

共同研究

建築鋼構造のリユースシステムに関する研究

岩田 衛¹⁾ 藤田 正則²⁾ 三宅 康彦³⁾
森 正忠⁴⁾ 木村 修⁵⁾

Reuse System of Building Steel Structures

Mamoru IWATA¹⁾ Masanori FUJITA²⁾ Yasuhiko MIYAKE³⁾
Masatada MORI⁴⁾ Osamu KIMURA⁵⁾

1. 序

わが国の二酸化炭素排出量の1/3は建設関連と推計されており、次世代が良好な生活を維持するために、建設業界が果たすべき役割は大きい。こういった背景から、日本建築学会は、1997年の気候変動枠組条約京都会議(COP3)に呼応して「新しい建築物でライフサイクルCO₂ (LCCO₂)を30%削減、耐用年数を3倍の延伸を目指すべき」との声明を発表した。これと並行して建築分野におけるライフサイクルアセスメント(LCA)に関する研究や、循環型社会に対応した企画・設計・施工における各種の提言や取り組みが行われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

建築構造のライフサイクルにおける環境負荷を削減するためには建築物そのものの「長寿命化」、部材レベルでの長寿命化といえる「リユース」、材料レベルでの長寿命化といえる「リサイクル」が挙げられる(図1)。

建築鋼構造のライフサイクルにおける環境負荷削減のシナリオによると構造躯体を1000年間使用するシナリオ、構造躯体を100年ごとに建替え、鉄骨部材をリユースまたはリサイクルするシナリオは、構造躯体を100年ごとに建替え、全てを廃棄するより、各々約50%、30%、20%のLCCO₂の削減が可能である⁶⁾⁷⁾。このように建築鋼構造における環境

負荷削減にとって、「長寿命化」は最も重要であるが、物理的、意匠的、経済的あるいは社会的な要因により、解体しなければならない建築物は多く存在する。この場合、建築鋼構造では、部材をスクラップにして「リサイクル」することがなされてきたが、スクラップ手間及び電炉メーカー経営の問題から、この鉄リサイクルも転換点にたたさされている。

以上のことから、現在までに市場が成立していない「リユース」という方策の実現を検討してみる必要性が生じている。最近ニーズが出てきている期限付き建築物や短寿命建築物に対しても、建築物全体のリユース、少なくとも部材レベルでのリユースは極めて有効である。鋼構造部材の場合、スクラップにおいても溶融するためのエネルギーが必要であり、それに伴い多量のCO₂も発生する。その点、リユースは、解体、輸送、手直しの付加エネルギーであり、環境負荷が小さい⁸⁾。

本来、鋼材は再加工できる唯一の構造材料であり、解体可能な特別なジョイントを有していなくても、切断、穿孔、溶接等の若干の再加工でリユースできる。また、鋳と大地震時の塑性化以外に経年変化が少なく、リユース材として優れた材料特性を備えている。これらの経年変化に対しても、鋳には定期的な塗装で対処できるし、大地震時の塑性化には耐震設計の一つとして実用化されている損傷制御設計を用いることにより、エネルギー吸収部材を特定化することで、主要な部材を弾性範囲に留め、対処できる⁹⁾。

一般鉄骨構造を対象としたリユースを推進するにあたっては、一品受注生産である建設業全体を横断的に眺め、インターネットによる情報技術を駆使することが不可欠である。すなわち、建築鋼構造のリユース材の質と量を確保し、必要な場所と時間に所定の品質のリユース材を迅速に供給するための情報ネットワークが必要である¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。このモ

1) 教授、建築学科

Professor, Architecture and Building Engineering

2) 新日本製鐵株式会社

Nippon Steel Corporation

3) 大和ハウス工業株式会社

Daiwa House Industry Co., Ltd.

4) コスモ技研株式会社

Cosmo Engineering Co., Ltd.

5) 三菱商事株式会社

Mitsubishi Corporation

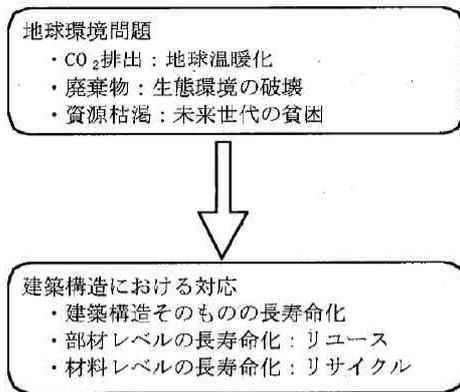


図1 建築構造の環境性

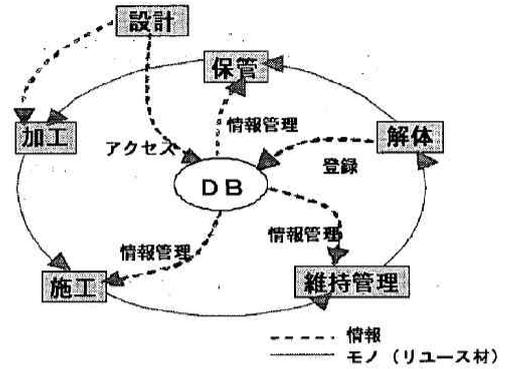


図2 リユースフロー

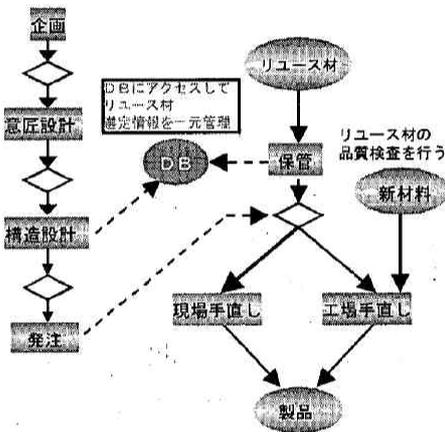


図3 設計・加工フロー

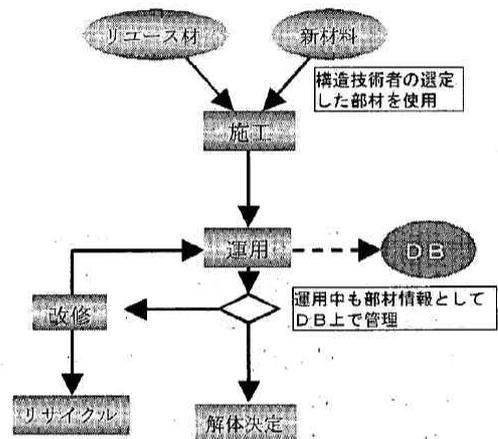


図4 施工・維持管理フロー

デルを基に一般鉄骨構造における部材・部品の情報のデータベースを構築し、将来的な部材のリユース化の実現への道を示したいと考える。しかしながら、リユース材が既存の流通と同様に循環するためには、従来の生産・製品の供給という「動脈産業」に対して、その処理、再生、再利用を行う「静脈産業」の確立が必要であるものの、これを実現するための技術やしくみが確立されていない状況にある¹⁴⁾。

本論では、環境負荷を削減するために「建築鋼構造のリユースシステム」の提案とその実現化の方法について述べる。ここで、リユースシステムとは、リユースフローにおいて、設計・加工・施工・維持管理・解体・保管の一連のサイクルにおいてリユースビジネスを成立するためのしくみであり、その全体のシステムをさす。その実現化にあたっては、1)リユース材の調査、2)リユースマネジメントモデル、3)データベースの構築方法、4)ストックヤードの設置方法、5)丁寧な解体方法、6)リユース材の性能評価方法、7)リユース材の加工方法、等を研究開発する必要がある。さらに、部材をリユース材として使用しやすいサステナブルビル構造を実現する必要がある。

