任意の釘配列で打たれた面材壁の終局耐力の算定理論式

－ 理論値と回帰値の比較 －

THEORETICAL FORMULA TO PREDICT THE ULTIMATE SHEAR CAPACITY OF SHEATHED SHEAR WALLS WITH ANY NAILING ARRANGEMENT PATTERN

Comparison between values calculated from theoretical equations and regression equations

村上 雅 英^{*1}

Masahide MURAKAMI

The formula for the full plastic nail arrangement modulus Z_{pxy} which is used in the calculation of the ultimate shear capacity of the sheathed shear walls with any nail arrangement was theoretically derived by using the upper bound theorem.

The unknown values are the rotation ratio (θ_x/θ_y) and the neutral axis positions (x_o and y_o) in the calculation.

The difference between the calculation with the elastic values and the plastic values as unknown values is within 1.5%.

Keywords : Sheathed shear wall, Ultimate shear capacity, Upper bound theorem, Numerical analysis, Nailing pattern

面材張り大壁，終局せん断耐力，上界定理，数値解析，釘配列

1. はじめに

筆者が提案した任意の釘配列で打たれた面材壁の弾塑性挙動を推定するための計算理論¹⁾は、接合具のせん断性状を完全弾塑性に置換することで、剛性、降伏耐力、終局耐力、靱性など構造設計に必要な情報が定式化(以下、算定式)されているため、木質構造の構造設計²⁾で不可欠な基本理論として、現在では広く用いられている。

研究分野においても弾塑性数値解析と算定式の比較も行われ、降伏耐力まではつり合い式に基づいた力学理論で定式化されているため、よく一致することが確認されている。しかしながら、終局耐力の算定式は、つり合い式によるアプローチでは定式化が不可能であったため、数値解析によるパラメトリックスタディに基づいて安全側になるように回帰式で構成されている。

近年の数値解析ソフトの普及に伴い、面材に打たれた釘(以下、単に釘とよぶ)の円形降伏曲面をM.S.S.モデルで表現することで、面材壁の弾塑性解析が容易にできるようになってきた^{例えば3)}。そのような社会状況を鑑みて、算定式による終局耐力の予測精度を向上させることが課題であった。

そこで、本研究では、従来、回帰式で構成していた面材大壁の全塑性抵抗モーメント M_p の算定式の予測精度を向上させると共に、弾性～終局までの全ての算定式を力学理論で完結させることを目的とする。

2. 既往の研究と理論式作成のアプローチ

面材の四周を釘打ちした大壁のせん断力-変形角関係を推定するための理論アプローチには、Toumi R.L.⁴⁾によるエネルギー法と、神谷⁵⁾による力のつり合いの方法がある。別の観点から既往の研究を概観すると、文献1以外のすべての研究では、Toumi R.L.の研究手法に倣い、釘の P - δ 曲線の縦軸と横軸に弾性時の計算から求めた係数を乗じることで、面材壁のせん断力-変形角曲線を求めることを目的としており、筆者が行っているような設計実務に必要な降伏耐力や終局耐力の定式化は行われていない。

既往の研究のエネルギー法によるアプローチでは、剛体と仮定した面材の隅角部の釘の滑り量は、ピン接合された剛体の枠材に水平力が作用して変形した平行四辺形の対角線の方に一致すると変位の適合条件を近似して、各釘に蓄えられる弾性エネルギーの算出を行っている。当然のことながら、そのように仮定した滑り量に基づいて各釘に作用するせん断力を、 X 方向と Y 方向の分力に分解して各方向の抵抗モーメントを求めると、力のつり合いは成立しない。しかしながら、変形の適合条件を満たしているため、上界定理より計算結果は正解に近くなる。このことに注目すると、エネルギー法を用いることで、全塑性状態のつり合い条件を満たす変形状態であっても、変形の適合条件を満たすように各釘の滑り量を適切に仮定すれば、全塑性抵抗モーメント M_p が容易に理論的に定式化できる。更に、任意の釘配列に対する変形の適合条件を満たすような各釘の滑り量の算定は、筆者の提案した計算理論に基づいた弾性域の

^{*1} 近畿大学建築学部建築学科 教授・工博

Prof., Faculty of Architecture, Dept. of Architecture, KINDAI Univ., Dr.Eng.

Fig.1 Shear behavior of nails

Fig.3 Work done of external moment

Fig.2 Deformation decomposition of sheathed shear walls

Fig.4 Shear deformation of ij -th nail

算定式²⁾を用いることで、容易に求めることができる。したがって、両者を組み合わせることで、任意の釘配列に対して全塑性抵抗モーメント M_p を算定するための理論式の構築が可能となる。

3. 全塑性抵抗モーメントの理論式の誘導

仮定は、以下のとおりとする^{注1)}。

1. 面材はせん断変形のみを考慮した弾性体として扱う。
2. 枠材の曲げ変形、せん断変形、軸方向変形は無視する。また、各枠材の接合はピン接合とする。
3. 釘のせん断性状は、Fig.1に示すように完全弾塑性と仮定する。

