

## 環境調和型建築構造のライフサイクル制御に関する研究 Control on life cycle of building structures harmonized with environment

○河村 廣<sup>1)</sup>, 三谷 勲<sup>1)</sup>, 鷲田豊明<sup>2)</sup>, 谷 明勲<sup>1)</sup>, 大谷恭弘<sup>1)</sup>, 高井紳二<sup>3)</sup>, 瀧澤重志<sup>1)</sup>  
○Hiroshi KAWAMURA<sup>1)</sup>, Isao MITANI<sup>1)</sup>, Toyoaki WASHIDA<sup>2)</sup>, Akinori TANI<sup>1)</sup>, Yoshihiro OHTANI<sup>1)</sup>,  
Shinji TAKAI<sup>3)</sup> and Atsushi TAKIZAWA<sup>1)</sup>

1)神戸大学工学部, 2)神戸大学大学院経済学研究科, 3)同志社大学商学部  
1) 2)Kobe University and 3)Doshisha University

The purpose of this research is to propose an evaluation and control method and a production system which realize building structures harmonized with environmental conditions. Structural systems are modeling as a complex, adaptive and autonomic system and stages of life cycles of buildings such as planning, design, maintenance, repair, reinforcement, recycle and waste are taken into account. In this research, eight researches are performed in corporation with each other. Therefore, a synthetic result, i.e., a system of recurrent architecture is obtained from not only structural engineering but also economical viewpoint. This research is still beginning stage, so it is necessary to perform more actual researches based on the results obtained by this research.

### 1. はじめに

本研究では、建築構造システムを様々な環境変動に自律的に適応する一つの複雑適応システムとして捉え、生産の前段階の計画、設計、竣工後のメンテナンス、補修、補強、リサイクル、廃棄までのライフサイクルを視野に入れ、さらに、社会経済性、環境性を含む性能及びコストの評価及び制御手法と、その実現を可能とする生産システムの原理の提案を目的としている。このため、本研究では、建築構造システムのライフサイクル性能評価と制御を行うために、研究内容を以下に示す8項目に細分化し、それぞれの研究を分担して実施した。

- (1)複雑適応システムとしての生産システムのモデル化 (分担: 河村廣)
- (2)ファジィネットワークによる建築構造性能のシステム化 (分担: 河村廣)
- (3)建築構造のライフサイクル環境影響評価の定量化 (分担: 河村廣, 谷明勲)
- (4)建築構造の材料、構法、力学特性の定式化 (分担: 三谷勲)
- (5)構造損傷の同定・評価と補修効果の予測 (分担: 大谷恭弘)
- (6)構造特性の評価と環境外乱への知的適応制御の応用 (分担: 谷明勲)
- (7)ライフサイクル性能の社会経済システムの観点からの分析 (分担: 鷲田豊明)
- (8)ライフサイクル性能・コスト評価システムの経営戦略から見た分析 (分担: 高井紳二)

これらの研究成果は、平成13年2月に神戸大学において開催した研究会資料<sup>1)</sup>にまとめられている。ここで

は、この研究会資料を基に、研究成果の概要を報告する。

### 2. 複雑適応システムとしての生産システムのモデル化

この研究テーマに関しては、設計・施工・運用・解体という建築の一連の流れを循環系社会の一部として捉え、資源レベルの再利用であるリサイクルばかりでなく、部材レベルでの再利用である部材リユースを前提としたリカレント建築を対象とした研究を実施した。リカレント建築では、部材をリユースする事により、廃棄物量を減少させることができるばかりでなく、消費エネルギーや二酸化炭素の排出量を減少させることが可能となる。

リカレント建築システムを実現するためには、①部材の企画化、②解体後の部品を回収・補修・ストックする回収工場、③回収工場がストックした部材情報のデータベース化と設計者の利用システム、④規格化部材による設計システム、⑤部材のリユースを可能とするような解体工法の確率、等がある。ここでは、これらを踏まえた研究として、複雑適応型生産システムに関する2つの研究を実施した。