2. 建築鋼構造におけるリユースシステム

2.1 リユースフロー

建築鋼構造におけるソフトの情報とハードとしてのモノ（この場合はリユース材）の情報のリユースフローを図2に示す。点線はソフトの情報を表し、実線はモノの流れを表している。リユース材はデータベース（以下、DBという）を介して、設計・加工・施工・維持管理・解体・保管の一連のサイクルで循環する。

(1)設計・加工フロー

リユース材に着目した設計・加工フローを図3に示す。設計段階では、構造設計者は、部材の選定にあたってリユース材のDBにアクセスして部材を決定する。図には示していないが、リユース材のDBは必ずしも解体され保管されているものではなく、現在使用中の建築物で、解体予定のものを先取りして考えてもよい。リユース材だけでは部材の選定が充分でない場合には新材料を使用する。ここで、新材料とはリユース材として使用せず、新規に製造する材料をいう。

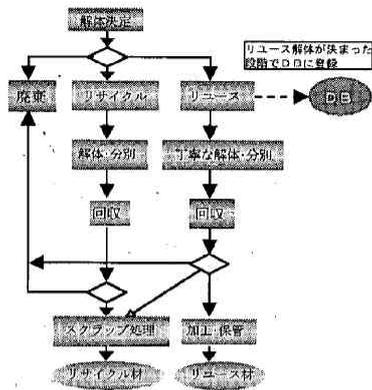


図5 解体フロー

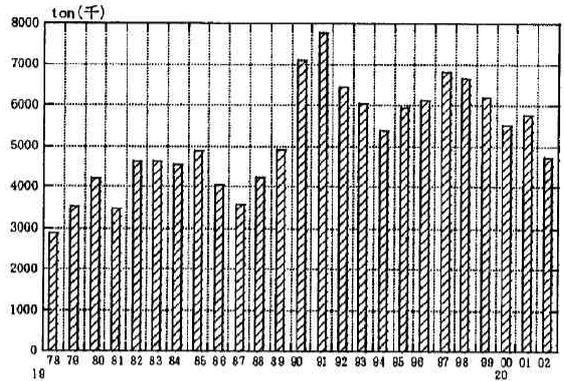


図7 1978～2002年の圧延H形鋼の生産量

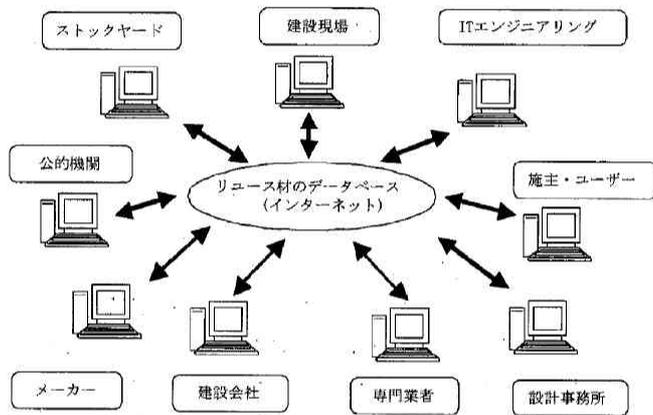


図6 リユース材のデータベースの利用者

加工段階では、リユース材のみ、またはリユース材と新材料の併用となる。発注されたリユース材を現場での手直し、あるいは工場での手直しを行い、仕様に合致した部材に仕上げて製品とする。ストックされているリユース材はDB上の情報として一元管理されているが、部材自体は各地区の保管場所で保管される。

(2) 施工・維持管理フロー

リユース材に着目した施工・維持管理フローを図4に示す。施工段階では、施工者は設計図書をもとに構造技術者の選定した部材を発注する。ここで、製品はリユース材のみ、またはリユース材と新材料の併用のいずれかである。維持管理段階では、建物の運用中に地震などで部材に損傷を受けた場合や建物の使用目的が変更になる場合には、改修してリサイクル、あるいは解体を決定する。

(3) 解体フロー

リユース材に着目した解体フローを図5に示す。建築主は解体後の部材の扱いを決定する。解体の決定後、リユース材とする場合、リユース材としてDBに性能に関する情報を登録する。その際、部材の性能を評価・判定し、リユース材の有無を決定する。地震などで塑性化している部材はスクラップ処理して、リサイクルする。なお、リユース

材として使用するためには、より丁寧な解体・分別を行わなければならない。すなわち、回収されたリユース材は、部材の劣化状態に応じてリユース、リサイクル、廃棄のいずれかのフローとなる。

2.2 リユースシステムのデータベース (DB)

建築鋼構造の長寿命化は、最も環境負荷を削減することができるものであるが、実際には社会的要因等により長寿命化を目指した建築物においても設計寿命が達成できない。やむなく解体する場合でも建築鋼構造をリユースすることにより環境負荷を削減できる。これは、建築鋼構造における部材・部品のDBを構築することにより可能となる。

リユース材はDBを介して、設計・加工・施工・維持管理・解体・保管の一連のサイクルで循環する(図2)。リユース材の利用者は建築主・設計事務所・施工者・ユーザー等の不特定多数であり、各々必要なリユース材の情報に関してインターネットを介してDBへアクセスする(図6)。建築主は、リユース材の探索やリユース材の使用を設計者に依頼する。構造設計者はDBにアクセスしてリユース材及び新材料の併用も含めて選定する。リユース材の加工者は、発注されたリユース材を工場あるいは現場での手直しを行い、適した部材に仕上げて製品とする。施工者は、リユース材またはリユース材と新材料を併用して施工する。リユース材はDBにおいて一元的に管理され、各地区のストックヤードで保管される。維持管理段階では、建築物の運用中に地震等で部材に損傷が見られるときや建築物の使用目的が変わるときに改修して使用するか、解体するかを判断する。解体するときには、その時点でリユース材としてDBに登録する。地震等で塑性化している部材はスクラップ処理してリサイクルする。

3. リユースシステムの構築方法

3.1 リユース材の調査

(1) リユース材のストック

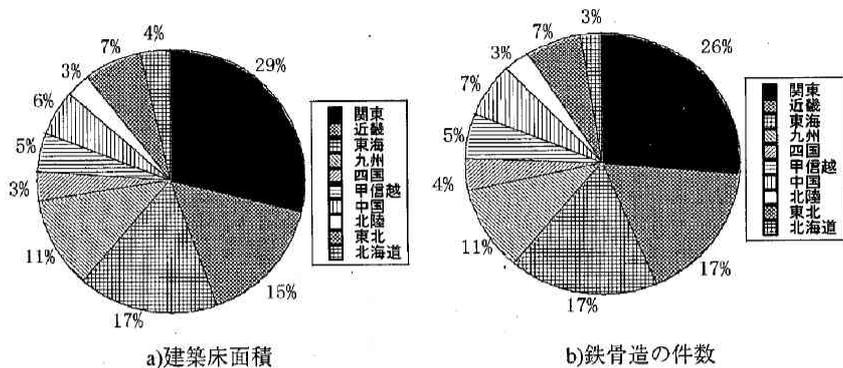


図8 鉄骨造の各ブロックの割合

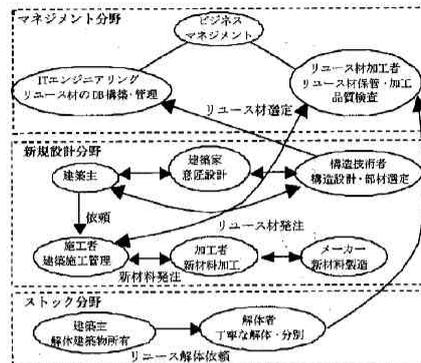


図9 リユースマネジメントモデル

圧延H形鋼は、ビルトアップH形鋼やボックス断面鋼に比べて、JISやISOで規格化されたサイズ体系により製造されているので、リユース材として取り扱い易い。1978～2002年に製造された圧延H形鋼の生産量を図7に示す¹⁹⁾⁶⁾。これによると、建築物に使用されている圧延H形鋼は1億3千万トン以上蓄積されていることになる。建築物が社会環境や敷地条件の変化等により30年程度で解体されるとすると、毎年400万トンのH形鋼がスクラップとなる。現在、このスクラップは、電炉にてほとんど100%リサイクルされているが、このうち、25%程度、主として工場・倉庫に利用されている無耐火被覆の圧延H形鋼がリユース材として適応できると推定される。

