建築鋼構造のリユースシステムに関する研究

—ストックヤードの設置方法の提案—

REUSE SYSTEM OF BUILDING STEEL STRUCTURES

—Installation of storage-yards—

藤田 正則*, 前田 親範**, 岩田 衛***

Masanori FUJITA, Chikanori MAEDA and Mamoru IWATA

The authors proposed a reuse management model of building steel structures from a viewpoint of environmental issues. In the cycle of a reuse flow, a kind of business management has all responsibility for supply of reusable members. That is, the business management takes charge of demolition of building steel structures, evaluation of reusable members, maintenance, storage, in some cases even fabrications, and then should use the storage-yards as a storage depot. This paper discusses the rationality of a reuse system and suggests a reuse flow including an installation of "storage-yards" that is a kind of a storage house for reusable members. The authors evaluate the installation of the storage-yards in simulations of building steel structures in the economical point.

Keywords : Building steel structure, Reusable member, Information technology, Reuse system, storage-yard

建築鋼構造、リユース材、情報技術、リユースシステム、ストックヤード

1. 序論

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LCCO₂を30%削減、耐用年数を3倍の延伸を目指すべき」¹⁾²⁾³⁾⁴⁾を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⁵⁾⁶⁾⁷⁾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。著者らも、廃棄物重量とLCCO₂量に着目した建築鋼構造における環境負荷の評価に関する研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾や情報技術を利用した建築鋼構造のリユースについて一般化できるようなマネジメントモデル¹¹⁾を提案している。このモ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、リユース材は環境負荷削減の一つの手法であるものの、それ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¹¹⁾。

現在、建築物に使用されている規格化された圧延H形鋼は

3000万トン以上蓄積されている¹²⁾¹³⁾。このうち、社会環境や敷地条件の変化等により約30年で解体されるとすると100万トン/年のH形鋼がスクラップとして存在することになる¹⁴⁾。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、鉄鋼メーカー等が拡販してきた圧延H形鋼等によれば、このうち、25%程度はリユース材として適応できると推定される。

ここで、リユースシステムとは図1に示すリユースフローにおいて、建設・使用・維持管理・解体分別・回収・保管・加工の一連のサイクルを推進するためのしくみであり、リユースマネジメントモデルを実現するための全体のシステムをさす。その基本検討項目としては、1)リユースビジネス調査、2)データベースの構築、3)保管場所(以下、ストックヤードという)の設置方法、4)リユース材の加工方法、5)リユース材の性能評価方法、6)丁寧な解体方法、等が挙げられる。これらは今後、並行して検討すべき課題であるが、ここでは、3)を取り上げる。

ストックヤードは、リユースマネジメントモデルにおいてストック分野で中心的な役割を果たし、養生、荷役、輸送、保管等の流通の拠点となる。その流通には、ヒトやモノの輸送を伴い、道路や鉄道等の交通施設とトラック等の交通手段が

* 新日本製鐵㈱エンジニアリング事業本部 博士(工学)

** 前田親範一級建築事務所

*** 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

Engineering Division, Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Maeda Office

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

利用される。中でも、道路の交通施設は交通手段の中で基幹的なものであり、交通工学の分野においてはOD表やパーソントリップ調査等の起終点調査を基に交通量を推定し、将来の総合交通体系が検討されている¹⁵⁾。輸送手段は、モノの種類、量、輸送距離、輸送日数、輸送費等を考慮して選択されるが、通常、輸送費と輸送時間の面から、300km以下の輸送区間では自動車、300～500kmの区間で鉄道、500km以上の区間では船舶とされている¹⁶⁾。これらの最適化手法として、線形計画法、ニューラルネットワーク法、多変量解析、アルゴリズム等が使用されている¹⁷⁾。