#### (1)リカレント建築設計支援システム

この研究では、仮想的な回収工場にストックされた部材情報データベースを構築し、設計者側がそのデータベースから部材情報を取得し、設計している建築物に必要な建築空間に最適に配置できる設計支援システムの構築を行った<sup>1)2)</sup>。部材配置の最適化には、遺伝的アルゴリズムを用いた。また、このシステムを用いたシミュレーションを実施した。その結果、提案システムの有

効性がシミュレーション結果より明らかとなった。また、より大規模な建築物への適用に際しての課題も明らかとなった。

## (2)建築物解体順序の最適化システム

リカレント建築での部材リユースを実現するためには、建築物で用いられている種々の多数の部材を、解体時の構造的な安全性も考慮し、かつ安全、かつ効率的に解体し、ストックできる解体手順を決定する必要がある。このため、この研究では、種々の作業条件下での、安全かつ効率的な建築物の解体手順の最適化システムを遺伝的アルゴリズムを用いて構築し、そのシミュレーションを実施した<sup>1)3)</sup>。その結果、設定した目的関数や制約条件に応じた解体手順を決定することができることが明らかになった。

## 3. ファジィネットワークによる建築構造性能のシステム化、および建築構造のライフサイクル環境影響評価の定量化

建築物を計画する際には、デザイン計画、構造計画、環境計画等において様々な専門家が自らの主観的な判断と評価を行っている。このようなデザイン計画、構造計画、コスト計画、環境計画などの専門家の経験的、主観的な意見を一括し総合的に評価して、建築構造計画などの決定を行うことがこれからの建築にとって必要不可欠だと考えられる。また、建物を評価する際には建物の経済性、安全性、信頼性、環境に対する安全性などの諸性能を同時に評価する必要がある。これらの建物の性能（安全性と経済性など）は相互に密接な関係がある。これらを可能にするためにファジィ理論を基に、ファジィシステムを用いたファジィネットワークを適用する。ファジィネットワークを用いることによって構造設計者、意匠設計者、環境計画者、施主などの主張を同じ土俵の上で評価する事が可能であり、また建物の諸性能も同じ土俵の上で評価し計画をたてることができると考えられる。

本研究では、LCA（ライフサイクルアセスメント）の構成段階であるインベントリ分析を行い、用途、構造材料、耐用年数など建物の性状における建物の環境負荷値（二酸化炭素排出量、二酸化硫黄排出量、二酸化窒素排出量、エネルギー消費、コスト）を算出し、建物の構造材料と環境負荷との関係を求め、それらの削減可能性を探りつつ、ファジィネットワークを用いることによって地球環境問題を考慮した最適な構造計画を行うシステムの構築と、これを用いたシミュレーションを実施<sup>4)</sup>した。

その結果、建物の基準階床面積、階数や用途、また、入力におけるCO<sub>2</sub>削減率などを変化させたシミュレーションにより、設定に応じた構造形式を決定でき、またその決定過程も明らかにすることができた。今回は環境負荷の低減としてはリサイクル材の利用しか考えなかったが、今後リユース材の使用も考慮に入れる必要があ

ると考えられる。リユース材の使用による環境負荷の低減を測るためには建物の解体、及び廃棄物処理によって発生する環境負荷を推定する必要があると考えられる。今回の各建物タイプの環境負荷を建築工事ごと、建築部位毎にまとめ、現在建物の解体による環境負荷を算出しようとして試みている。また、リユース材の解体、組み立てによる環境負荷の推定についても検討中である。

## 4. 建築構造の材料、構法、力学特性の定式化

この研究では、建築構造の材料、構法、力学特性の定式化として、近年、使用されることが多くなっているCFT(Concrete Filled Tube)に関する研究を実施した。CFTは、構造部材の中でも耐荷・変形能力に優れており、建築構造物の構造特性を向上させる事が可能となる。ここでは、特に研究資料が乏しいCFT-SRC継手の応力伝達機構の解明を行った。また、側柱を想定し、CFT鋼管壁の応力がH形鋼ウェブにも伝達されるように、継手部に割り込みスチフナを用いて補強するものとし、圧縮およびせん断力を受ける場合について、それぞれ実験・解析を行った<sup>1)5)</sup>。