鉄骨造の各ブロックにおける建築床面積と鉄骨造件数の割合を図8に示す¹⁹⁾。建築床面積と鉄骨造の件数の割合は各ブロックにおいて類似の傾向を示す。リユース材の市場は関東、近畿、東海ブロックに集中していることがわかる。

(2) リユースビジネス

リユース材の静脈産業を確立するためには、これが事業として成立するような社会環境の整備、財政的、法律的なバックアップが必要である。例えば、グリーン購入法、CO₂税導入、ISO14000の取得企業に対する税制優遇制度、地球環境技術開発に対する助成等である⁷⁾。損傷制御設計⁹⁾した建築鋼構造に対する地震保険の導入も望まれる。これらの静脈産業が確立されると、安価なリユース材の安定的な供給を可能となる。一方では、リユースビジネスが成立するためのマネジメントモデルを構築する必要がある。

3.2 リユースマネジメントモデル

リユースマネジメントが経済的に成立するために、図9に示すモデルを提案する(以下、リユースマネジメントモデルという)。ここで、リユースマネジメントは情報技術を利用した建築鋼構造のリユース化に関するシステム全体をさす。モデルは「マネジメント分野」、「新規設計分野」、「ストック分野」から構成されている。リユースフローを3分野で

位置付けることで、リユースビジネス成立のための情報の役割が明確になり、DBを構築できる。

(1) マネジメント分野

リユースマネジメントモデルにおいて中心となるビジネスマネジメントはリユースビジネスを管理し、情報技術(以下、ITという)エンジニアリングとリユース材加工者を統括する。ITエンジニアリングは、リユース材の性能評価、リユース材の情報を一元的に管理するシステム、並びリユース材の性能に関する情報をDBとして構築し、その維持管理を行う。リユースシステムは不特定多数の設計者等によるDBへのアクセスのため、インターネットを介するものとし、常時、リユース材に関する新しい情報に更新する。リユース材加工者は、リユース材の加工・保管・品質検査を行う。それら情報をITエンジニアリングの有するリユース材のDBに登録する。これらを「マネジメント分野」と位置付ける。

このように、マネジメント分野において、インターネットを介して情報ネットワークを形成することで、地理的・時間的な制約を受けないようにすることができる。

(2) 新規設計分野

ここでは、建築主から依頼を受け建築家が設計し、構造技術者が部材の選定にあたる。この段階で、構造技術者はリユース材の使用の是非を決定する。リユース材を使用する場合には、ITエンジニアリングが管理するリユース材のDBにアクセスし、その選定を行う。次に、建築主は、設計図書を基に建築を施工者に依頼する。施工者は設計図書に基づき、リユース材加工者にリユース材を、新材料の加工者に新材料を発注する。新材料は従来どおり、メーカーが製造する。なお、施工者は、設計変更やリユース材として想定した建築物の解体時期の変更等の理由でリユース材が入手不可能になった場合、新材料で対応する旨をあらかじめ建築主と設計者から同意を得ておく。

このように、新規設計分野において、リユース材加工者は新材料に加えて、リユース材の加工を行うことが可能となり、ビジネスの選択が増えることになる。

(3)ストック分野

リユース材として使用するためには、丁寧な解体・分別を行う必要がある。解体されたリユース材は、品質検査を受け、リユース材加工者によって保管される。保管されたリユース材の性能に関する情報は、ITエンジニアリングの有するDBに登録される。ビジネスマネジメントは、リユース材として想定できる建築物の建設地、解体時期、部材の量等を把握し、リユース材の保管場所や経済性を踏まえて総合的にリユース材を設定する。これをストック分野と位置付ける。ここにおいて、建築主は、解体の対象となる建築鋼構造の性能に関するDBの活用により、ビジネスの選択が増えることになる。

3.3 データベースの構築方法

(1)リユース材と情報

情報の種類には、数値化される情報、数値化されにくい情報、感性を伴う情報がある(図10)。数値化される情報は、リユース材の形状・検査等の性能に関する情報や部材コード等の管理情報である。数値化されにくい情報は、リユース材の加工要領書・施工要領書等のドキュメントや標準ディテールに関する情報であり、インデックス等によりコード化を必要とする。感性を伴う情報は、リユース材の形状や劣化等の視覚に関する情報であり、デジタル化により対応できる。これらは、ソフトに関する情報である。ハードとしての情報は、リユース材そのものとそれらに添付されたリユース材の部材コードである。DBの利用フローを図11に示す。DBは共通DBとプロジェクトDBに分類できる。共通DBは、リユース材に関する共通データであり、管理情報・性能情報・検査情報をさす。プロジェクトDBは、共通DBから連動して作成されるデータで、リユース材の受注が確定された段階で作成される。

ビジネスマネジメントは、構造設計者等の利用者に対してインターネット上を通して共通DBによりリユース材の情報を提示する。利用者はそれらを元に設計条件や建設地等を考慮してリユース材を選定し、必要数量・納期等に関して見積依頼を行う。ビジネスマネジメントは、仕様と諸条件を元にリユース材に関する見積書を利用者に提出する。そこで、利用者の契約が成立すると、インターネット上で注文に対して受注を確認し、プロジェクトDBとして登録する。次に、発注及び配送情報を抽出及び配送計画の策定を行い、配送業者に配送指示表を送付する。配送指示表には、リユース材とストックヤードの管理情報が表示されている。ストックヤードにはプロジェクトDBとして登録されたリユース材が保管されている。

(2)データベース構築の条件

建築鋼構造におけるリユース材のDBを構築するための条件として下記があげられる。

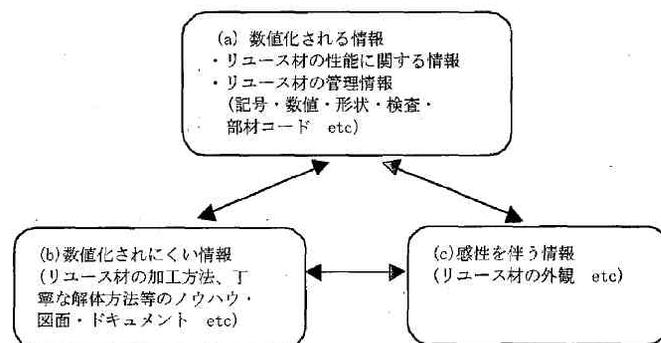


図10 リユース材の情報の種類

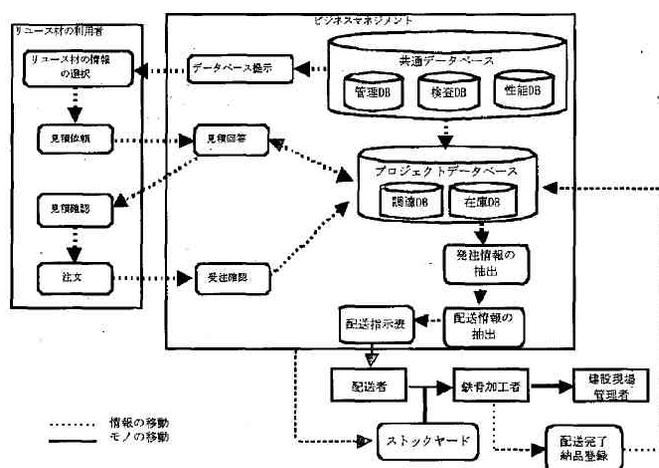


図11 データベースの利用フロー

a) リユース材の情報の明確化

生産プロセスで生成される情報は、ソフトまたはハードからなり、その種類及び量において膨大である。設計においては建築主・意匠設計者・構造設計者・CADオペレータ等、施工においては施工管理者・溶接工等の多岐に渡る。これらの情報は使用するヒトによって情報が不要であったり、各生産プロセスにおける情報の重み付けは異なっている。例えば、新材料またはリユース材の選定方法に関する情報は設計者にとって重要度が高いが、施工者にとっては重要度が低い。これに対して、新材料またはリユース材の調達納期や品質等の情報は施工者にとって重要であるが、設計者にとって重要度は低い。すなわち、設計者にとって何を建てるかに関する情報が重要となるが、施工者にとってどのように建てるかに関する情報が重要である。また、生産者にとって何に使われるか、どのように生産するかに関する情報が重要となる。