本論では、リユースマネジメントモデルの実現にあたってリユースフローにおいて重要な部材等のモノの動きに注目し、リユースシステムの合理性を追求するため、ストックヤードの設置方法について提案する。さらに、その設置方法を使用して中層鉄骨造(共同住宅)を例に取り上げ、経済性の観点から検討する。

2. リユース材の工事費

2.1 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(図2)。これ

図1 リユースフローにおける基本検討項目

図2 リユース材の流通

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¹¹⁾。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3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。

2.2 リユース材の工事費

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¹¹⁾を図4に示す。ここでは、リユース材の材料費、DB構築費を共通とし、工事費 C_r をストック分野である輸送費 C_t 及び保管費 C_s と輸送費以外 C_o に分ける。

$$C_r = C_o + C_t + C_s \quad (1)$$

ここで、

C_r : リユース材の工事費

C_o : 保管費及び輸送費以外のコスト

C_s : リユース材の保管費 C_t : リユース材の輸送費

ここで、リユース材の輸送費は、加工工場・建設現場・解

図3 スtockヤードの数と輸送費・保管費の模式図

図4 工事費の構成例

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。

3. リユース材のストックヤード

3.1 スtockヤードの設置方法

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5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2)式のようになる¹⁸⁾。

$$C_t = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m d_{ij} x_{ij} \quad C_s = \sum_{i=1}^m f_i y_i \quad 2)$$

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こと、 $y_i = 0$ の場合、 i 地点のストックヤードが無いことを示す。建設現場 j 地点のリユース材の使用量を b_j とすれば、制約条件は次のようになる。

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad 3)$$

$$b_j y_i \geq x_{ij} \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, n) \quad 4)$$

$$y_i = 0, 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad 5)$$

3) 式は、建設現場 j において必要なリユース材がストックされていること、4) 式は、リユース材がストックヤードから建設現場へ輸送できることを示す。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。

3.2 リユース材の輸送費

ここでは、リユース材の輸送費は輸送の大部分を占める陸

図5 リユース材の輸送の模式図

上輸送を対象とする。その輸送手段は、ストックヤードと建設現場間、ストックヤードと加工工場間等の一貫輸送が可能で、養生も簡単なトラック輸送とする。運賃表¹⁹⁾より求めた輸送費と輸送距離の関係を図6に示す。輸送費 d_{ij} (円/ton) は最小二乗法により6) 式となる。この式は運賃表を一般化したものであり、基本料金と輸送距離 k_{ij} (km) の関数より算定している。評価尺度は輸送費及び市場とする。6) 式で求めた輸送費 d_{ij} に建物の鋼材総重量 x_{ij} (ton/戸) と市場 V (戸) を乗じて輸送費 W を求める(7式)。

$$d_{ij} = 19 k_{ij} + 1100 \quad 6)$$

$$W = C_t V \quad 7)$$

k_{ij} : スtockヤード i から建設現場 j へのリユース材の輸送距離(km)

W : 市場を考慮した輸送費 V : 市場(年戸)

3.3 リユース材のストックヤード

ストックヤードは、屋外(野積み)、半屋外(屋根付)、屋内に分類されるが、大部分は屋外として使用されている。リユース材には丁寧な解体のレベルに応じて加工有と加工無の場合がある。さらに、リユース材の加工有の場合には、製品にするために、従来と同等の加工が必要な場合と一次加工のみで対応できる場合がある。ここで、リユース材の一次加工とは、部材及び接合部の大部分が転用できる部材を対象としており、部分的な補強・補修のみで製品となるものをいう。リ

図6 輸送費と輸送距離

b) スtockヤードと加工工場が近い場合

図7 スtockヤードと建設現場の位置関係

ユース材の加工無の場合、ストックヤード単独あるいは一次加工の可能なストックヤードで対応する。リユース材の加工有の場合、従来の加工工場または一次加工の可能なストックヤードで対応できる。

