ニューラルネットワークを利用した「設計ノウハウ」
のシステム化に関する研究

—構造部材断面推定を対象として—

STUDY ON A SYSTEMATIZING METHOD FOR
DESIGN KNOWHOW BY NEURAL NETWORK

—For reasoning structural member section—

堤 和敏*, 河村 廣**, 谷 明勲***

Kazutoshi TSUTSUMI, Hiroshi KAWAMURA and Akinori TANI

This report proposes a systematizing method for "Design-Knowhow" on assuming member sections. "Design-Knowhow" consists of "general knowledges", "experienced explicit knowledges" and "experienced implicit knowledges". "General knowledges" and "experienced explicit knowledges" are easy to systematize by explicit logic, but "experienced implicit knowledges" are difficult. In this report, "experienced implicit knowledge" are acquired by neural network, and "Design-Knowhow" is systematized by integrating with other knowledges. From the result of the verification, neural network is proved to be effective to acquire "experienced implicit knowledges".

Keywords : *neural network, structural design study, member section, design knowhow*

ニューラルネットワーク、構造計画、部材断面、設計ノウハウ

1. はじめに

建築設計は本来、意匠、構造、設備、施工一体となった総合技術であるが、現代の複雑で大規模かつ高度な機能を要求される建築のもとでは必要とされる知識が広範になり専門化を余儀なくされている。しかし、よりよい建築を設計するためには、専門分化から統合への道をめざさなければならない。そのためには、各専門分野の知識・ノウハウを集約し、誰でもがその専門知識を取り出し、簡単に利用できるシステムを構築する事が重要である。近年、コンピュータハードの性能アップとA.I.・ファジィ理論・ニューラルネットワーク・オブジェクト指向型システム等の人工知能的システム化手法の発展により、従来の単なる計算の延長ではなく、より知的な分野を対象としたシステム^{1) 2)}や構造計画指向型³⁾のコンピュータ利用が試みられるようになり、コンピュータによる「設計ノウハウ」のシステム化が可能な状況となってきた。

本論は、コンピュータによる「設計ノウハウ」の共有

化、標準化の試みの第1歩として、「設計ノウハウ」の分析を行い、既存のシステム化手法と新しい情報処理技術であるニューラルネットワークとの統合化を図ることにより、構造計画段階での構造部材断面推定を対象とした「設計ノウハウ」のシステム化手法の提案・開発・検証を行ったものである。

2. 「設計ノウハウ」の分析とシステム化手法

「設計ノウハウ」をシステム化するためには、「設計ノウハウ」がどのような「知識」で構成されているか、またその「知識」をシステム化するにはどのような手法を用いたら良いか分析することが必要である。

「設計ノウハウ」には、設計を行う上での全ての「知識」が含まれる。この「知識」は、大きく「一般的知識」と「経験的知識」に分類することができる。

「一般的知識」は、各種規準・文献等を通して誰でも得る事が出来る「知識」であり、アルゴリズムが明確にされているためシステム化は通常のプログラム言語で可能

* ㈱フジタ設計統括部 博士(工学)

** 神戸大学工学部建設学科 教授・工博

*** 神戸大学工学部建設学科 助教授・博士(工学)

Architectural & Engineer Division, FUJITA CORPORATION, Dr. Eng.

Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Kobe Univ., Dr. Eng.

Associate Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Kobe Univ., Dr. Eng.

である。一方、「経験的知識」は、長年の設計を通して自分で獲得した知識であり、誰でもが得る事が出来るものではなく、個人に依存している。また、「経験的知識」は大きく「経験的明示知識」と「経験的非明示知識」に分類する事が出来る。「経験的明示知識」は、「状況」と「知識」との間の因果関係を言葉で説明できる「知識」であり、一方、「経験的非明示知識」は、その因果関係を言葉では説明することが難しい「知識」と定義する事が出来る。従って、この「経験的非明示知識」の獲得が「設計ノウハウ」のシステム化の重要なポイントとなる。「経験的知識」に関するシステム化手法としてエキスパートシステム、ファジィ理論、ニューラルネットワークなどの応用が考えられる。エキスパートシステムは、知識ベースと推論エンジンとから成るが、知識ベースの構築、即ち、知識獲得の手法が難しく、「経験的明示知識」に対しては有効であるが、「経験的非明示知識」に対しては、限界がある。ファジィ理論は、エキスパートシステムにおける推論や知識にあいまい性を付与し、より現実に近い情報処理を可能とするもので「経験的明示知識」を、より設計者の感覚に近づけることができるが、知識獲得手法そのものを与えるものではない。

一方、ニューラルネットワークは、人間の神経回路を模したネットワークを用いて、いくつかの実例を教師信号として自己学習する事により、任意の入力に対して出力を行う工学的情報処理システムである^{4) 5)}。従って、知識を明示させなくても、知識が既に盛り込まれている結果(図面等)を分析する事により知識の獲得が可能であり、「経験的非明示知識」の獲得に最も有効である。