このように設計・加工・施工の各生産プロセスの情報の役割を明確にすることは、リユース材の情報を決定を容易にする。

表1 データベースの利用形態

方式	特徴	ソフトのインストール先	利用者
LAN方式	ファイル共有型	クライアント側	利用者が限定
C/S方式	リモートサイトからのアクセス	サーバー側	利用者が限定
Web方式	インターネット経由でアクセス	サーバー側	不特定多数

注) クライアント : データベースの利用者
 サーバー : データベースの管理者

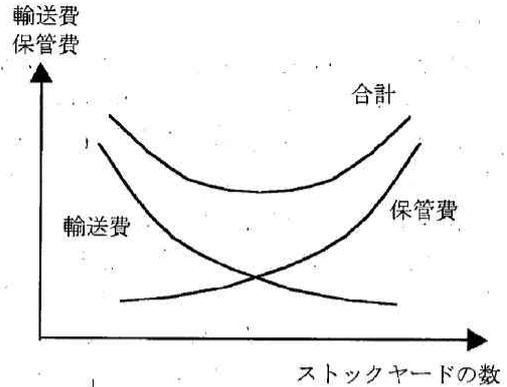


図13 ストックヤードの数と輸送費・保管費

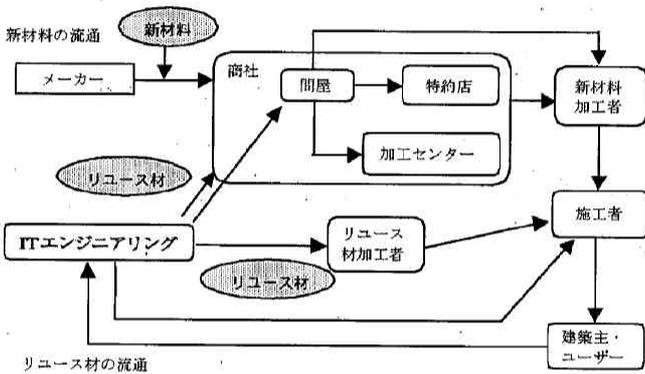


図12 リユース材の流通

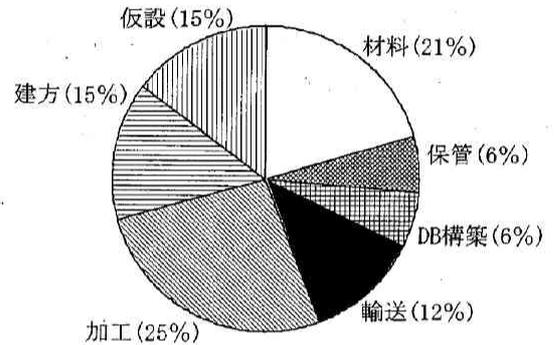


図14 工事費の構成比の例

b) リユース材の性能評価方法の確立

リユース材としてH形鋼を使用した柱・梁接合の標準化において、数値化された情報は、テキストデータやデジタル情報のインデックス等をさす。ここでは柱または梁に使用する圧延H形鋼の細幅・中幅・広幅シリーズ等の集約化された部材・部品がある。リユース材としてのH形鋼の標準化は従来のそれと同様である。リユース材は、所定寸法にするための部材間の部材継ぎや強度・剛性等の性能を確保するための穴埋め、部分補修等を行う必要がある。これらのリユース材の性能を解析・実験等により評価し、その評価方法を確立する。この評価方法を基にリユース材の性能を数値化することで、DBとして利用できることになる。

c) 情報の一元管理

リユース材は圧延H形鋼が生産時の規格のシリーズを対象とするが、将来的にはこれらの規格は変更・追加され、部材サイズ体系を拡張する必要が生じる。例えば、H形鋼の規格には、フランジ外縁一定からフランジ内縁一定の部材や建築構造用圧延鋼材や高性能圧延鋼材等の新しい鋼材が追加される場合である。これに対応するため、DBをサーバーにより外部ファイルとして一元管理し、複数の利用者が同時にDBにアクセスできる同時

実行制御や障害が発生した場合に障害発生以前にデータの制御等を行う。これにより容量制限の緩和、処理速度の確保等が維持でき、利用者からデータの検索・更新・維持管理が容易となる。

(3)DBの利用形態

DBの構築に必要なソフトの代表例を表1に示す。DBの利用形態として、LAN(Local Area Network)方式、C/S(Client/Server)方式、Web方式に分類できる¹⁰⁾。LAN方式は地域や組織等の限定された範囲内でのデータや画像等を相互に通信するネットワークである。各々のユーザーが開発できるものの、コンピュータの処理速度や容量等の性能に依存する傾向にあり、共有のDBとするには難点がある。C/S方式はDBをサーバー側にのみインストールし、検索処理をサーバー側で行って結果のみをユーザー側に返すシステムである。リモートサイトからアクセスするため、DBの管理が容易であるものの使用者が限定される。これに対して、Web方式はインターネット上において、地域や組織時間の制約を受けず、不特定多数の人が利用できる。すなわち、処理が全てサーバー側で行われ、クライアントにはHTML等の情報のみが返されるため、クライアントのOSやブラウザ等の環境に依存しない処理が可能となる。

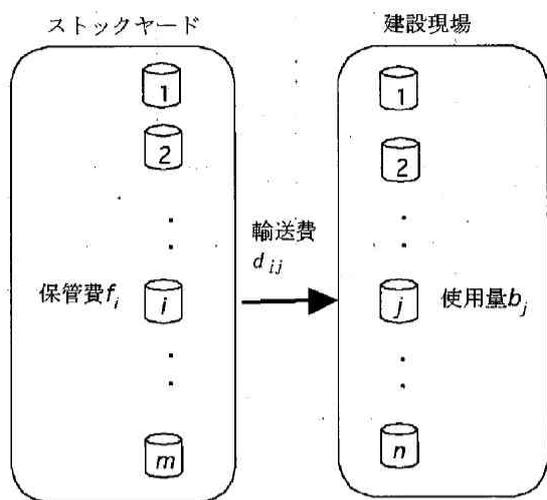


図15 リユース材の輸送の模式図

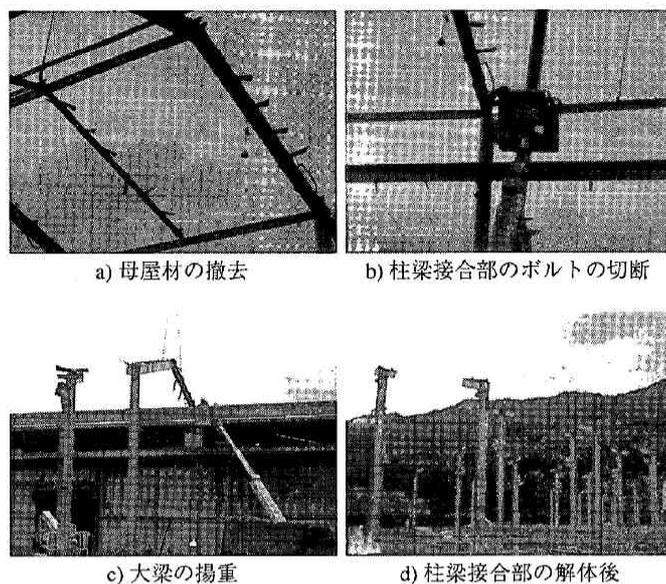


図16 丁寧な解体の例

3.4 スtockヤードの設置方法

(1) リユース材と流通

現在の流通における普通鋼鋼材は、その大部分がメーカーから問屋経由で販売されている。それ以降、問屋から直接加工者に販売される場合と、特約店を通して加工者に販売される場合、あるいは商社がこれらの機能を統括する場合がある¹⁹⁾ (図12)。これに対して、リユース材は、ビジネスマネジメントが総合的に管理・運用することとする。ITエンジニアリングがリユース材のDB構築・管理を行い、リユース材加工者がリユース材の保管・加工・品質検査を行う。リユース材は、新材料の流通である問屋を経由して加工者に輸送される場合と、リユース材加工者または施工者に直接輸送される場合がある。リユース材は、いずれの場合においてもストックヤードにて保管される。ストックヤードはリユース材を保管することにより、その加工・使用における時間的なずれを調整することができる。すなわち、ストックヤードはリユース材を保管し、在庫管理、加工を行ない、需要に応じて供給する機能を有する。