ストックヤード、加工工場、建設現場の位置関係を図7に示す。リユース材はストックヤードから加工工場を経由して建設現場へ移動する場合と、直接、建設現場へ移動する場合がある。これに対して、新材料は加工工場を経由して建設現場へ移動する。よって、一次加工のみのストックヤードを使用すれば、輸送費が低減できることになる。ストックヤードと加工工場が遠い位置にある場合は、近い場合に比べてストックヤードから加工工場間の輸送費が余分にかかる。また、輸送費はストックヤードが解体現場から近い方が安くなる。

これらのことからリユース材の輸送費は、加工工場とス

tockヤードが近接する方が安くなると考える。

4. スtockヤードのシミュレーション

3. で提案したリユース材のストックヤードの設置方法を利用してシミュレーションを行い、結果を考察する。その評価尺度は、最も基本である経済性のみを対象とする。

4.1 設定条件

シミュレーションにあたっては日本国内を対象とし、地域別に9個のブロックについてストックヤードの最適な場所を選定する。ブロックごとに、1戸当りの輸送費 C_i 及び市場を考慮した輸送費 W (年間)を2)～7)式で算定し、その最小値をストックヤードの最適地とする。なお、リユース材の保管費は、ストックヤードの設置場所、地域特性、土地代等によって異なるためここでは考慮しないものとする。

ストックヤードと建設現場の輸送ルートの模式図を図8に示す。輸送費はストックヤード i から建設現場 j までの輸送ルートのうち、8)式に示すように最小となるように選定する。

表1 スtockヤードの設置条件

a) スtockヤードの設置	
・ストックヤードは日本国内を対象とし、地域別に9ブロック（東北・甲信越・関東・北陸・東海・近畿・中国・四国・九州）に分ける。ただし、北海道、沖縄を除く。	
・輸送区間はリユース材の一次加工の可能なストックヤードと建設現場が各県庁所在地間にあると仮定してこの間を結ぶ一般道路の輸送 ²⁰⁾ とする。	
・リユース材を保管・管理・一次加工可能な倉庫と工場を有する。	
・任意の時間断面でストックヤードのリユース材がオーバーフローすることは考慮していない。	
・屋外ストックヤードの面積は、約20000m ² とする。	
b) 移動手段・距離	
・輸送手段は10tトラックとする。トラックは満載とし、積載効率（巡回回収・配達等）は考慮していない。	
・移動距離は各ブロックの県庁所在地間または県庁所在地から最も近い高速インターまでとする。	
・ストック量・輸送費は時間軸に対して変動しないものとする。	
・輸送納期や輸送のリードタイムは考慮しないものとする。	
c) 運賃の適用	
・運賃は月刊建設物価（一般貨物自動車運送事業特殊運賃料） ¹⁹⁾ より設定し、深夜料金等の特別料金は考慮しない。	

表2 鉄骨造（共同住宅）の市場規模²¹⁾

ブロック	戸数	小計	ブロック	戸数	小計
関東	東京都	18,285	甲信越	山梨県	1,486
	神奈川県	10,344		新潟県	1,892
	千葉県	7,254		長野県	3,564
	埼玉県	6,957	中国	鳥取県	1,388
	茨城県	4,179		島根県	547
	栃木県	3,770		岡山県	2,668
	群馬県	2,465		広島県	3,322
		53,254		山口県	1,907
近畿	滋賀県	2,001	北陸	富山県	1,014
	京都府	2,307		石川県	1,956
	大阪府	10,801		福井県	1,001
	兵庫県	5,085	東海	岐阜県	2,863
	奈良県	1,148		静岡県	5,238
	和歌山県	592		愛知県	12,259
九州	福岡県	5,467	東北	三重県	2,795
	佐賀県	780		青森県	1,146
	長崎県	1,096		岩手県	1,227
	熊本県	1,836		宮城県	2,966
	大分県	1,195		福島県	2,450
	宮崎県	801		秋田県	950
	鹿児島県	1,150		山形県	1,202
四国	徳島県	789			9,941
	香川県	1,657			
	愛媛県	1,350			
	高知県	1,728			
		5,524	合計		146,878

a) 関東ブロック

b) 近畿ブロック

c) 東海ブロック

図9 鉄骨造（共同住宅）の各ブロックの市場

$$d_{ij} = \min(d_{ij}^1, d_{ij}^2, \dots, d_{ij}^z) \quad (8)$$

d_{ij} : ストックヤード*i*と建設現場*j*が各ブロックの県庁所在地間にあると想定してこの間を結ぶ一般道路(1~*z*:輸送ルート)を使用した場合の輸送費