仮定の1と2に基づく、Fig.2に示すように、真のせん断変形角 R は、X方向とY方向のそれぞれの回転角 θ_x と θ_y および面材のせん断変形角 γ の和となり、それぞれの変形に必要な外力モーメントは等しく、それらは直列の関係で表される。全ての釘が塑性状態になると、変位増分 ΔR に対する外力モーメントのなす仕事はFig.3のように $M_p \cdot \Delta R$ となり、各釘に蓄えられる塑性エネルギーはFig.1のように $\Delta P_v \cdot \Delta \delta_{ij}$ となる。従って、上界定理より、式(1)が導かれる。

$$M_p \cdot \Delta R = \sum \Delta P_v \cdot \Delta \delta_{ij} \quad (1)$$

全塑性状態では、外力は一定値となるため、面材のせん断変形の増分 ΔR は生じないので、Fig.2に示す変形の適合条件は式(2)で表される。

$$\Delta R = \Delta \theta_x + \Delta \theta_y \quad (2)$$

一方、Fig.4よりX方向とY方向の ij 番目の釘の滑り量は、 θ_x と θ_y を用いて、式(3)で表される。

$$\begin{aligned} \delta_{xj} &= (y_j - y_{op}) \cdot \theta_x \\ \delta_{yi} &= (x_i - x_{op}) \cdot \theta_y \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 x_i 、 y_j は ij 番目の釘の座標、 x_{op} 、 y_{op} は、全塑性状態での各方向の中立軸位置

$\Delta \theta_x = \alpha_x \cdot \Delta R$ と置くことで、 ij 番目の釘の滑り量のX方向とY方向の増分 $\Delta \delta_{xi}$ 、 $\Delta \delta_{yi}$ と真のせん断変形角 ΔR の関係式が、式(3)より式(4)

のように得られる。

$$\begin{aligned} \Delta \delta_{xj} &= (y_j - y_{op}) \cdot \alpha_x \cdot \Delta R \\ \Delta \delta_{yi} &= (x_i - x_{op}) \cdot (1 - \alpha_x) \cdot \Delta R \end{aligned} \quad (4)$$

ij 番目の釘の滑り量の増分 $\Delta \delta_{ij}$ は、式(5)で表される。

$$\Delta \delta_{ij} = \sqrt{\Delta \delta_{xj}^2 + \Delta \delta_{yi}^2} \quad (5)$$

式(5)を式(1)に代入することで、 M_p の理論式が式(6)のように導かれる。

$$M_p = \Delta P_v \cdot \sum \sqrt{\{(y_j - y_{op}) \cdot \alpha_x\}^2 + \{(x_i - x_{op}) \cdot (1 - \alpha_x)\}^2} = \Delta P_v \cdot Z_{pxy} \quad (6)$$

ここで、 Z_{pxy} は全塑性釘配列係数

式(6)においての未知数は、全塑性状態時の α_x と中立軸位置 x_{op} と y_{op} であり、それらは変形の適合条件を満たしつつ適切に仮定する必要がある。そこで、それらの未知数を弾性時の値を用いることで、各未知数は以下のように求まる。

弾性時の中立軸位置 x_o と y_o は、式(7)で与えられる。

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{\sum x_i \cdot n_i}{\sum n_i} \\ y_o &= \frac{\sum y_j \cdot n_j}{\sum n_j} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 n_i と n_j は、各行または列の釘の本数

X方向とY方向の釘の配列2次モーメント I_x と I_y は、式(8)で与えられる。

$$\begin{aligned} I_x &= \sum (y_j - y_o)^2 \cdot n_j \\ I_y &= \sum (x_i - x_o)^2 \cdot n_i \end{aligned} \quad (8)$$

X方向とY方向の釘の抵抗モーメント M_x と M_y は、釘の剛性 k を用いて、式(9)で与えられる。

$$\begin{aligned} M_x &= k \cdot I_x \cdot \theta_x \\ M_y &= k \cdot I_y \cdot \theta_y \end{aligned} \quad (9)$$

両者は直列の関係にあり、 $M_x = M_y$ より、式(10)を得る。

$$\frac{\theta_x}{\theta_y} = \frac{I_y}{I_x} \quad (10)$$

式(10)を式(2)に代入することで、式(11)を得る。

$$\begin{aligned} \theta_x &= R \cdot \alpha_x \\ \theta_y &= R \cdot (1 - \alpha_x) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで

$$\alpha_x = \frac{I_y}{I_x + I_y} = \frac{\theta_x}{\theta_x + \theta_y} \quad (12)$$

4. 理論式と回帰式の比較

4.1 回帰式の概要

3章で誘導した理論式と文献1で提案した回帰式との比較をすることで、理論式が回帰式よりも優れていることを示す。比較対象とする回帰式を以下に示す。

全塑性状態の時のX方向とY方向の抵抗モーメント M_{px} と M_{py} は、式(13)で表される。

$$\begin{aligned} M_{px} &= \Delta P_v \cdot \sum \frac{(y_j - y_{op})^2 \cdot \theta_{px}}{\sqrt{(x_i - x_{op})^2 \cdot \theta_{py}^2 + (y_j - y_{op})^2 \cdot \theta_{px}^2}} \\ M_{py} &= \Delta P_v \cdot \sum \frac{(x_i - x_{op})^2 \cdot \theta_{py}}{\sqrt{(x_i - x_{op})^2 \cdot \theta_{py}^2 + (y_j - y_{op})^2 \cdot \theta_{px}^2}} \end{aligned} \quad (13)$$