まず、圧縮力伝達、せん断力伝達特性を明らかにするために、供試体形状を変化させた実験を行った。実験結果の考察を行うことにより、圧縮応力、せん断応力の応力伝達機構のモデル化を行った。さらに、このモデルを基に、耐力評価式の提案を行った。

その結果、1)圧縮力については、継手部に必要最低限の長さを有する割り込みスチフナを設けることで応力が円滑に伝達されること、2)せん断力の伝達には、充填コンクリートによる圧縮束が重要な役割を担い、せん断力の伝達に限れば、無補強の場合でも、2部材の内大きい方のせん断降伏耐力を期待できること、3)圧縮力とせん断力に関する応力伝達機構のモデル化と、提案した耐力評価式の有効性が確認され、必要スチフナ長さ算出法も提案できたこと、が明らかとなった。

以上、継手部における応力伝達機構を実験的に検討し、仮定した応力伝達機構に基づいて接合部耐力の評価方法や、鉄骨間の円滑な応力伝達を保証する補強量を明らかにすることができた。

## 5. 構造損傷の同定・評価と補修効果の予測

この研究では、構造損傷の同定・評価と補修効果の予測に関して、RC構造物の構造損傷・劣化の評価と補修効果に関する研究を行った。我が国では、RC構造物の割合は増加をたどり、特に集合住宅や学校などに多く用いられている。既存のRC建築物では、築後30年以上経過しているものも多く、その老朽化や劣化の問題がクローズアップされるようになってきた。RC建築物の耐用年数は50~60年程度とされていたが、それより早い段階での構造損傷・劣化に対する適切な対処法が求められている。この様な問題に対して、本研究では、RC構

造物の構造的劣化・損傷の評価を行う目的で、築後 30 年の RC 造校舎の建て替え・解体時に、当該建物の構造躯体の劣化調査と部分架構構造に対する現場載荷実験を行った<sup>1)</sup>。対象構造物は、大阪府に建つ築後 30 年を経過した小学校の教室棟建物である。

まず、対象構造物のコアコンクリートの圧縮試験、鉄筋の引張試験を行い、建築当時の設計で用いられた許容応力度との比較を行った。また、解体する建物の部分架構について、水平力加力実験を行った。さらに、荷重-変形関係、曲げモーメント-曲率関係の計算も実施した。

以上より、1) 今回の実験では、最大荷重に至る前に実験を終了したが、荷重-変形関係より、実験剛性は計算弾性剛性の 1/3 程度になっており、耐力低下がおきずに層間変形角が 0.007rad まで進んだこと、2) モーメント-曲率関係では、 $\pi$ ゲージによる実験剛性と計算剛性がほぼ一致すること、等が明らかとなった。今後、さらに詳細な検討を行う予定である。

## 6. 構造特性の評価と環境外乱への知的適応制御の応用

建築構造物の長寿命化や、リカレント建築における部材リユースを考える場合、建築物や部材の損傷レベルを把握し、安全性を評価することが非常に重要な問題となる。機械や構造物の応答・損傷状態を知る方法として、構造のヘルスマonitoring技術に関する研究が進んでいる。しかし、これらは光ファイバーなどのセンサの埋め込みを必要としている。このため、建築構造物については、適用範囲は新築でかつ特殊な建築に限られ、既存の建築物に適用することは困難である。そこで、本研究ではセンサ等の設備を持たない既存の建築構造物を対象として、地震等の環境外乱により生じた応答変位・損傷率を階層型ニューラルネットワークを用いて同定・評価するシステムを構築することを目的とする。なお一般に、建築物のヘルスマonitoring技術には部材レベルの損傷状態を総合してシステムレベルの損傷状態を評価する方法と、システムレベルの損傷状態を把握してから徐々に部材レベルの状態を明らかにする方法があるが、本研究では後者の方法におけるシステムレベルの損傷状態を把握することを目的としている。具体的には、構造物の特性（降伏変位、固有周期）、地震波の最大入力加速度から、多層建築構造物の各層の最大応答層間相対変位の推定システムと、構造物の特性（降伏変位、固有周期）、地震波の最大入力加速度、地震の震央距離から、1 質点構造物の損傷を推定するシステムと、階層型ニューラルネットワークを用いて構築した<sup>1)6)</sup>。