シミュレーションにおけるストックヤードの設置条件を表1に示す。ストックヤードの設置の意思決定にあたっては、リユース材のコスト・納期・品質等の要求条件の重みにより異なる場合も生じるが、コスト以外は同一条件と仮定する。輸送手段は、ストックヤードと任意の建設現場までをフレキシブルに輸送可能であるトラック輸送とする。対象モデルは、リユース材の排出源及びその使用対象とした中層鉄骨造(1戸当りの鋼材重量203t:共同住宅)¹¹⁾とし、その建築鋼構

図8 ストックヤードと建設現場の輸送

表3 ストックヤードの最適地

評価尺度 ブロック	1戸当りの輸送費 C_i	市場 <i>V</i>	市場を考慮した 輸送費 <i>V</i>
東北	岩手県盛岡市	宮城県仙台市	宮城県仙台市
甲信越	長野県長野市	長野県長野市	長野県長野市
関東	東京都中央区	東京都中央区	東京都中央区
北陸	石川県金沢市	石川県金沢市	石川県金沢市
東海	愛知県名古屋市	愛知県名古屋市	愛知県名古屋市
近畿	大阪府大阪市	大阪府大阪市	大阪府大阪市
中国	広島県広島市	広島県広島市	広島県広島市
四国	香川県高松市	高知県高知市	香川県高松市
九州	熊本県熊本市	福岡県福岡市	福岡県福岡市

造のストックは大量に存在し、解体及び移築しやすい構工法は確立済みであると仮定する。

4.2 シミュレーションの結果

鉄骨造(共同住宅)の市場規模²¹⁾を表2に示す。その市場は、関東、近畿、東海の各ブロックにおいて各々東京都、大阪府、名古屋市が多くなっている(図9)。関東、近畿、東海ブロックの3つの市場の合計は、日本国内の全体の67%を占めている(図10)。

市場を考慮したストックヤードの最適設置場所を各ブロックごとに表3に示す。市場を考慮したストックヤードの各ブロックの最適地として、東北(青森県青森市)、甲信越(新潟県新潟市)、関東(東京都中央区)、北陸(石川県金沢市)、東海(愛知県名古屋市)、近畿(大阪府大阪市)、中国(岡山県岡山市)、四国(高知県高知市)、九州(福岡県福岡市)となる。

4.3 考察

各ブロックの中から関東、近畿、東海について、リユース材をストックヤードから各建設現場へ輸送するにあたっての1

図10 関東、近畿、東海ブロックの市場規模

a) 関東ブロック

b) 近畿ブロック

c) 東海ブロック

図11 1戸当りの輸送費

a) 関東ブロック

b) 近畿ブロック

c) 東海ブロック

図12 市場を考慮した輸送費

図13 既存の加工工場(全国鉄構工業連合会)²²⁾

戸あたりの輸送費及び市場を考慮した場合の輸送費を図11、図12に示す。輸送費は、関東、近畿、東海の各ブロックにおいて埼玉県埼玉市、大阪府大阪市、愛知県名古屋市が最小の値である。関東、近畿、東海において、市場の最大は東京都、大阪府、愛知県であり、これを考慮した場合、輸送費は、関東、近畿、東海の各ブロックにおいて東京都中央区、大阪府大阪市、愛知県名古屋市が最小である。すなわち、関東、近畿、東海においては市場を考慮した県庁所在地がストックヤードの最適地となっている。その他のブロックにおいても同様である。