図-1に階層型ニューラルネットワークの概念図を示す。図中に○で示すものがユニットで、各ユニットは図中に示すように矢線で結合されている。 $f(x)$ は、入力関数であり、通常はシグモイド関数が用いられる。

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (1)$$

図-1 階層型ニューラルネットワークの概念図

3. 一般的な部材断面推定法

構造計画段階での部材断面の推定法は、種々考えられるが保有水平耐力を評価対象とした方法は、下記の通りである。

1)設計者の過去の設計物件に対する経験に基づいて、床面積当たりの平均建物重量(地上部の地震力算定用建

物重量/地上部の全床面積)を仮定する。

- 2)床面積当たりの平均建物重量をもとに、建物重量、層せん断係数等を求める。
- 3)建物構造、壁配置等を考慮して、構造特性係数 D_s を仮定し、建物の必要保有水平耐力を推定する。
- 4)壁の負担せん断力を仮定して、必要保有水平耐力より壁のせん断耐力を減じたものを柱の必要負担せん断耐力とする。
- 5)柱の必要負担せん断力より柱の反曲点位置を仮定し、柱、梁の必要部材耐力を算定する。
- 6)部材の目標性能(軸応力度、せん断応力度、引っ張り鉄筋比等)が所定値を満足するように部材断面を推定する。

上記で使用している主な知識を分類して、表-1に示す。

簡略的な部材断面の仮定法は種々提案されており^{6) 7)}、システム化⁸⁾もされているが、いずれも平均建物重量、 D_s 値、壁の負担せん断力が既知であることを前提としており、これらの値を推定するシステムはまだ存在しない。以上の分析により「部材断面の推定」には、「経験的非明示知識」として「平均建物重量」、「構造特性係数 D_s 値」、「壁の負担せん断力」の知識を得ることが必要であることがわかる。「壁の負担せん断力」は、壁断面積に壁の負担せん断応力度を乗じて求める事が出来る。壁断面積は図面より読み取れる壁長さと経験的に決定される壁厚によって簡単に求める事が出来る。

従って、壁の負担せん断応力度で壁を評価する方が一般化が容易なため本論では、「壁の負担せん断応力度」を「経験的非明示知識」の対象とする。

表-1 部材断面推定における主な知識の分類

一般的知識	層せん断力係数算定式 必要保有水平耐力算定式 柱・梁部材の耐力式
経験的 明示知識	柱反曲点位置 部材の目標性能 使用材料(強度、径等)
経験的 非明示知識	平均建物重量 D_s 値 壁の負担せん断力

4. 経験的非明示知識の獲得

著者らは、既に「部材断面推定」における「経験的非明示知識」である「平均建物重量」、「構造特性係数 D_s 値」、「壁のせん断応力度」の「知識」をニューラルネットワークを用い、ベテラン設計者が作成した図面や計算書といった構造設計の成果物の中から直接「知識」を獲得するシステムを発表している^{9) 10) 11) 12) 13)}。

これらのシステムは、意匠図より読み取れる簡単なデータを入力としているために、構造設計の知識が少ない人

でも利用する事が出来るシステムとなっている。

本項では、これらのシステムの概略を述べる。

a) 平均建物重量の推定⁹⁾

文献9)に示すように入力信号は、①地上部の構造種別、②建物地上部層数、③地上部の主な用途、④柱一本当たりの荷重負担床面積、⑤耐力壁の存在率、⑥平面形状特性、の6個とし、教師信号として平均建物重量を与えた。ネットワークは、入力層6ユニット、中間層1層15ユニット、出力層1ユニットの階層型ネットワークを構成した。実際の設計物件をもとに、18個のデータによる学習の結果は、35個のデータに対して推定比(推定値/実際値)の平均値0.98、標準偏差0.15であり、構造計画段階で使用するには十分な精度を有している。

図-2に平均建物重量推定結果の比較図を示す。

b) 構造特性係数 D_s 値の推定¹⁰⁾

文献10)に示すように入力信号は、①対象層の構造種別、②建物地上部層数、③対象層の階高、④当該方向平均スパン長、⑤当該方向対象層の連層壁の存在率、⑥当該方向対象層のせん断壁の存在率、の6個とし、教師信号として D_s 値を与えた。ネットワークは、入力層6ユニット、中間層1層15ユニット、出力層1ユニットの階層型ネットワークを構成した。実際の設計物件をもとに、25個のデータによる学習の結果は、39個のデータに対して推定比(推定値/実際値)の平均値1.00、標準偏差0.07であり、構造計画段階で使用するには十分な精度を有している。図-3に D_s 値に対する推定結果の比較図を示す。

c) 壁せん断応力度の推定^{11) 12) 13)}

文献11)に示すように、壁のせん断応力度の推定は、壁を浮き上がりまたは曲げ崩壊系を示す「連層壁」、せん断崩壊系を示す「独立壁」、連層壁に接する「取り付け壁」の3種類に分類し、①連層壁と独立壁・取り付け壁が混在する場合、②連層壁のみが存在する場合の2ケー