その結果、最大応答層間相対変位の推定については精度良く推定できることが、また、損傷の推定については内挿データに関しては精度良く推定できるが、外挿データや学習と異なる地震波の場合では、推定精度が悪くなることが明らかとなった。これまで行ってきた検討の範囲では、入力地震波が NN の学習データと異なる場合に

ついて今後さらに推定精度の検討が必要である。また、本研究で検討している損傷は、システムレベルの損傷であるが、実構造物への適用を考えると部材レベルの損傷の情報が必要となる。よって、今後は、システムレベルの損傷と部材レベルの損傷との関係についても検討する必要がある。

## 7. ライフサイクル性能の社会経済システムの観点からの分析

本研究では、住宅に関してライフサイクル・インベントリー分析 (LCIA) によって得られた製品環境負荷に関するデータに対する統合指標を、経済的手法に基づいて作成する可能性を明らかにすることである<sup>1)</sup>。LCIA によって明らかになる製品環境負荷は、CO<sub>2</sub> や NO<sub>2</sub> などの物質ごとに定量的に把握される。それらはさらに、与える環境負荷のカテゴリーに応じて自然科学的な手法で統合される。たとえば、地球温暖化負荷については、CO<sub>2</sub> や CFC などが温暖化負荷ポテンシャルに応じてウエイトが与えられ、CO<sub>2</sub> などの負荷に基準化されてカテゴリーとしての負荷に統合される。他の負荷データについても大気汚染、酸性雨、オゾン層破壊などといったライフサイクル・インパクトカテゴリーに統合される。製品のライフサイクル環境負荷をこのインパクトカテゴリーの段階で把握することは、それ自体、大切なものである。しかし、カテゴリーごとの負荷データを示すだけでは、環境負荷に関して最終的にもっとも望ましい製品や技術を選択することは困難である。一般に、ある特定のカテゴリーについては負荷が小さく、別のカテゴリーについては負荷が大きいということがありえるからである。

このような困難を回避するためには、統合指標を作成することが必要になってくる。温暖化、大気汚染、酸性雨、オゾン層破壊などの大気に関わるものから、水質・土壌汚染、さらには生態系毒性、人に対する毒性などについての定量的データから単一の環境負荷指標に統合する評価ウエイトが必要になってくるのである。この評価ウエイトを作成するために、ここでは、人々の選好を何らかの形で集計することによって、異なったインパクトカテゴリー間の負荷を統合する指標(選好評価指標)を作るという方法を用いた。選好評価指標は、ライフサイクル環境負荷に対する市場の評価の中に社会的評価があらわれると考え、評価を市場での評価と関連付けて獲得するものとする(市場評価手法)。

本調査では、カテゴリーデータの評価手法としてコンジョイント分析を用いた。また、今回の調査では、カテゴリーとして、温暖化負荷と大気汚染負荷を取り上げ、温暖化負荷については、今回は CO<sub>2</sub> 負荷についてのみ取り上げることとし、大気汚染負荷については SO<sub>2</sub> (二酸化硫黄) と NO<sub>2</sub> (二酸化窒素) をとりあげ、それぞれのライフサイクル・インベントリーデータを健康項目に関する重み係数を用いて統合した。

一般性能も含めた、プロファイルデザインを行い、東京の西新宿で調査を行った。その結果、住宅に関する属性評価に関しては、全体として満足できる結果が得られた。今後は、得られたこれらの推定値の分析をさらに進めていく予定である。

## 8. ライフサイクル性能・コスト評価システムの経営戦略から見た分析

ここでは、ライフサイクル性能・コスト評価システムの経営戦略から見た分析に関して、プラットフォーム型戦略策定におけるサイクル概念とコスト評価のシステムの新展開に関する研究を行った<sup>1)</sup>。

現代企業の戦略策定は製品戦略から企業さらには市場といった統合化された戦略がどのように作られてくるかに焦点をあてる必要がある。個々の技術や一企業の動きに焦点をあてる経営の分析から、より大きな視点への移行により、本質的な戦略構築の方法が見えてくる。このことは戦略策定におけるサイクル概念に代表されるあたらしい評価方法を導入すると共に、コスト評価と戦略評価の連動をはかる必要がある。これは、建築構造物のライフサイクル性能・コスト評価にも当てはまるものである。

