

論文 ニューラルネットワークを用いた RC せん断破壊型耐震壁の配置と負担せん断力の関係に関する研究

村地由子^{*1}, 望月重^{*2}

要旨: 耐震壁を有する 2 層 2 スパン RC 架構の実験結果を基に, 壁板の配置情報を入力信号とし, 1 層 1 スパン単独耐震壁の負担せん断力に対する壁板の負担せん断力の比を出力信号とするニューラルネットワークを構築した。本研究の特徴は, 2 層 2 スパンで構築したネットワークを多層多スパンに適用する事を目的とする基礎的研究として, 架構を 6×6 のユニットに分け, 1 枚の壁板を複数個のユニットで表している点である。3 層 3 スパンの場合に対して検証した結果, 2 層 2 スパンから 3 層 3 スパンへの拡張性が確認された。
キーワード: ニューラルネットワーク, 壁配置, 負担せん断力, せん断破壊型耐震壁

1. はじめに

RC 架構に壁板を配置することは耐震上有効であるが, その配置方法の決定は組合せが膨大で中々困難である。ニューラルネットワークは, 少ない例題数で, この様な組合せ問題の写像関係を探索するのに有利である。従って, 組合せの少ない, 層数スパン数の少ない有壁架構でネットワークの自己学習を行い, 多層多スパンに問題を拡張した場合にも適用できるようなネットワークの構築が可能であると考えられる。本研究では, 有効的な配置方法を検討する要素として壁板の負担せん断力に着目し, ニューラルネットワークを用いて, 壁板の配置情報から全体部材角 5.0, 10.0, 15.0, 20.0×10⁻³rad の 1 層 1 スパン単独耐震壁の負担せん断力に対する壁板の負担せん断力の比 (以下, 影響係数とする) を推定するネットワークを実験結果を基に構築し, 3 層 3 スパンの場合まで弾塑性解析による結果を併用して検証する。本研究では, 壁板の配置方法のみを変動因子として扱う。

2. 実験概要

2.1 実験方法 ネットワークを構築する為の学習用データを作成する為, 耐震壁を有する 2 層 2 スパン RC 架構の縮小モデルによる実験を行った。試験体の配置方法は図 1 に示す通りである。本研究ではせん断破壊型耐震壁を対象としているが, 1 層柱の曲げ降伏で崩壊する様な試験体 t2-b は, 1 層に壁板が存在しない配置を推定できる様に設定した。試験体の形状は, 柱心々間距離 420mm, 梁心々間距離



図 1 試験体の配置方法

表 1 試験体の構造諸元

試験体名	柱・梁		帯筋比	筋筋比	壁板	
	断面	主筋比			壁厚	壁筋比
t2-a	65×65	3.0%	1.5%	0.48%	9mm	0.87%
t2-b			(3.2φ)	(3.2φ)		(2.0φ)
t2-c	mm ²	(4-D6)	@16.5	@20.0		@40.0

280mm であり, 構造諸元を表 1 に, 使用鉄筋及び鉄線の特性を表 2 に, モルタルの性質を表 3 に示す。実験は, 2 層頂部変形部材角 (以下, 全体部材角とする) により加力制御を行い, 水平方向のみ引張圧縮同時加力を正負交番で行った。各層への荷重分配比は, 1:1 である。水平力に対する挙

*1 武蔵工業大学大学院 工学研究科建築学専攻, (正会員)

*2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

表 2 鉄筋及び鉄線の性質

種類	降伏強度	引張強度	ヤング率
D10	3,582	5,249	2.10×10^6
D6	3,229	4,563	1.87×10^6
3.2φ	—	3,271	—
2.0φ	—	3,147	—

表 3 モルタルの性質

	圧縮強度	引張強度	ヤング率
t2-a	446	23.8	1.81×10^5
t2-b	346	21.2	1.58×10^5
t2-c	340	20.4	1.65×10^5

(単位: kgf/cm^2)

