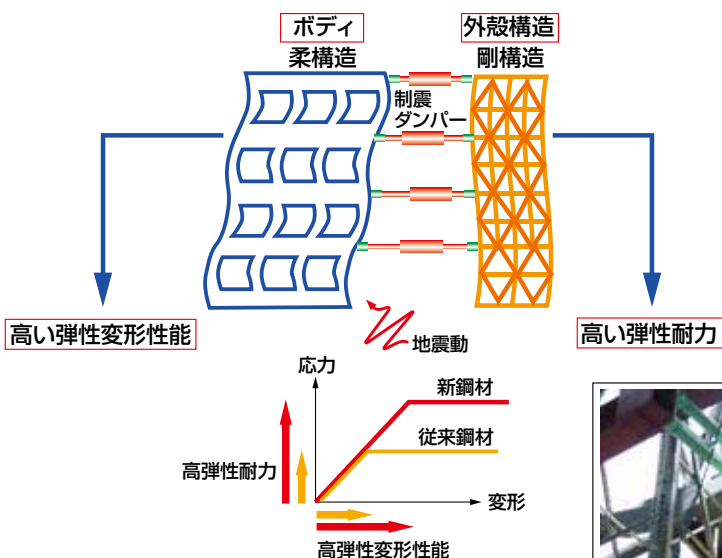
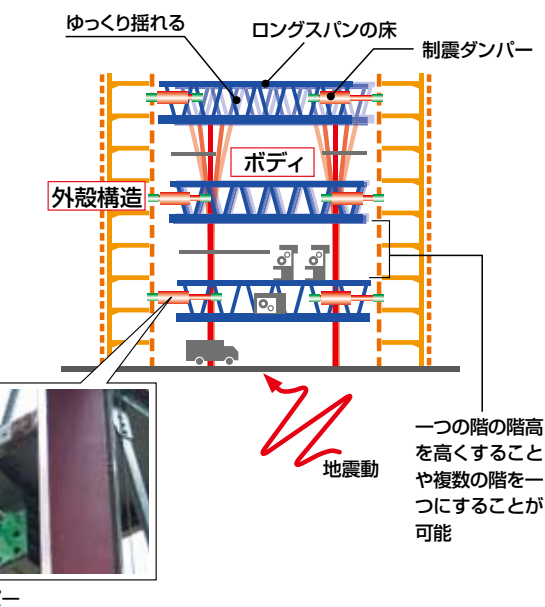


図7 支持構造タイプの架構システム





ANUHT 研究開発委員会
委員長代理

山崎 雄介氏

(清水建設(株) 技術研究所副所長)

実用化に向けて、建設業界では技術開発成果の総合的活用が本格的に始まる。(社)新都市ハウジング協会(ANUHT)研究開発委員会委員長代理の山崎雄介氏は次のように展望を語る。

「超長期における所

有権のあり方、建築確認の方法、税制など社会的な仕組みが整っていない状況で、新構造システム建築物のメリットを認知させていくのは大変難しいことですが、超長期建築としての構造的な特徴を具体的に提示して、早期の実用化を目指していきます。新しいエネルギーシステムや交通物流システムなど、日本の産業界でさまざまな最先端社会のビジョンが示され、2015年ぐらいから社会インフラは大きな転換期を迎えると言われています。この変化を捉えて、業界全体で社会資産建築としての有用性をアピールしていきたいと考えています」

材料・設計の両輪で新発想の建築構造を広める

震度7クラス弾性構造設計技術を、躯体寿命200年を想定した10階建ての新構造システム建築物に採用した場合、従来のRC10階建てに比べて、建物の建設から運用、解体までのライフサイクルを通して排出されるCO₂の量は31%削減され、廃棄物を84%抑制できることが明らかになった。さらに今回、鉄骨部材の製造から施工、解体、リユースまでの段階において、ICタグを活用した生産・履歴情報管理技術を構築したことで、3Rの中で対策が最も進まなかったリユースが可能となり、建設業界における環境負荷低減の加速化が期待されている。

「7月にシンポジウムを行い、今秋には市場への新たな展開に踏み出したいと考えています」(最上氏)。

今後のビジョンと新日鉄への期待について新構造システム建築物研究開発合同委員会委員長の高梨氏は次のように語る。

「多くの関係者が新たな発想による構造システム建築物を実

現しようと努力を重ねて開発を成功させました。今後は実際の建築物への適用を早急に実現したいと思います。新日鉄には普及の前提となる高強度鋼材の安定供給を期待するとともに、建築産業の循環モデルを構築するため、鋼材リユースが可能となるシステム整備を先導していただきたいと思います」

新日鉄プロジェクト開発部長の廣岡成則は今後の抱負を次のように語る。

「新構造システム建築物は鉄を使用するからこそ可能な構造と認識しており、これによってわが国の建築資産がより付加価値の高いものに転換されることを強く期待しています。ただし、そのためには、新構造システム建築物の高い性能に関する適切な社会評価を得ることが大きな課題であり、日本鉄鋼連盟としてもこの建築物の意義について、強く発信するなど活動していきたいと考えています」

写真1 実証実験建物(複合建築モデル、高機能庁舎モデル)



組立柱梁乾式接合構造(外殻架構)2階建て



C形の形状から柱接合部分は平板形状に変化する「ねじれた」仕口を開発



従来型骨組4階モデル

お問い合わせ先 新日鉄 建材開発技術部 建築建材技術グループ TEL 03-3275-6720