スについて考えれば良い。

①連層壁と独立壁・取り付け壁が混在する場合

文献11)、12)、13)に示すように入力信号は、①連層壁形状(壁高さ/壁長さ)、②対象としている層位置、③対象としている層より上層に取り付き壁がある場合の影響係数、④対象としている層に取り付き壁がある場合の影響係数、⑤対象としている層より下層に取り付き壁がある場合の影響係数、⑥対象としている層より上層に独立壁がある場合の影響係数、⑦対象としている層に独立壁がある場合の影響係数、⑧対象としている層より下層に独立壁がある場合の影響係数、の8個とし、教師信号として連層壁の補正応力度、取り付け壁のせん断応力度、独立壁のせん断応力度を与えた。補正応力度とは、次項での述べる連層壁のみが存在する場合の連層壁の応力度(基本応力度)に対して、独立壁・取り付け壁が存在することによって連層壁に派生する応力度であり、独立壁・取り付け壁が存在する場合の連層壁の応力度は、本項の補正応力度と次項の基本応力度を加算することによって求められる¹¹⁾。ネットワークは、入力層8ユニット、中間層2層各層25ユニット、出力層3ユニットの階層型ネットワークを構成した。学習は、連層壁のプロポーション H/B (H :壁高さ、 B :壁長さ)が2, 3, 4の3タイプそれぞれに、独立壁が配置された4タイプ・取り付け壁が配置された4タイプ、独立壁・取り付け壁が配置された1タイプ、計27タイプで行った。

検証は、学習に使用した壁配置そのものの検証である再現性検証、壁配置の組み合わせを変えた内挿性検証、壁配置そのものをえた外挿性検証を行った。再現性検証では、平均誤差(各層毎の推定値と実際値との差を全層での実際値の最大値で除したものの平均値)は0.05、内挿性検証での平均誤差は0.15と十分な精度であった。一方、外挿性検証での平均誤差は $H/B=8$ の時、0.34と多少大きい初期の構造計画段階で使用するには問題ないと思われる。

図-4に壁応力度に対する推定結果の比較図を示す。

図-2 平均建物重量の推定結果⁹⁾

図-3 D_s 値の推定結果¹⁰⁾

図-4 壁応力度の推定結果¹³⁾

②連層壁のみが存在する場合

浮き上がり降伏系を示す連層壁の負担せん断応力度を決定づけている最も支配的な要因は著者の設計経験によれば、1)壁のプロポーション(壁高さ/壁長さ)、2)対象層の連層壁内での位置、3)壁の配置位置、4)壁とフレームとの存在率、である。従って、本論では入力信号として下記の5個のパラメータを採用することにした。

①連層壁形状(壁高さ/壁長さ)

$$IN1 = (H/B - 5.0) / 3.0 \quad (4)$$

H:連層壁の壁高さ、B:壁長さ

H/B=8.0の時 1.0、H/B=2.0の時 -1.0 に規準化。

②当該方向対象層の連層壁の存在率

$$IN2 = (Wrs/S - 0.10) / 0.05 \quad (5)$$

S:連層壁の存在率、Wrs:当該方向対象層の全スパン数

Wrs/Sが、0.05の時 -1.0、0.15の時 1.0 に規準化。

③連層壁の存在位置に対するフラッグ1(境界梁の本数)

$$IN3 = \begin{cases} 1.0 & \text{境界梁2本の場合} \\ -1.0 & \text{境界梁1本の場合} \end{cases} \quad (6)$$

④連層壁の存在位置に対するフラッグ2(フレーム位置)

$$IN4 = \begin{cases} 1.0 & \text{内部フレームの場合} \\ -1.0 & \text{外部フレームの場合} \end{cases} \quad (7)$$

⑤連層壁の中での対象層の位置

$$IN5 = 1.0 - 2.0 * (Nz - jz) / (Nz - 1) \quad (8)$$

Nz:連層壁の層数、jz:対象層(上層より)

対象層が最上層の時 -1.0、最下層の時 1.0 に規準化。

一方、教師信号は、連層壁の負担せん断応力度比(rw)を採用するが、ニューラルネットワークに使用しているシグモイド関数の性質上、出力は[0.1, 0.9]の範囲に限定した方がよい。従って、負担せん断応力度の最大値(1.25)、最小値(-1.0)を求め、ほぼ0.9から0.1と範囲に納まるように下式により規準化を行う。

$$rw = Qw * 1000 / tw / B / \sqrt{F_c} \quad (9)$$

$$OUT = (rw - 0.1) * 0.35 + 0.5 \quad (10)$$

Qw: 連層壁の負担せん断耐力(tf)

tw: 連層壁厚さ(cm), B: 連層壁長さ(cm)

Fc: コンクリートの圧縮に対する材料強度(kgf/cm²)