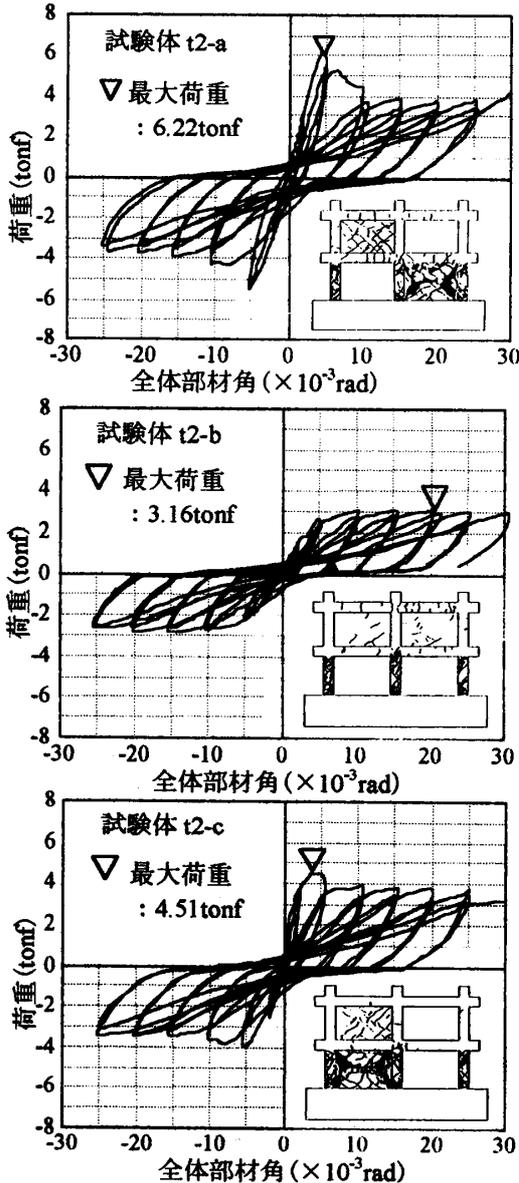


図 2 実験の荷重-全体部材角曲線及び最終破壊状況図

負担せん断力に対する影響係数を出力信号として構築する。力学的には、壁板の負担せん断力は、各層間変形部材角で表現されるべきであるが、本論文では架構全体の破壊状況を検討する尺度として全体部材角を採用した。又、影響係数は、各全体部材角時の 1 層 1 スパン単独耐震壁の負担せん断

動を主眼とした為、柱軸力は無視した。鉄筋は、壁板の負担せん断力の算定の為、各柱主筋に 2ヶ所歪みゲージを貼付した。壁板の負担せん断力の算定は層中央部とし、付帯柱に於いては層中央部付近に近づけて歪みゲージを貼付した。

2.2. 実験結果 試験体 t2-a, t2-c は、1 層壁板の圧壊によって最大耐力となり、最大耐力以後は 1 層柱脚の曲げ降伏及び圧壊が発生し、1 層柱及び 2 層壁板に多数のせん断ひび割れが発生した。然し、壁板を対角方向に配置した試験体 t2-a が最大耐力以後急激に耐力低下を示したのに対して、連層に配置した試験体 t2-c は最大耐力後緩やかに耐力低下を示した。試験体 t2-b は、1 層柱の曲げ降伏によって終局に至った。終局時まで、1 層柱に多数せん断ひび割れが発生したが、2 層の 2 枚の壁板には数本のみであった。各試験体の荷重-全体部材角曲線、最終破壊状況を図 2 に示す。