ストックヤードの数と輸送費及び保管費の関係を図13に示す。ストックヤードの数が増加するに連れて輸送費は下がるが、保管費は上昇する。リユース材の保管量が減少すると、顧客の注文に対応できない場合も生じる。ストックヤードの数は保管費と輸送費の合計が最小になるように設定する。

リユース材を使用した工事費は、材料、保管、DB構築、加工、建方、仮設、輸送で構成される。リユース材の保管費は、賃貸、設備償却、設備維持、労務等である。工事費の構成比の例を図14に示す。ここで、リユース材の輸送費は、加工工場・建設現場・解体現場・ストックヤードの各間

におけるモノの移動の費用である。

(2) リユース材の輸送費及び保管費

リユース材の保管費及び輸送費はストックヤードの設置数と場所、建設現場の位置に大きく依存する。n個の建設現場にリユース材を供給するために、m個のストックヤードを使用した場合の模式図を図15に示す。建設現場に供給するリユース材の量が多くなると複数のストックヤードよりリユース材を供給することになる。リユース材を使用した場合の輸送費 C_t 及び保管費 C_s は、最適化手法の一つである線形計画法によると次式のようになる²⁰⁾。

$$C_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad , \quad C_s = \sum_{i=1}^m f_i y_i$$

d_{ij} : スtockヤードiから建設現場jへの輸送費

f_i : スtockヤードiのリユース材の保管費

x_{ij} : スtockヤードiから建設現場jへの輸送量を示す変数

($\sum_{j=1}^n x_{ij}$: スtockヤードiのリユース材の量)

$y_i = 1$ の場合: i地点のストックヤードが有る

$y_i = 0$ の場合: i地点のストックヤードが無い

このようにリユース材の輸送費及び保管費は、各々の目標関数 C_t 及び C_s を最小にする線形計画法により算定できる。

3.5 丁寧な解体方法

(1) 解体工法

建築鋼構造の解体工法には、機械切断工法とそれが作業環境上困難な場合や規模が小さい場合を対象としている手壊し工法がある²¹⁾。建築鋼構造の丁寧な解体工法は、主にガス切断工法による手壊し工法であるが、仕上材は

表2 試験体一覧表

試験体名		試験体番号	試験体数
新材		A-1	3
		A-2	3
穴埋め溶接	アーク溶接	B-ARC	3
	CO ₂ 溶接	B-CO2	3
部材継ぎ溶接	公差なし	C-0	3
	公差2mm	C-2.0	3
	公差5mm	C-5.0	3

注) 穴埋め溶接は、中にボンチカスやきりこを入れ、両面を溶接して仕上げる。

表3 実験結果一覧表

試験体名	降伏点		引張強さ		伸び		破断箇所
	JIS	実験値	JIS	実験値	JIS	実験値	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%	
A-1	235以上	320	400~510	459	17以上	28	中央部
A-2	235以上	297	400~510	463	17以上	29	中央部
B-ARC	235以上	290	400~510	365	17以上	7	熱影響部
B-CO2	235以上	320	400~510	365	17以上	7	熱影響部
C-0	235以上	301	400~510	463	17以上	26	熱影響部
C-2.0	235以上	315	400~510	487	17以上	22	熱影響部
C-5.0	235以上	289	400~510	450	17以上	21	熱影響部

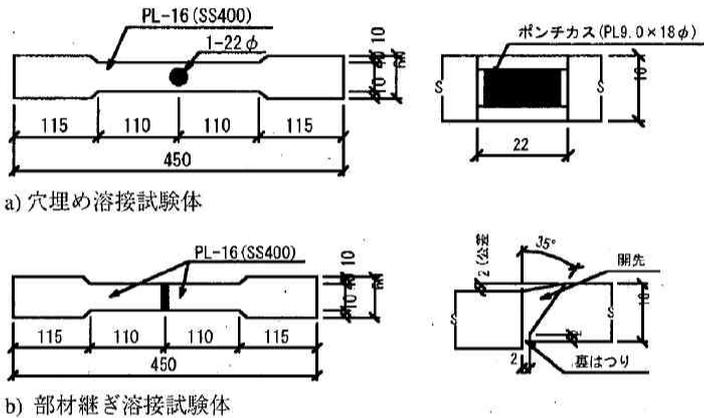


図17 試験体の形状

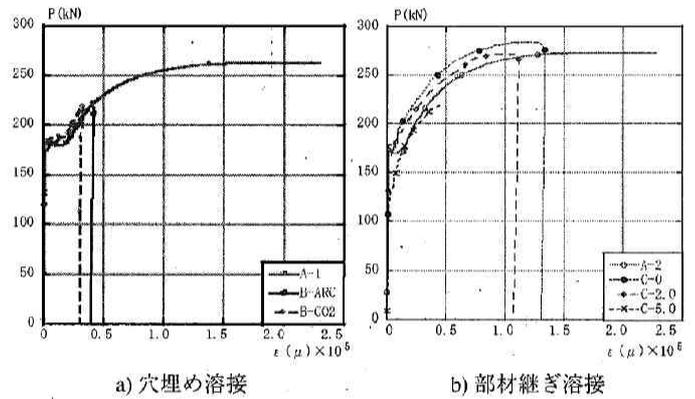


図18 荷重歪曲線

機械切断工法である。その解体順序として、解体しやすい箇所から順次解体する場合と新築の建方工程の逆順序で解体する場合がある。解体の部位は、主要構造部材として柱梁接合部、梁-梁接合部、柱-柱接合部、二次部材として小梁、母屋材、胴縁等である。その接合法には、主に溶接接合、高力ボルト接合がある。溶接接合の場合にはガス切断、高力ボルト接合の場合には高力ボルトを緩めるかあるいは溶断して部材を取り外す。耐火被覆はまとめて撤去する。丁寧な解体においては、部材に有害な変形を生じないようにするため、敷地条件、構造形式、使用部材、用途等を見極めて工法・解体順序を選定する。

(2)丁寧な解体工法の具体例

ここで、建築物の財産価値が時代の変化に伴って合致しなくなったことにより、解体した小屋組鉄骨造の例を図16に示す。屋根仕上材は大波石綿スレート葺き、外壁はALC(板厚:100mm)である。スパン23.4m、桁長さ80mの一方方向ラーメン構造、一方方向ブレース構造で、柱と梁ともにH450を使用している。まず、仕上材を撤去し、母屋材は鉄骨カッターにより切断する。小梁、柱と大梁の接合部は高力六角ボルト接合であり、ボルトを緩めるかあるいは溶断により部材を取り外す。建方時と同様に取り外した部材のボルト用穴に仮ボルトを差込み、順次、クレーンで揚重して