このようにリユース材の輸送費は、ストックヤードを市場の近傍に設置した方が安くなると考える。

全国鉄構工業連合会の連認定工場²²⁾に加盟している加工工場の分布とそのグレードを図13に示す。既存の加工工場は各ブロックに分散して配置されている(北海道及び沖縄を除く加工工場の計:2932個)。中でも、Rグレード以上の加工工場が84%を占めており、リユース材の一次加工可能なストックヤードは、既存の加工工場で大部分対応できる可能性があることを示している。これらの加工工場が十分なストックヤードを有すれば、リユース材のストックヤードとしても使用できることになる。すなわち、リユース材の輸送ネットワークは現存する流通を利用できると考える。

5. 結論

本論では、建築鋼構造のリユースシステムにおける合理的なストックヤードの設置方法について提案し、また、これを使用して中層鉄骨造(共同住宅)についてシミュレーションを行った。この結果、下記のことが明らかになった。

- 1) 輸送区間の目標関数を最小にする線形計画法を使用してリユース材の輸送費の最適値を試算した。これにより中層鉄骨造(共同住宅)におけるリユース材を保管・管理するストックヤードの設置場所が決定できる。
- 2) スtockヤードは、保管場所及び一次加工の機能を合わせて有する方が経済的になる。また、リユース材の輸送費は、加工工場とストックヤードが近接する方が安くなる。
- 3) リユース材の輸送費は、ストックヤードを市場の近傍に設置した方が安くなる。
- 4) リユース材の輸送ネットワークは、現存する流通を利用できる。

謝辞

本研究にあたり、神奈川大学学部学生(当時)吉満智義君及び秋元美紀さんの協力を得ました。記して深く感謝いたします。

[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: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
- 3) 日本建築学会地球環境委員会:地球環境温暖化防止と資源消費削減に向けて我が国の建築は如何に対応すべきか、1999年度大会研究協議会資料
- 4) 日本建築学会地球環境委員会COP3対応小委員会:建築分野における地球環境対応策 研究成果 UNFCCC COP3 京都, 1997.12
- 5) 日本建築学会編:地球環境建築のすすめ、彰国社、2002.8
- 6) 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
- 7) 鋼材倶楽部:サステナブル建築とスチール、2001.9
- 8) 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
- 9) 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、pp.167-173、2000.7
- 10) 山田哲、黒川礼子、會澤貴浩、岩田衛:廃棄物重量と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、pp.131-137、2002.4
- 11) 岩田衛、藤田正則、前田親範:情報技術を利用した建築鋼構造のリユースマネジメントモデルの提案、総合論文誌第1号「地球環境建築のフロンティア」学術論文、日本建築学会、pp.81-86、2003.2
- 12) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編:工業統計表、平成12年
- 13) 鉄鋼新聞社:鉄鋼年鑑、平成14年度版
- 14) 建築各部の耐用年数を知る:日経アーキテクチャー、pp.52-57、2000.1
- 15) 市来清也:倉庫概論、成山堂書店、1995.2
- 16) 福田正:新版交通工学、朝倉書店、2002.2
- 17) Hiroshi Kawamura, Akinori Tani, Atsushi Takizawa, Yu Du: Recurrent Architecture system adaptable to human and social changes and environmental circulation, SEWC2002, Yokohama Japan
- 18) 刀根薫:オペレーションズ・リサーチ読本、日本評論社、1995.2
- 19) 道路整備促進期成同盟会全国協議会:道路時刻表02~03
- 20) プロアトラスⅡ:(株)アルプス社、2002.6
- 21) 建築物価調査会:建築統計年報、平成14年版
- 22) 全国鉄構工業連合会:「全構連2000」認定工場名簿、平成12年度版

(2003年7月24日原稿受理、2004年2月18日採用決定)