壁板の負担せん断力は、各柱に貼付した歪みゲージの測定値より、柱の曲げモーメント及びせん断力を算定し、層方程式を導いて求めた。その際、同一層に壁板が 2 枚存在する t2-b は、壁板の主応力方向に貼付した歪みゲージの測定値によって各壁板の負担割合を算定した。壁板の負担せん断力の算定結果を表 4 に示す。表 4 より、t2-a, t2-c の 1 層壁板や、t2-a, t2-b, t2-c の 2 層左に配置された壁板の様に、同じ位置に配置された壁板を比較すると、その他の壁板の配置によって各段階での負担せん断力が大きく異なっている事が分かる。然し、t2-b の 2 階左右の壁板は、せん断力の負担割合が異なる結果となった。これは、実験初期段階でのひび割れ状況や僅かな実験誤差による影響が原因と考えられるが、絶対量がその他の壁板と比較して小さい為、ネットワークの構築に大きな影響はないと言える。ネットワークの学習は、正側加力と負側加力の配置の両方を用いて、6 体分の教師信号を用いる。

3. ネットワークの構成

本ネットワークは、壁板の配置情報を入力信号とし、全体部材角 $5.0, 10.0, 15.0, 20.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の壁板の

力に対する壁板の負担せん断力の比と定義する。ネットワークは全部で3層で構成される階層型ネットワークを用いた。概略図を図3に示す。隠れ層のユニット数は数種類の組合せに対して事前学習を行った結果、学習精度、収束状況が良かった5つとした。

自己学習は、主に誤差逆伝播法を用いた。然し、この方法は総誤差関数の最小化の代用として各教師信号の誤差の最小化を逐次行っていく為、特定の教師信号の特徴を掴み易いが、解の安定性に問題がある。そこで、本ネットワークでは、総誤差関数の局所的最小値に近づいた時点で、Solis & Wetsのランダム探索法[1]を一時的に導入して大域的最小値に近づけるように学習を行った。入出力関数にはシグモイド関数 $f(x)=1/(1+\exp(-x))$ を用いた。

影響係数を求める為の1層1スパン単独耐震壁の負担せん断力 Q_{bas} は、トラス置換による弾塑性解析の結果を用いた。解析の概要及び妥当性の検証は、既往の研究[2]で発表済みである。前述の通り、本研究では、壁板の配置方法のみを変動因子としており、耐震壁の形状、架構及び壁板の構造諸元、水平力の外力分布は2章の実験概要と同じである。柱軸力は、載荷しない。使用材料の特性は、各試験体で差があるので、表5の値を用いた。解析結果を表4に示す。

4. 壁板の配置情報のモデル化方法

本ネットワークは、2章の実験結果を基にネットワークを構築し、多層多スパンの構造物に適用する事を目的としている。従って、壁板の配置情報のモデル化方法は、ネットワークを構築する上で、重要なファクターとなる。既往の研究では、対象とする壁板に対するその他の壁板の位置を架構との相対位置によって無次元化してモデル化する方法が見られる[3]。然し、この様な方法で行う為には、教師信号としてある程度層数、スパン数の多い架構を与える必要があると考えられる。層数、スパン数の少ない架構から多い架構を推定するには、この方法では限界がある。本研究では、

この点を考慮して、架構全体を図5に示す様に6×6のユニットに分割して入力する方法を提案する。従って、2層2スパンの架構の場合は3×3のユニットが、3層3スパンの架構の場合は2×2のユニットが、1枚の壁板に相当する。各ユニットへの入力値は、まず、対象壁に相当する全てのユニットに1.00を入力する。その他のユニットは、対象壁を中心に図6に示す様に8ブロックに分

表4 壁板の負担せん断力[単位: tonf]

全体部材角 $\times 10^{-3} \text{rad}$	Q_{bas}	t2-a 1階壁板	t2-a 2階壁板	t2-b 左側壁板	t2-b 右側壁板	t2-c 1階壁板	t2-c 2階壁板
+5	2.47	5.74	2.79	0.89	0.58	4.17	2.21
+10	3.34	4.09	2.15	0.66	0.94	3.63	2.02
+15	1.14	3.57	1.78	0.68	0.97	3.66	2.00
+20	1.14	3.40	1.71	0.63	1.07	3.62	1.98
-5	—	5.28	2.68	0.68	0.52	4.00	1.94
-10	—	3.54	2.19	0.85	0.66	3.61	1.83
-15	—	3.21	2.04	0.88	0.69	3.57	1.83
-20	—	3.25	1.96	0.88	0.69	3.49	1.81