吊降ろす。柱脚のアンカーボルトをガス溶断により撤去後、柱を撤去する。

3.6 リユース材の性能評価方法

(1)リユース材の性能

構造用鋼材は日本工業規格(JIS)規格品、日本工業規格同等品、大臣認定品、無規格品の種類に分類される。これらのいずれかに該当するリユース材に対して、品質を提示しているミルシート付き新材と同程度の性能の有無を判定する。リユース材の降伏点・引張強さ・伸び等は引張試験や化学成分分析等によって評価する。リユース材の寸法許容差は、H形鋼の各区分に対して新材と同様にJIS規格を満たすようにする。リユース材に要求される性能レベルにより評価項目は異なるものの、評価されたリユース材に対して性能評価シートを発行する。なお、ミルシート付きの余剰材や短尺材を部材継ぎしたものは、従来構法の加工と同様なので、新材と同様の扱いとする。

(2)基礎実験

リユース材を想定した穴埋め溶接、部材継ぎ溶接の試験体の単純引張試験を行う(図17)。試験体は全てSS400のH型鋼(H-390×300×10×16)から採取する(表2)。引張試験結果を表3に示す。各試験体の降伏荷重は、全てJISの基準値を満たしていたが、引張強さ・伸びに関しては、穴

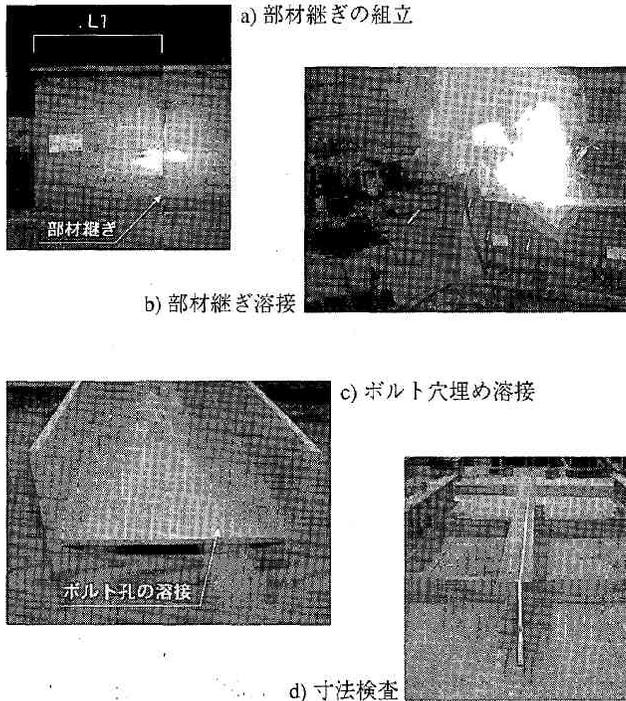


図19 リユース材の加工方法

埋め溶接の試験体において基準値に満たなかった。穴埋め溶接の試験体の溶接方法の違いは、アーク溶接よりCO₂溶接の方が安定した結果が得られたが、溶接方法の違いによる強度への影響はなかった。部材継ぎ溶接の場合、ほとんどが熱影響部付近で破断した。これは溶着金属の方が母材よりも強度が大きいため、溶接のボンド部、あるいは母材の熱影響部で破断したものと考える。また、部材継ぎ溶接試験体については、公差が大きくなるに連れて引張強さ、伸びの値は減少した。また、CO₂溶接の場合の降伏点は、アーク溶接より、CO₂溶接の方が溶け込み量が多くなるためアーク溶接試験体よりも大きくなる。

アーク溶接試験体、CO₂溶接試験体共に弾性域では新材の試験体とほぼ同じ荷重歪曲線を描いたが、歪硬化域における最大歪が40000 μ 前後になった。これは、母材とポンチカスの溶接部が破断した後、穴埋め溶接試験体のように母材の中央部に変形が集中したためである(図18)。また、母材の熱影響部においては、公差0mmと2mmではそれほど差は見られなかったが、目標値である2mmを超えた場合の公差5mmでは歪が5000 μ に達しなかった。

これらのことからリユース材を想定した穴埋め溶接、部材継ぎ溶接を有する場合、塑性範囲での挙動は異なるものの、弾性範囲では新材と同様の挙動を示すと考える。

3.7 リユース材の加工方法

(1)加工方法

リユース材の加工には、丁寧な解体により得られた部材

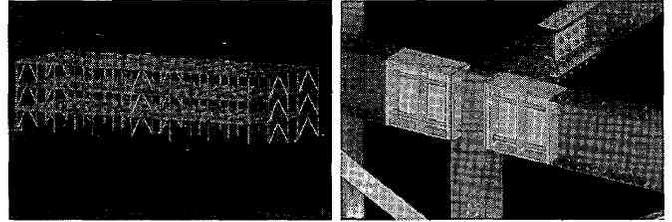


図20 DBから連動したプロダクトモデル

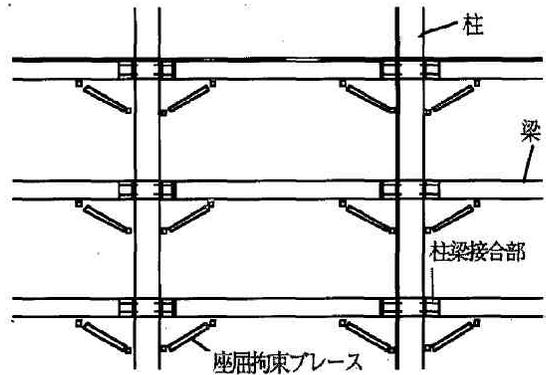


図21 サステナブルビル構造

及びそれらと新材の組み合わせがある。いずれもミルシートあるいは性能評価シート付きの部材を使用する。リユース材特有の加工には、図19に示すように部材継ぎ溶接、ボルト穴埋め溶接、開口部補強等があるが、その品質はJIS規格やJASS6等に基くものとする。溶断された大梁のガセットプレートやスチフナ等はグラインダー仕上げとする。これらの位置情報をDBに登録する。なお、リユース材は、新材と同様に品質を満たすように検査する。DBと1対1に対応した管理情報は部材コード(刻印・ICタグ等)としてリユース材に添付する。

(2)プロダクトモデル

DBから連動した三次元プロダクトモデル²³⁾の例を図20に示す。対象モデルは中層鉄骨造(共同住宅)に使用した妻方向ラーメン構造、桁方向ブレース構造である。桁方向には座屈拘束ブレースを使用しており、柱材(H-250)、梁材(H-300~400)のリユース材を使用している。このシステムは形状情報と製作情報によりプロダクトモデルを生成する鉄骨CAD-CAMシステムであり、各リユース材の部材継ぎ、穴埋め溶接、スチフナの位置情報等に関するソフトとハードの情報が1対1に対応している。この場合、プロダクトモデルの作成にあたってデータ容量の制約が少なく、時間軸の情報を考慮した4次元プロダクトモデルの構築も可能となる。

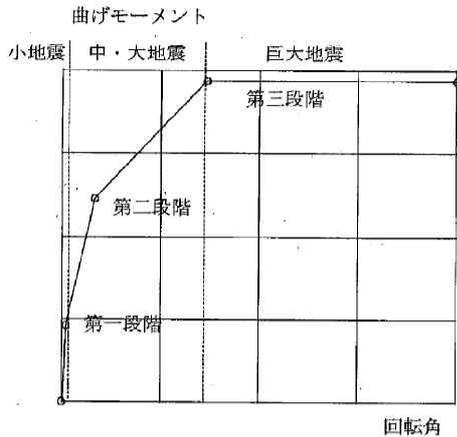


図22 柱梁接合部の曲げモーメントと回転角

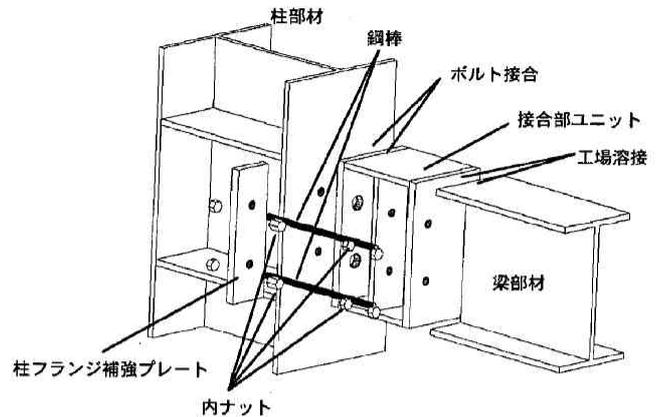


図23 接合部

4. リユース材を使用したサステナブルビル構造

4.1 構造システムの概要

100年以上の長期にわたって建築物を使用するには、メンテナンスしやすい構造設計、さらに経年変化する部分については、劣化した各要素が容易に取替え可能な構法が必要である。また、地震国であるわが国では、地震による被害を無視することはできない。そこで、損傷制御設計を応用した構造システムを考える²³⁾。