また、ネットワークは図-5に示す入力層5ユニット、中間層1層12ユニット、出力層1ユニットの階層型ネットワークを構成した。学習は、図-6に示す壁配置モデルを作成し、表-2に示す壁配置組み合わせに対して、●印を学習用モデルとして、○印を検証用モデルとして使用した。学習の結果、推定誤差(推定値-実値)の平均値は0.00、標準偏差は0.12であり、構造計画段階で使用するには十分な精度を有している。図-7に基本応力度に対する推定結果の比較図を示す。

図-5 ニューラルネットワークの構成

図-6 基本応力度学習用モデル図

表-2 基本応力度学習・検証モデル一覧

壁配置タイプ	X方向スパン				L(10スパン)				M(5スパン)				S(3スパン)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
16層	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
8層	○	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4層	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

壁配置タイプ 1: 内部フレーム、境界梁2本
2: 内部フレーム、境界梁1本
3: 外部フレーム、境界梁2本
4: 外部フレーム、境界梁1本

図-7 基本応力度に対する推定結果

5. 部材断面推定のシステム化

4. 項で獲得された「経験的非明示知識」とアルゴリズムが明確な「一般的知識」、「経験的明示知識」とを統合化する事によって、経験の少ない設計者でもベテラン設計者並の構造性能・施工性・コスト等を総合的に考慮した品質の高い部材断面の推定を行うことができるシステム化が可能である。「経験的明示知識」は、「経験的知識」を言葉で表現できるものであり、曖昧性が含まれている場合も多い。従って、ファジィ理論を用いたほうがより設計者の感覚に近いものとなると思われるが、本論では、「経験的非明示知識」に重点をおいているので確定量として扱った。今後の課題である。

本論で提案する「経験的非明示知識」をニューラルネットワークで学習させた「部材断面の推定」手順を以下に示す。本論では、目標性能を必要保有水平耐力とし、偏心が無く、変形はあまり問題とならない中低層のRC/SRC構造物を対象とする。紙面の都合上、RC造について述べるが、SRC造についても同様の手順でシステム化が可能である。推定する部材断面は、構造計画段階を対象としているために、梁は平均スパン長に対してX、Y方向各階1種類、柱は各階中柱と隅柱の2種類、壁についても各階X、Y方向1種類とした。図-8にシステムフロー図を、また本システムで必要な情報・知識と得られる出力の一覧を表-3~5に示す。

① 平均建物重量の推定

構造種別、建物規模等により平均建物重量をニューラルネットワークにより推定する。

② 建物重量等の算定

推定された平均建物重量を、各階の床面積および柱1本当たりの荷重負担床面積に乗じて、各階の建物重量、柱長期軸力、基礎設計用長期軸力を算定する。

③ 構造特性係数Ds値(初期値)の推定

構造種別、建物規模等により構造特性係数Ds値をニューラルネットワークにより推定する。

④ 必要保有水平耐力の算定

②で求めた各階の建物重量より、Ai分布に従い地震力によって各階に生じる水平力を求める。次に、③で求めた構造特性係数Dsより、必要保有水平耐力を算定する。

⑤ 壁せん断応力度の推定(「経験的非明示知識」)

構造種別、建物規模、壁配置等により壁せん断応力度をニューラルネットワークにより推定する。

⑥ 壁せん断力分担割合の算定、Ds値・必要保有水平耐力の補正

⑤で求めたせん断応力度に、壁長さ、壁厚を乗じて、壁の負担せん断力を求める。求めた壁の負担せん断力を④で求めた必要保有水平耐力で除して壁のせん断力分担割合を求める。Ds値と、壁のせん断力分担割合の

間には、明示的な関係(一般的知識)¹⁴⁾があるために、ニューラルネットワークで推定した値をそのまま使うと、矛盾する場合もある。従って、本論では、③のニューラルネットワークで求めたDs値は、壁のせん断力分担割合を求めるための初期値と位置づけ、柱群種別はFAとして部材断面を推定する事を前提に、壁のせん断力分担割合より、Ds値を補正し、必要保有水平耐力の補正を行う。必要保有水平耐力を補正すると、壁のせん断力分担割合も変化し、Ds値も変化するが、Ds値の補正は、1回のみとした。

⑦ 柱必要せん断耐力の推定

⑥で求めた必要保有水平耐力から壁の負担すべきせん断耐力を引いた残りを柱の負担せん断力とする。この柱負担せん断力を耐力壁の付帯柱ではない柱の本数で除して、柱の一本当たりの必要負担せん断力を求める。

⑧ 節点必要曲げ耐力の算定

⑦で求めた柱必要せん断耐力から、柱の反曲点位置を仮定し、柱の必要曲げ耐力、節点必要曲げ耐力、梁のせん断耐力を求める。

⑨ 梁断面の推定

⑧で求めた節点必要曲げ耐力より、梁部材の目標性能(引張り鉄筋比、せん断応力度等)を満足するように梁断面を推定する。また、推定した断面での実際の梁の曲げ耐力を算定する。