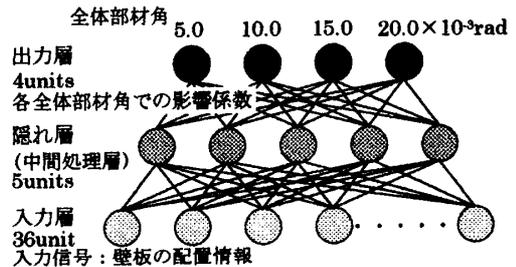


図3 ニューラルネットワークの構成

表5 解析に用いた使用材料の特性

コンクリート		鉄筋及び鉄線		
圧縮強度	ヤング率	鉄筋種類	降伏強度	ヤング率
300	2.10×10^5	D6 3.2φ 2.0φ	3,500 2,400 2,400	2.10×10^6

(単位: kgf/cm²)

1.00	1.00	1.00							
1.00	1.00	1.00					0.05	0.05	
1.00	1.00	1.00					0.50	0.50	
			0.86	0.63	0.36		0.05	0.50	1.00
			0.63	0.36	0.13		0.05	0.50	1.00
			0.36	0.13	0.05		0.50	0.50	1.00
							0.05	0.05	

2層2スパン

3層3スパン

図5 壁板の配置情報の入力例

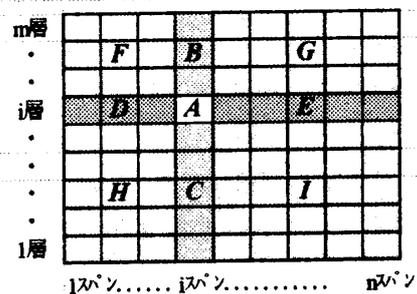


図6 ブロック分け方法

割して、各ブロックに存在する壁板が対象壁からどの程度離れているのか、ブロック内で無次元化して入力する。つまり、その他の壁板に相当するユニットの入力値は、COS関数を用いて対象壁から離れるに従って入力値が小さくなる様に正規化した、式(1)により算定する。

$$0.45 \cos\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{\beta}\right) + 0.50 \quad (1)$$

但し、 α : 対象壁に相当するユニットの内、最も近いユニットから離れているユニット数。

β : 各ブロック内で取りうる α の最大値。

図5に於いては、0.86を与えているユニットでは、 α を1、 β を5として計算している。又、ブロックF,G,H,Iでは、離れているユニット数の数え方を、図7に示す様に行っている。壁板が存在しないユニットは、架構の存在を表現する為、式(1)の下限值より小さい0.01を入力した。

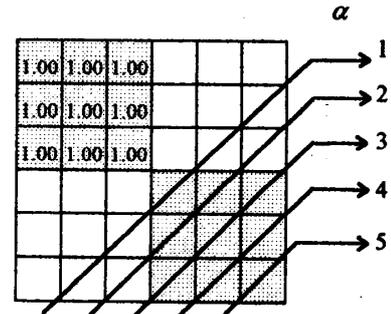
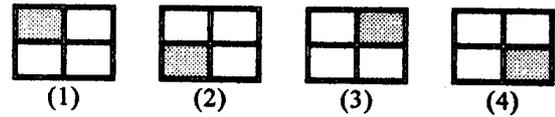
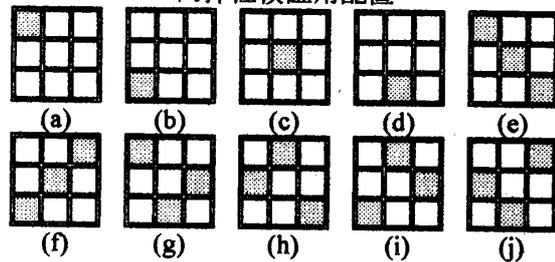