この構造システム(以下、サステナブルビル構造という)は、損傷した各部材、部品を取替えることにより、構造全体の持続性を図り、解体が容易でリユースができる部材によって構成される。サステナブルビル構造の柱梁接合部には、大きな曲げモーメントが生じないように、柱と梁に制振部材としての座屈拘束ブレース^{24) 25)}(以下、ブレースという)を方杖のように設置する(図21)。この構造システムの柱梁接合部は半剛なので、大地震時にも大きな曲げモーメントが生じなく、損傷を被らないでブレースのみが地震エネルギーを吸収する。大地震後もブレースのみを点検し、損傷していれば補修・交換することにより、建築全体は継続使用が可能である。また、部材の接合をボルトのみとすれば、部材の丁寧な解体が可能となり、リユース材として利用しやすいと考える。

本構造システムは、接合部に曲げモーメントが作用する時、接合部が離間するまでは第一段階として、剛接合とほぼ同様の剛性を有する(図22)。小規模の地震時にはこの剛性によって、建物の使用性を満足させる。さらに曲げモーメントが作用すると、第二段階に進み、第一段階よりも剛性が低下する。中・大規模の地震時には接合部の剛性が小さくなることで、いわゆる半剛接合状態となり、主架構に損傷を与えず、ブレースによる効率のよいエネルギー吸収を行うことができる。そして、巨大地震時に大きな曲げモ

ーメントが作用すると、第三段階となり、ほぼピン接合と同様の性能を示す。万が一、数箇所の柱梁接合部がこの段階に至っても、その他の柱梁接合部が第二段階であればそれらの剛性は元に戻るため、建物全体として残留変形はあまり生じることがない。

4.2 柱梁接合部

接合部の概要を図23に示す。図は部品に分解したものである。梁端部にブロック状の接合部ユニットを溶接する。必要に応じてリブプレート等を設ける。また、柱部材の接合部ユニットと接触するフランジには鋼棒の貫通する穴を設け、その穴に鋼棒を通し、初期張力を入れて締め付ける。鋼棒は、首下の長い高力ボルト、ワンサイドボルト、両端部をねじ切りしたもので、従来のボルトよりも長いため、歪が小さく、変形能力に優れている。接合部は、巨大地震時にも破断等が生じることなく、安定した回転性能を確保することができる。

現場へは、工場で生産した接合部ユニットを、梁端部と溶接した後に搬入することで、現場で柱と梁を鋼棒でつなぐだけになり、作業性も向上する。さらに鋼棒による接合のため、解体と部材のリユースが容易である。リユースする際は接合部ユニットと鋼棒を変更するだけで、さまざまな接合部性能に対応できる。

4.3 部材実験

柱梁接合部とブレースを方杖状に設置した場合、ブレースが安定したエネルギー吸収が行えるか、接合鋼棒の破断等がなく変位に追従できるかを確認するため部分架構実験を行う。試験体として、ブレースが2本のものをBW、1本のものをBSとする。図24に示すBW試験体は柱梁接合部にブレースを設置したものであり、BS試験体は梁上部のブレースを取り除き、使用鋼材量の軽減と施工性、意匠性の向上を図る構造システムを想定するものである。本実験

表4 試験体一覧表

名称	主架構		鋼棒					ブレース	
	柱部材	梁部材	n(本)	L(mm)	dt(mm)	T ₀	A(mm ²)	本数	
部分架構実験 試験体	BW	H-488×300×11×18	H-294×302×12×12	4	400	75	84.5	330	2本
	BS								1本

ブレース	材質	断面形状	エネルギー吸収部長さ(mm)	円形鋼管形状
	SN400B	PL-22×80	800	101.6×3.2 L=1100

※ n: 本数 l: 長さ dt: 梁芯-鋼棒間距 T₀: 初期張力 A: 断面積

表5 試験体の機械的性質

	素材	降伏耐力(N/mm ²)	引張耐力(N/mm ²)	伸び(%)
鋼棒	S45C	475.3	768.3	—
主架構	SS400	304.0	451.5	30.8
ブレース	SN400B	263.4	448.1	35.5

※ 鋼棒は引張試験結果 主架構はミルシートの値
ブレースは素材引張試験(5号)の結果

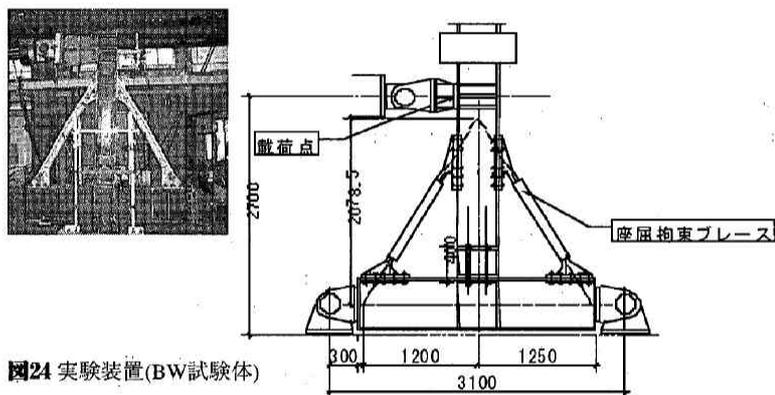


図24 実験装置(BW試験体)

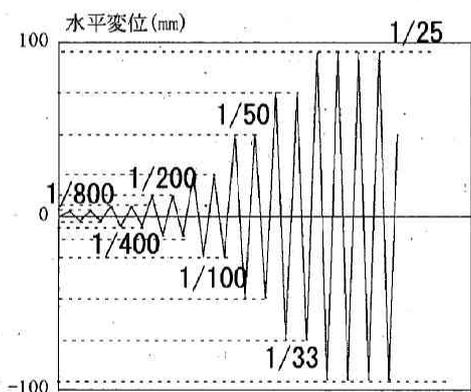
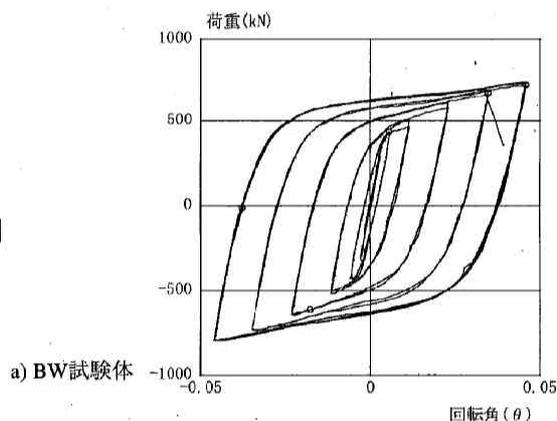
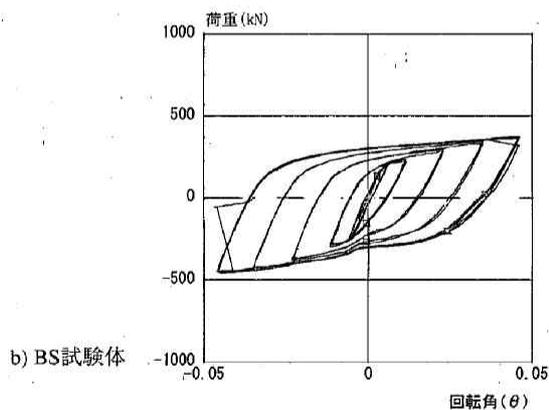