本研究では、日本型産業の変容の必要性や、米国流の複合的プラットフォームの出現とプラットフォーム型社会とその戦略、新しいプラットフォームと新プロセス、米国のライフサイクルコストに関する研究、建設業界のライフサイクル・コストリング、ライフサイクル・コストリングと ABM (アクティブ・ベース・マネジメント) 等に関する考察を行った。

ライフサイクル・コストリングの普及は正確なコストの把握とともに、企画、設計からはじまる一連の作業のコストの把握を必要としてきた。いったい企画することはどれくらいのコストがかかるのだろうか、設計することと考えることのコストは、改善するためのコストは、いくらなのだろうか、時間をかけてよい性能を達成することのコストは本当に正当なものなのだろうかといった疑問が出てきた。性能を上げるための大きな投資をすることから、それを外部の資源ですることのコスト優位な条件を測定する必要が出てきた。ABM は、企業における活動基準ベースのコスト把握をする方法で、これにより正確なプロセスごとのコストが把握できるようになる。難しい仕事はその専門知識を有効に活用しないと大きなコストになる。人々の活動そのものが把握されるからである。

戦略に連動するコスト把握と評価は戦略の意図するところとコストの分析がどこまで可能にかかかっているところが大きい。コストの把握の方法がより正確になってはきているものの、戦略目標が複雑化したものになると戦略のプロセスの細分化がどこまでできるか、顧客と製品や市場を取り巻くサイクル環境にいかにか稠密に対応できるかによるところが大きい。そのためには一企

業の努力からもっと大きなプラットフォームの形成を前提としたものである政府、大学、産業、企業、個人を含んだ努力が必要になってくることが、明らかとなった。

## 9. まとめ

以上の様に、環境に調和した建築構造物のライフサイクルをどの様に考え、またどの様に制御していくかに関して、建築構造物のライフサイクル特性に関する実験的検討や、環境調和型のリカレント建築に関する種々のシミュレーションシステムの構築と、その有効性の検討を実施した。さらに、建築の専門的立場ばかりでなく、経済的観点からも検討を加えた総合的・学際的な研究を、貴研究助成により実施することができた。その結果、各論的成果の上にリカレント建築という新しい統合的コンセプトに想到する事ができた。本研究テーマは、まだ、その端緒についたばかりではあるが、今後、本研究で得られた成果を基に、より実際の展開を目指した研究を実施していく予定である。

文献(本研究に関しては、多くの論文があるが、ここでは主なもののみを示す)

- 1) 日産学術財団研究助成「環境調和型建築構造物のライフサイクル制御に関する研究」研究会資料、2001.2.
- 2) 石田陵、瀧澤重志、河村廣、谷明勲：再使用可能な建築構造部材オブジェクトデータベースを用いた取得および配置シミュレーション、日本建築学会、第 23 回情報システム利用技術シンポジウム論文集(報告)、pp.285-288, 2000.12.
- 3) 杜宇、織田瑞夫、石田陵、瀧澤重志、河村廣：遺伝的アルゴリズムを用いた鉄骨建築物の解体順序最適化、日本建築学会、第 23 回情報システム利用技術シンポジウム論文集(論文)、pp.205-210, 2000.12.
- 4) 岩田淳秀、河村廣、谷明勲、瀧澤重志、佐貫久：ファジィネットワークを用いた環境負荷を考慮した最適構造計画システム、日本建築学会、第 23 回情報システム利用技術シンポジウム論文集(報告)、pp.289-292, 2000.12.
- 5) 三好絹代、西野孝仁、三谷勲、松井千秋：CFT-SRC 柱継手のせん断力伝達に関する実験的研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 39 号、構造系、pp45-48、1999.6.
- 6) 井上賀介、谷明勲、河村廣、瀧澤重志：ニューラルネットワークを用いた建築構造物の損傷推定～地震及び観測点の特性を考慮した場合の推定精度の検討～、日本建築学会、第 23 回情報システム利用技術シンポジウム論文集(報告)、pp.309-312, 2000.12.