図7 α の数え方



内挿性検証用配置



外挿性検証用配置

図8 検証用配置一覧

5. 検証方法

モデル化の検証は、以下の場合について行った。

再現性：教師信号に使用した配置方法。

内挿性：2層2スパンに壁板を1枚配置した場合。

外挿性：3層3スパンに壁板を1枚配置した場合。

及び各層、各スパンに壁板を1枚ずつ配置した場合。

従って、再現性の検証は実験結果を用いる。内挿性、外挿性の検証は、3章で述べた弾塑性解析を行い、その結果と比較して検証した。解析の仮定、使用材料の特性などは、3章で述べた場合と同じである。内挿性と外挿性の検証に用いた配置方法を図8に示す。

6. 学習及び検証結果

2章で示した実験結果、6体分12パターンに対して、平均2乗総和誤差(E) 0.001を目標として学習を行った。学習回数と収束状況の関係を図9に示す。平均2乗総和誤差E=0.001は、学習回数132回で達成された。入力ユニット数が36個と比較的多い割には、容易に収束

平均2乗総和誤差

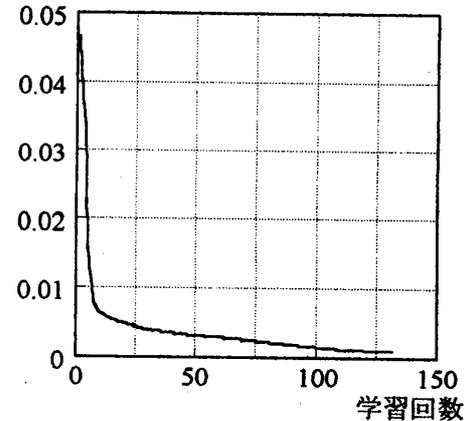
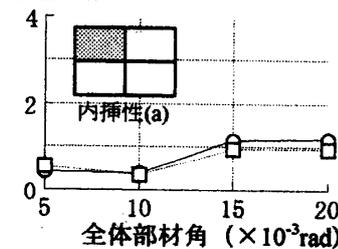
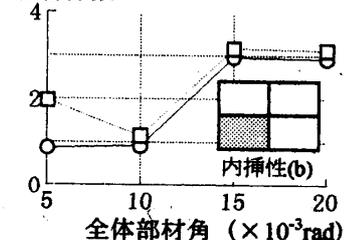


図9 学習回数と収束状況の関係

影響係数



影響係数



○ 解析値 □ 推定値

図11 内挿性の検証

を得られたと言える。

次に、モデル化方法の検証を行った。内挿性、外挿性について述べる。

(1) 内挿性

2層2スパンの架構に壁板を1枚配置した場合。図11に、1層に配置した場合、2層に配置した場合について、1タイプずつ示したが、図11以外のタイプも同様な結果を示しており、1層、2層のどのスパンでも解析値を良く追従している。従って、壁板を1枚のみ配置した内挿性については、ネットワークは十分な精度で推定できた。

(2) 外挿性 1

3層3スパンの架構に壁板を1枚配置した場合。図12に、それぞれ1, 2, 3層に1枚壁板を配置した場合を示す。このタイプは、2つの傾向が見られる。タイプ(a)では、解析値は全体部材角が進むと共に低下するが、ネットワークはこの傾向を掴んでいない。この原因は、各層各スパンに1枚ずつ配置した場合の3層の壁板を考察する際に、述べる。タイプ(b)及び(c)では、解析の傾向をネットワークの推定値が良く掴んでいる。特にタイプ(b)では、解析の壁板のスリップ破壊による耐力低下が小さい結果を、ネットワークもよく掴んでいる。

タイプ(a)では、解析値は全体部材角が進むと共に低下するが、ネットワークはこの傾向を掴んでいない。この原因は、各層各スパンに1枚ずつ配置した場合の3層の壁板を考察する際に、述べる。タイプ(b)及び(c)では、解析の傾向をネットワークの推定値が良く掴んでいる。特にタイプ(b)では、解析の壁板のスリップ破壊による耐力低下が小さい結果を、ネットワークもよく掴んでいる。