⑩ 柱必要耐力の算定

⑨で推定された梁断面に対する曲げ耐力に対して、梁降伏系を保証するために梁曲げ耐力に割増し係数を乗じて、必要な柱耐力の算定を行う。

⑪ 柱断面の推定

⑩で求めた柱必要耐力に対して目標性能(引張り鉄筋比、軸応力度、せん断応力度等)を満足するように柱断面を推定する。

⑫ 壁の断面推定

⑥で求めた壁の必要せん断耐力・壁厚を満足するように、壁せん断補強筋を求める。

表-3 建物形状に関する入力データ

1)建物層数	2)X,Y方向スパン数
3)X,Y方向建物全長 (m)	
4)X,Y方向連層壁の長さ(m)	
5)X,Y方向連層壁と境界梁との関係(外端か内端か)	
6)X,Y方向連層壁の存在位置(外フレームか内フレームか)	
7)地盤条件(杭支持深さ、N値)	
8)各階構造種別	9)各階階高 (m)
10)各階建物用途と仕上り荷重	
11)各階床面積 (m ²)	12)各階柱本数
13)各階X,Y方向梁本数	
14)各階X,Y方向連層壁枚数	
15)各階X,Y方向せん断壁枚数	
16)各階X,Y方向取り付け壁枚数	
17)各階X,Y方向耐力壁付帯柱以外の柱本数	
18)各階建物外周長さ (m)	

表-4 「経験的明示知識」の一覧

1) D s 最大層の求め方	2) 壁厚
3) 壁種別の求め方	4) 柱反曲点位置係数
5) 梁幅/梁成の比	6) 鉄筋有効成/梁成
7) 梁 F_t 耐力/節点耐力	8) 梁目標引張り鉄筋比
9) 梁目標せん断応力度	10) コンクリート強度
11) 梁主筋強度	12) 梁主筋径
13) 梁下筋本数/上筋本数	14) 梁最小主筋本数
15) 梁せん断補強筋径	16) せん断補強筋強度
17) スターフピッチの範囲	18) 梁断面のまとめ方
19) 柱耐力割増し率	20) 柱目標引張り鉄筋比
21) 柱 F_t 耐力/節点耐力	22) 柱目標せん断応力度
23) 柱目標軸応力度	24) 柱主筋径
25) 柱主筋強度	26) 柱せん断補強筋径
27) 柱せん断補強筋強度	28) F_t ピッチの範囲
29) 柱最小主筋本数	30) 柱断面のまとめ方
31) 壁補強筋径・断面積	32) 壁補強筋強度
33) s/λ 筋断面積	34) s/λ 筋の耐力割増率

6. システムの構成

本システムは、マイクロソフト社の表計算ソフト「Multiplan」¹⁵⁾をベースに開発を行った。

本システムは、2つのプログラム「入力部」と「出力部」とに分かれている。「入力部」は、表-3に示す建物形状に関するデータを入力する部分と、入力値に基づいて「経験的非明示知識」である「平均建物重量」・「D s 値」・「壁負担せん断応力度」を推定する部分で

(網掛け部はニューラルネットワーク部を示す)

図-8 システムフロー図

ある。必要な入力情報は、7)の地盤条件を除き、すべて意匠計画図より誰でも読みとる事が出来る簡単なものである。「出力部」は、「入力部」で求めた「平均建物重量」・「D s 値」・「壁負担せん断応力度」を用い

表-5 知識の一覧(「既知の情報」の中の数字は表-3に、「経験的明示知識」の数字は表-4の項目番号に対応)

No.	既知の情報	一般的知識	経験的明示知識	経験的非明示知識	出力
①	1), 2), 3), 8), 9), 10), 11), 12), 14), 15), 18)			平均建物重量の推定法 (ニューラルネットワークによる)	平均建物重量
②	1), 2), 3), 11) 平均建物重量	建物重量・軸力算定法			層重量、長期軸力、基礎軸力
③	1), 2), 3), 8), 9), 11), 13), 14), 15)		1)	D s 値の推定法 (ニューラルネットワークによる)	D s 値
④	1), 7), 9) 層重量、D s	必要保有水平耐力算定法・ 地盤種別の評価法 ¹⁴⁾			必要保有水平耐力
⑤	1), 2), 4), 5), 6), 9), 14), 15), 16)			連層壁基本応力度・補正 応力度の推定法 (ニューラルネットワークによる)	連層壁・せん断壁・取り付き壁の 応力度
⑥	1), 2), 3), 14), 15), 16), 壁せん断応力度 必要保有水平耐力	壁負担せん断力算定法 壁のせん断力分担率とD s 値との関係 ¹⁴⁾	2), 3)		修正必要保有水平耐力、 壁負担せん断力
⑦	17), 壁負担せん断力 必要保有水平耐力	柱一本当たりの負担せん断力 算定法			柱一本当たりの負担せん断力
⑧	1), 2), 3), 8), 9) 柱負担せん断力	柱・梁の必要耐力算定法	4)		節点必要曲げ耐力、 梁必要せん断耐力
⑨	1), 2), 3) 節点必要曲げ耐力 梁必要せん断耐力	梁曲げ・せん断耐力式 ¹⁴⁾	5)~18), 33), 34)		梁断面リスト、 梁実断面の耐力
⑩	1), 8), 9), 梁実際の耐力、 柱長期軸力、柱負担せん断力	節点回りの柱耐力分配率・ 柱必要曲げ耐力の算定法	4), 7), 19), 21)		柱終局時軸力、 柱必要曲げ・せん断耐力
⑪	1), 8), 9), 柱長期・ 終局時軸力、柱必要曲げ・ せん断耐力	柱曲げ・せん断耐力式 ¹⁴⁾	20)~30)		柱断面リスト
⑫	1), 2), 3), 壁負担せん断 応力度、柱長期軸力、柱断面リスト	壁せん断耐力式 ¹⁴⁾	31), 32)		壁断面リスト