図25 載荷プログラム



a) BW試験体



b) BS試験体

図26 載荷点の荷重と回転角

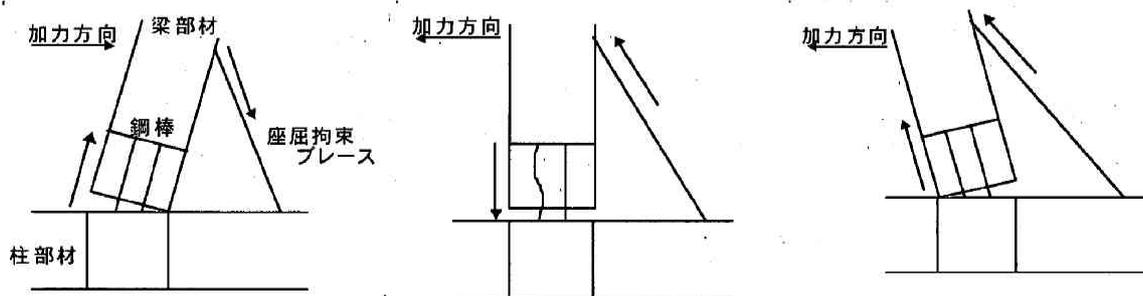


図27 鋼棒の変化

では、円形鋼管により芯材を座屈拘束し、ガセットを一体としたブレースを用いる。試験体一覧表を表4、試験体の機械的性質を表5に示す。

ブレース付試験体では、図25に示す載荷プログラムで載荷した後、変形角1/25に相当する振幅で耐力低下がみられるまで載荷を行った。各試験体の載荷点の水平荷重Pと回転角 θ の関係を図26に示す。BW試験体では変形角1/25相当9回目で片側のブレースが破断し、実験を終了した。BS試験体では1/25相当7回目にブレースが破断し実験を終了した。ブレースなしの試験体と同様に梁が浮いてしまう現象はみられたが、BW試験体では安定した性状を示した。BS試験体ではブレース引張側で水平変位0付近で荷重の低下があるが、これはブレースと離れた方の鋼棒2本が大きく変形していたことから、図27に示すように鋼棒に座屈が生じ、剛性が低下したと考える。水平変位0からマイナスに移行すると鋼棒が引張側となるために、耐力が安定する。ブレース圧縮時の吸収エネルギーの総和と引張時の総和はほぼ同等なことから安定したエネルギー吸収が行われていることが分かる。

5. 結び

本論では、環境負荷を削減するために「建築鋼構造のリユースシステム」の提案とその実現化の方法として、1)リユース材の調査、2)リユースマネジメントモデル、3)データベースの構築方法、4)ストックヤードの設置方法、5)丁寧な解体方法、6)リユース材の性能評価方法、7)リユース材の加工方法、について示した。さらに、部材のリユース材として使用が容易なサステナブルビル構造の構築例について示した。

これらの提案とサステナブルビル構造を実現化することにより、リユース材が既存の流通である、従来の生産・製品の供給という「動脈産業」に対して、その処理、再生、再利用を行う「静脈産業」の確立の一翼を担うことができると考えている。

謝辞

本研究は、神奈川大学工学研究所共同研究テーマとして行われました。

本研究の企画にあたり、室伏次郎・神奈川大学教授、和田章・東京工業大学教授、C.W.Ibbsカリフォルニア大学教授の御助言を戴きました。本研究の実行にあたり、小川秀雄・神奈川大学助手、村井正敏・神奈川大学主任技術員、前田親範・前田一級建築士事務所所長、中村博志・新日本製鐵(株)建築事業部マネージャー、斎藤啓一・大和ハウス工業(株)主任、遠藤益夫・コスモ技研(株)課長の御協力

を戴きました。また神奈川大学・岩田研究室学生、小谷野一尚君、山本重治君、和泉田洋次君には卒業研究を通して御協力を戴きました。ここに深く感謝の念を示します。

この研究テーマの成果を踏まえ、経済産業省・大学発事業創出実用化研究開発事業のテーマとして応募し、採択されました。現在、大学発ベンチャーを目指して、研究開発を実行中です。応募に際して協力して戴いた、田口澄也・神奈川大学産官学連携推進室長、宇崎勝・神奈川高度技術支援財団(KTF)主任にも、この場をお借りして感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：活動レポート「気候温暖化への建築分野での対応(1999.12 会長声明)」、建築雑誌Vol.113, No.1417, 1998.1
- 2) 日本建築学会編：地球環境建築のすすめ、彰国社、2002.8
- 3) 日本建築学会：特集「気候変動と建築」京都議定書は建築をどう変えるか、建築雑誌Vol.117, No.1487, 2002.4
- 4) 日本建築学会材料施工委員会：循環型社会に向けた建築生産のあり方、2001.9
- 5) 日本建築学会構造委員会鋼構造運営委員会：建築鋼構造における環境性とは何か、2002年度日本建築学会大会(北陸)構造部門パネルディスカッション、2002.8
- 6) 岩田衛、堂野前等、久松雄治：建築鉄骨構造のライフサイクルにおける環境負荷削減のシナリオとその評価、日本建築学会構造系論文集、第533号、2000.7
- 7) 山田哲、黒川礼子、會澤貴浩、岩田衛：廃棄物量とLCCO₂量に着目した鉄骨造建物における環境負荷の評価、日本建築学会構造系論文集、第554号、2002.4
- 8) 鋼材倶楽部：サステナブル建築とスチール、2001.9
- 9) 和田章、岩田衛、清水敬三、安部重孝、川合廣樹：建築物の損傷制御設計、丸善株式会社、1998.9
- 10) 日本建築学会：建築生産・情報技術 建築生産情報統合ガイドブック、丸善、1995.12
- 11) 松下富士雄：IT革命は鉄骨構造設計・生産業界にどんなインパクトを与えるか、鉄構技術、2000.11
- 12) 椎野潤：建築ロジティクスの新展開、彰国社、2002.2
- 13) 日経アーキテクチュア：IT企業の建設市場開拓大作戦、No.660, 2000.2.21
- 14) 岩田衛、竹内徹、藤田正則：建築鋼構造のシステム化、鋼構造出版、2001.2
- 15) 建設物価調査会：建築統計年報、2002.9
- 16) 鉄鋼技術：2001年度の着工面積と鉄骨需要、2001.12
- 17) 国土交通省：建設白書2002、2002.4
- 18) 小泉修：図解でわかる データベースのすべて、日本実業出版社、2002.6
- 19) 日経アーキテクチュア：情報革命で建築はどうなる No.668、2000.6.12
- 20) 藤田正則、前田親範、岩田衛：建築鋼構造のリユースシステムに関する研究 スtockヤードの設置方法の提案、日本建築学会環境系論文集、2004.5
- 21) 解体工法研究会編：新・解体工法と積算、経済調査会、2003.10
- 22) 李丙海：ISOのステップを用いた鉄骨構造物の設計・生産データ統合システム、鉄構技術、2001.5
- 23) 會澤貴浩、黒川礼子、山田哲、岩田衛：サステナブルビル構造システムの提案とその基本特性、日本建築学会構造系論文集、第581号、2004.7
- 24) 加藤貴志、岩田衛、和田章：損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価、日本建築学会構造系論文集、第552号、2002.2
- 25) 村井正敏、小林史興、野田隆博、岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第569号、2003.7