(3) 外挿性 2

各層各スパンに1枚ずつ配置した場合の、3層の壁板について。図13に各スパンについて1タイプずつ図を示したが、左側スパンに配置したタイプ(g)以外は、中央、右側スパンとも良く推定している。左側スパンに配置した場合、解析では下層に配置した壁板のスリップ破壊によって3層の壁板も耐力低下を起こしている。ネットワークでは、この点を表せなかった。これは、学習に用いた教師信号による影響が強く、特に対角に配置した試験体 t2-a の2層壁板では比較的大きなせん断力を終局に至っても維持し続けていたことが原因に挙げられる。従って、(2)外挿性 1 で述べた1枚だけ壁板を配置したタイプ(a)で推定値が解析値を過大評価した原因も、同様であると考えられる。

(4) 外挿性 3

各層各スパンに1枚ずつ配置した場合の、2層の壁板について。図14に、左側スパンと中央スパンに配置されている場合について示す。両タイプとも、終局時に多少過大評価をする傾向があるが、十分な精度で推定されていると言える。その他の2層に配置された壁板も同じ傾向を示しており、3層に配置された壁板で見られるようなスパンによる影響は見られなかった。

(5) 外挿性 4

次に各層各スパンに1枚ずつ壁板を配置した場合の1層に配置された壁板であるが、ここでは2

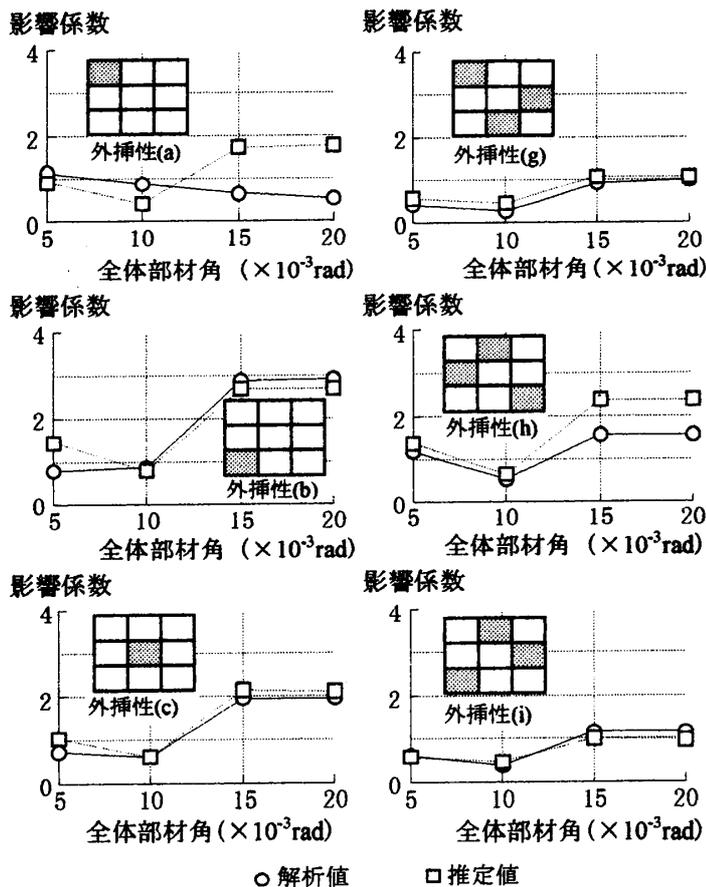


図12 外挿性の検証 —壁板を1枚配置した場合—
 図13 外挿性の検証 —3層に配置した壁板—

つの傾向が見られた。図 15 のタイプ (f) に示す様に壁板のスリップ破壊による耐力低下を表現できなかった場合と、タイプ (j) に示す様に壁板のスリップ破壊による耐力低下が少なく解析値と推定値が良く一致している場合とである。これもやはり、教師信号に大きな耐力低下を示す試験体が含まれない事に原因がある。