て、5. 項の手順に従って、表-4に示す「経験的明示知識」を利用しながら部材断面の推定を行う部分である。

「経験的明示知識」については、著者の経験に基づいて、デフォルト値が設定されている。従って、特に入力する必要はないが、それぞれの設計者の経験や思想によって、デフォルト値を修正すれば、より個人の指向に合わせた細やかな断面推定を行う事が出来る。

本システムでは、下記の出力を行う事が出来る。

- 1) 必要保有水平耐力
- 2) 梁必要耐力
- 3) 梁断面リスト
- 4) 柱必要耐力
- 5) 柱断面リスト
- 6) 壁断面リスト

ハードは、PC9801RA21で作成した。図-9にシステム構成図を示す。

7. 検証例 (RC造5層店舗ビル)

検証としてRC造5層店舗ビルモデルを新たに作成し、本論で提案しているシステムで部材断面の推定を行った。

推定された断面で保有水平耐力の算定を行い、推定された断面が目標の性能を満足しているかどうかを検証する事によって本システムの妥当性を検証する。

保有水平耐力は、(株)フジタの一貫構造設計プログラム「BUILSYS-V3」¹⁶⁾を使用した。図-10にモデル図を示す。推定結果を表-6～表-14に、推定結果と実際値との比較を表-15～表-17に示す。

表-6 必要保有水平耐力の推定結果一覧

層	重量 (tf)	Σ 重量 (tf)	A_i	D_s		Q_{un} (tf)	
				(X)	(Y)	(X)	(Y)
5	4678	4678	1.74	0.35	0.40	2850	3257
4	4678	9356	1.43	0.35	0.40	4681	5350
3	4678	14034	1.25	0.35	0.40	6146	7024
2	4678	18712	1.12	0.35	0.40	7307	8351
1	4678	23391	1.00	0.35	0.40	8187	9356

表-7 必要柱・壁せん断耐力の推定結果一覧

層	壁分担率		Q_c (tf)		長期軸力 (tf)	Q_w (tf)	
	(X)	(Y)	(X)	(Y)		(X)	(Y)
5	-0.15	0.43	47	29	73	-427	1398
4	0.37	0.66	43	28	146	1748	3508
3	0.42	0.65	52	38	219	2580	4569
2	0.40	0.63	63	47	292	2926	5302
1	0.07	0.15	110	122	365	564	1444

表-8 X方向梁必要耐力・断面の推定結果一覧

層	必要耐力		断面		主筋本数		スーラップ°	
	M_i (tfm)	Q_g (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ピッチ (mm)
R	114	13	45	90	4	3	2	250
5	161	18	45	90	5	4	2	250
4	188	21	50	95	6	5	2	250
3	230	26	50	95	7	6	2	250
2	304	34	50	95	10	7	2	250
1	265	30	45	150	5	4	2	250

また、図-11にヒンジ発生図を示す。

図-9 システム構成図

伏図（破線は壁位置を示す）

X方向軸組図（壁は外周部のみ）

Y方向軸組図（壁は外周部のみ）

図-10 検証モデルの伏・軸組図

表-9 Y方向梁必要耐力・断面の推定結果一覧

層	必要耐力		断面		主筋本数		スーラップ°	
	M_j (tfm)	Q_g (tf)	幅 (cm)	成 (cm)	上 (D25)	下 (D25)	本数 (D13)	ピッチ (mm)
R	69	8	45	85	3	3	2	250
5	102	12	45	85	3	3	2	250
4	132	15	45	90	4	3	2	250
3	169	19	45	90	6	4	2	250
2	289	32	45	90	10	8	2	250
1	292	33	45	150	6	4	2	250

表-10 中柱の必要耐力

層	長期軸力 (tf)	X方向				Y方向			
		曲げ (tfm)		せん断力 (tf)	せん断力 (tf)	曲げ (tfm)		せん断力 (tf)	せん断力 (tf)
		柱頭	柱脚			柱頭	柱脚		
5	73	91	81	54	55	58	35		
4	146	80	95	55	57	59	36		
3	219	116	110	70	78	82	50		
2	292	135	113	77	102	86	59		
1	365	197	212	128	223	234	143		