然し、壁板のスリップ破壊による耐力低下が大きいタイプには問題が残るものの、本論文の目的である 2 層 2 スパンから 3 層 3 スパンへのネットワークの拡張性は確認できたといえる。又、本ネットワークでは、学習を行う段階で壁板及び架構の破壊の影響が既に教師信号に含まれている事から、その影響を明示しなくてもネットワークにある程度考慮されると考えているが、壁板を 1 枚配置した場合の推定の結果、架構の曲げ降伏による影響を追従できていることから、この点も確認することができた。

7. 結論

本研究では全体部材角というパラメータで評価した為各層の具体的な変形は顕在化しない形となったが、各層一定の割合で加力したデータを用いているので、各層の変形の差はネットワークにはあまり影響せず、本研究のモデル化方法により 2 層 2 スパンで構築したネットワークを 3 層 3 スパンに適用できると確認された。また、1 層柱脚の曲げ降伏や壁板の圧壊によって破壊するタイプの試験体に対してネットワークの推定値が解析結果を良く追従していることから、その影響を明示しなくてもネットワーク内にある程度考慮されることができたと言える。しかしながら、学習を行った教師信号に、壁板のスリップ破壊による耐力低下が大きい試験体が含まれていなかった為、このタイプの破壊が発生する配置については十分な精度で推定が行えなかった。

従って、検証の結果から、本研究のモデル化方法を用い、十分に多様な破壊モードを含んだ教師信号をネットワークに与えれば、負担せん断力の推定は十分可能であるといえる。また、本研究では、架構を 6×6 のユニットに分割したが、学習させたい架構及び推定したい架構の層数、スパン数の最小公倍数を用いれば、多様な架構への適用が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] J. Solis, J. B. Wets ; Minimization by random search techniques, Mathematics of Operations Research, Vol.6, p19~p30, 1981 年
- [2] 川辺 祥一, 望月 重 ; 単独せん断破壊型耐震壁の架構における靱性評価の解析, コンクリート工学年次論文報告集, 第 15 巻第 2 号, p1161~p1166, 1993 年
- [3] 堤 和敏ほか ; 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報告集, 第 456 号, p81~p86, 1994 年 2 月

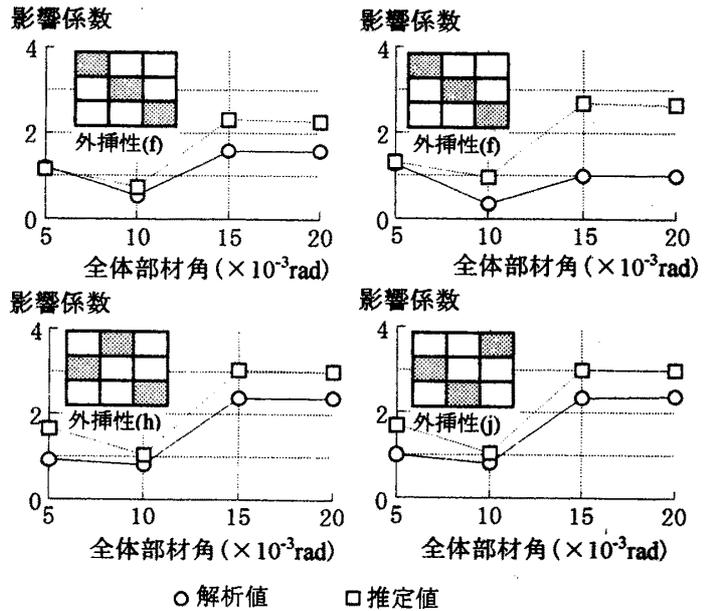


図 14 外挿性の検証

図 15 外挿性の検証

— 2 層に配置した壁板 —

— 1 層に配置した壁板 —