表-11 隅柱の必要耐力

層	長期軸力 (tf)	X方向						Y方向					
		軸力 tf		曲げ tfm		Qc	tf	軸力 tf		曲げ tfm		Qc	tf
		正	負	top	bot			正	負	top	bot		
5	18	3	34	46	40	27	5	31	27	29	18		
4	37	2	71	40	48	27	10	63	29	29	18		
3	55	-4	114	58	55	35	13	97	39	41	25		
2	73	-13	160	67	57	39	10	136	51	43	29		
1	91	-30	213	98	106	64	-6	189	112	117	71		

表-12 中柱の断面推定結果一覧

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ				
		X	Y	X	Y	ピッチ (mm)		
		D25	D25	D13	D13			
5	75	6	3	2	2	100		
4	75	6	3	2	2	100		
3	80	6	4	2	2	100		
2	80	6	4	2	2	100		
1	80	9	10	2	3	50		

表-13 隅柱の断面推定結果一覧

層	断面 (cm)	主筋本数		フープ				
		X	Y	X	Y	ピッチ (mm)		
		D25	D25	D13	D13			
5	75	3	3	2	2	100		
4	75	4	3	2	2	100		
3	80	5	3	2	2	100		
2	80	6	3	2	2	100		
1	80	9	9	2	2	50		

表-14 壁の必要耐力・断面の推定結果一覧

層	X方向				Y方向			
	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)	Qw (tf)	壁厚 (cm)	補強筋	ピッチ (mm)
5	-53	15	2-D13	200	117	15	2-D13	200
4	218	15	2-D13	200	292	15	2-D13	200
3	322	15	2-D13	200	381	15	2-D13	200
2	366	15	2-D13	200	442	15	2-D13	200
1	71	15	2-D13	200	120	15	2-D13	200

表-15 建物重量の比較

層	各階重量			Σ重量		
	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際
5	4678	4348	1.08	4678	4348	1.08
4	4678	4687	1.00	9356	9034	1.04
3	4678	4815	0.97	14034	13850	1.01
2	4678	4843	0.97	18712	18692	1.00
1	4678	4843	0.97	23391	23536	0.99

表-16 壁せん断応力度係数の比較

層	X方向			Y方向		
	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際	推定値 (tf)	実際値 (tf)	推定/実際
5	-0.29	-0.41	0.71	0.63	0.43	1.47
4	1.18	1.50	0.79	1.57	1.69	0.93
3	1.73	1.87	0.93	2.05	2.20	0.93
2	1.97	2.29	0.86	2.38	2.37	1.00
1	0.38	1.23	0.31	0.65	1.36	0.48

表-17 Ds値の比較

	推定値	実際値	推定/実際
X方向	0.35	0.35	1.00
Y方向	0.40	0.40	1.00

表-18 必要保有水平耐力の比較

層	X方向			Y方向		
	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標	目標値 (tf)	実際値 (tf)	実際/目標
5	2850	2762	0.97	3257	3111	0.96
4	4681	4667	1.00	5350	5257	0.98
3	6146	6226	1.01	7024	7013	1.00
2	7307	7461	1.02	8351	8404	1.01
1	8187	8389	1.02	9356	9449	1.01

Y方向軸組図 (壁は外周部のみ)
(▲: 基礎浮き上がり ・: 部材降伏を示す)

図-11 ヒンジ発生図

8. 考察

1) 建物重量について (表-15参照)

本論では、平均建物重量として荷重を評価しているために、上階においては、荷重を多少過大評価 (推定比 1.08) し、下層部では、過小評価 (推定比 0.97) しているが、全体としてみれば、非常によい精度 (推定比 0.99) で推定出来た。

2) 壁のせん断応力度について (表-16 参照)

X, Y 方向とも、最下層を除いては、非常によい推定精度である。最下層で誤差が大きい理由は、一般に最下層では浮き上がりが生じた後のせん断応力度の低下は大きい、本論での学習モデルは1スパンの連層壁であったために、本例のような複数スパンの連層壁に対しては浮き上がりが生じた後のせん断応力度の低下を過大に評価したためと思われる。

3) D_s 値について (表-17 参照)

X, Y 方向とも推定通りであった。

4) 保有水平耐力について (表-18 参照)

X, Y 方向とも、推定精度 (推定比 0.96~1.02) は非常によい。

5) 降伏系について (図-11 参照)

X, Y 方向とも、壁は浮き上がり崩壊系を示し、フレームは梁降伏系を示している、想定した崩壊系を満足している。ただし、最下階の柱脚では柱降伏系を想定していたが、壁のせん断応力度を過小評価して柱断面を設計したために柱耐力に余裕がありすぎて、梁降伏となっている。

6) 部材断面について (表-8, 9, 12, 13 参照)

2) 項の理由により、1階柱の鉄筋本数が多すぎると思われるが、全体的には、保有水平耐力を満足し、梁降伏系となっていることから、構造計画段階で使用するには十分な精度で推定できていると思われる。

9. 結論

本論では、ニューラルネットワークを利用して「経験的非明示知識」をシステム化することにより、構造部材断面を意匠計画図より誰でも読みとる事が出来る簡単なデータを使って、推定する事が出来るシステムを構築し、併せて検証モデルを作成し、本システムにより推定した断面で保有水平耐力の解析を行い、本システムの妥当性の検証を行った。以下に、得られた結論を述べる。

- 1) 「設計ノウハウ」は、「一般的知識」・「経験的非明示知識」・「経験的非明示知識」に分類することが出来る。
- 2) ニューラルネットワークは、「経験的非明示知識」の知識獲得に有効である。
- 3) 「設計ノウハウ」に対するニューラルネットワークによる学習は、知識が既に盛り込まれている図面や計算書等を分析することによって行われるために、品質が高く、また幅広い範囲 (形状・規模・用途等) の図面や計算書等の収集を行うことが重要である。
- 4) ニューラルネットワークによる「経験的非明示知識」と通常のアルゴリズムで処理できる「一般的知識」・「経験的非明示知識」とを統合化することにより、構造設計の経験が少ない (「ノウハウ」を持っていない) 設計

者に対しても「構造部材断面」の精度良い推定を支援するシステム化が可能である。

5) 本論でのシステム化手法は、「構造部材断面推定」のみならず構造設計全般に亘る「ノウハウ」のシステム化へ発展させることができる。

上記に述べた本論での成果は、建築設計において次のような意義を有している。

6) 組織設計として、担当者の設計経験に因らず、設計品質を確保する事が出来る。

7) 専門的な構造知識は必要としないため、意匠設計者でも利用する事が出来、計画の初期段階から構造部材断面を考慮した総合的な意匠計画を行う事が出来る。

8) 従来、建築設計において意匠・構造・設備と専門分化が進んでいたが、各専門分野の「ノウハウ」の知識獲得及びシステム化への道筋を開く事により、意匠・構造・設備を総合的に設計する統合化への道筋を拓くことができよう。

参考文献

- 1) 堤和敏・松林隆道・片岡裕美・鹿野和彦: A. I ツールを利用した構造設計エキスパートシステムの研究 その2 保有水平耐力評価パイロットシステムの開発 日本建築学会大会学術講演集 A, 1991. 9, pp. 1373-1374.
- 2) 広瀬啓一・新美勝之・中井正一・他: 大規模柔軟構造物の振動解析—オブジェクト指向による問題解決—; 第14回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 1991年12月 pp. 103-108.
- 3) 榎原浩・河村廣・谷明勲: インテリジェントファジィネットワークによる構造計画 (オブジェクト指向の推論による全体構造計画); 第15回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 1992年12月 pp. 299-304.
- 4) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., "Learning Representations by Back-Propagation Errors," Nature, 323-9, Oct. 1986, pp. 533-536.
- 5) 八名和夫・鈴木義武「ニューロ情報処理技術 基礎と応用」海文堂 1992年2月 pp. 41-48.
- 6) 谷賀信・豊島光夫「構造の計画と計算 下」構造計算シリーズ1 丸善 1975年1月 pp. 281-304.
- 7) 矢野克巳・梅村勉・小林紳也・松井源吾・望月洵「新建築学体系 2.5 構造計画」彰国社, 1981年8月 pp. 142-145, p. 108.
- 8) 片岡裕美・松林隆道・堤和敏: 構造計画支援システム FIND の開発、日本建築学会大会学術講演集 A, 1993. 8, pp. 1549-1550.
- 9) 堤和敏・河村廣・谷明勲: ニューラルネットワークを利用した平均建物重量推定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO. 458、1994年4月号
- 10) 堤和敏・河村廣・谷明勲: ニューラルネットワークを用いた構造設計における「経験的非明示知識」の知識獲得に関する研究—構造特性係数 D_s 値の推定法を対象として—、構造工学シンポジウム論文集 1994年3月、pp. 261-267.
- 11) 堤和敏・谷明勲・河村廣・松林隆道・片岡裕美: ニューラルネットワークを利用した構造計画段階での連層壁応力度推定システムの研究、日本建築学会構造系論文集、NO. 456、1994年2月号、pp. 81-86.
- 12) 堤和敏・松林隆道・片岡裕美・河村廣・谷明勲・山田貴彦: ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その1 概要、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、1993年9月、pp. 1575-1576.
- 13) 山田貴彦・河村廣・谷明勲: ニューラルネットワークによる壁応力度の推定に関する研究 その2 推定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、1993年9月、pp. 1577-1578.
- 14) 日本建築センター: 構造計算指針・同解説 (1991年版) pp. 87-112, pp. 230-234.
- 15) Multiplan は米国マイクロソフト社の登録商標。
- 16) B C J—電 17.4:ビルディングレター 91.4増刊号

(1994年5月10日原稿受理, 1995年4月20日採用決定)