両者は直列の関係であるので、常に式(14)を成立させる必要があり、そのためには、全塑性状態の時の中立軸位置 x_{op} と y_{op} 、およびX方向とY方向の回転角比(θ_{px}/θ_{py})を適切に設定する必要がある。

$$M_{px} = M_{py} \quad (14)$$

文献1では、 $W=91 \sim 273\text{cm}$ 、 $H=30 \sim 273\text{cm}$ の面材寸法を対象に、釘間隔、間柱間隔、外周に対する間柱の釘間隔の比、および四周釘配列、川の字釘配列、X軸に対してのみ非対称とした山の字釘配列を変数とした759通りに対して、式(13)と(14)を満たすように収斂計算で y_{op} と θ_{px}/θ_{py} を決めて、 M_p の正解値を算出した。そして、弾性時の θ_x/θ_y と中立軸位置から全塑性時の値を推定するために、回帰式である式(15)と式(16)を作成した。式(15)と式(16)で得られた値を用いて式(13)を算出しても、式(14)は成立しない。そこで、 M_{px} と M_{py} の平均値と正解値との比率 Y_{err} を求めると、式(17)で回帰できることが見いだされ、その逆数を乗じることで、 M_p が式(18)のように算出できる。

$$I_y \geq I_x \text{ のとき } \frac{\theta_{px}}{\theta_{py}} = 1.28458 \frac{I_y}{I_x} = 1.28458 \frac{\theta_x}{\theta_y} \quad (15)$$

$$I_y < I_x \text{ のとき } \frac{\theta_{px}}{\theta_{py}} = \frac{I_y}{1.28458 \cdot I_x} = \frac{\theta_x}{1.28458 \cdot \theta_y}$$

ここで、 θ_x/θ_y は弾性時のX方向とY方向の回転比率

$$y_{op} = -0.1059 \cdot H + 1.2118 \cdot y_o \quad (16)$$

ここで、 y_{op} と y_o はそれぞれ全塑性状態と弾性状態の中立軸位置

$$Y_{err} = 0.99774 + 0.06793 \cdot X_{err} + 0.90613 \cdot X_{err}^2 \quad (17)$$

$$\text{ここで、} \quad X_{err} = \frac{2 \cdot |M_{px} - M_{py}|}{M_{px} + M_{py}}$$

$$M_p = \Delta P_v \cdot Z_{pxy} = \frac{M_{px} + M_{py}}{2 \cdot Y_{err}} \quad (18)$$

式(18)が正解値を上回る確率は約50%であることから、式(18)に0.9411を乗じることで、正解値の母数に対しての5%下限値が得られる。

4.2 理論式と回帰式の比較

比較対象とする釘配列の一覧と理論値と回帰式による計算値の比較を、Fig.5とTable 1に示す。次節で述べるように未知数 α_x と中立軸位置を弾性時の値で理論値の算出しても、誤差が1.5%以下と極めて少ないことから、その値を記している。釘配列は「四周釘配列(英語表記:S)」、「川の字釘配列(K)」、「山の字釘配列(Y)」であり、図中の H と W は両端の釘の距離である。また、間柱の釘は面材の中心から両端に向けて、枠材周囲に打つ釘間隔の2倍の間隔で割り付けている。No.16と17は間柱がない。3×10版の面材を耐力壁に使用することを考慮して、四周釘打ちの検証対象とする面材の縦横(H/W)比は、1.0～3.33の範囲とする。なお、回帰式で算出された Z_{pxy} の値は式(18)より求めており、50%下限値に相当する。

No.1は、理論式がつり合い式を満たしていることを回帰式より検証するためのモデルであり、全塑性状態でも中立軸の移動がなく、 $\theta_x/\theta_y = \theta_{px}/\theta_{py} = 1.0$ となる釘配列、すなわち正方形の面材で外周のみに等間隔の釘配列であるため、式(15)を用いずに注2)計算しており、 $X_{err}=0$ となるため式(17)で $Y_{err}=1.0$ としている。理論式と回帰式でそれぞれ算出された M_p は完全に一致しており、また、回帰式において $X_{err}=0$ であることから、理論式で得られた M_p がつり合い式を満たしていることが確認できる。

No.2～15は、実務で多用される定尺の面材を基本とした釘配列である。現実的な釘間隔、釘配列、 H/W に対しては、理論式に対する回帰式の Z_{pxy} の比率は±5%以内である。そこで、回帰式では、過大評価となる釘配列に対して、5%下限値を設定する必要がある、低減率0.9411を乗じている。そのため、実際に使用する面材の釘配列によっては、低減率を乗じると回帰式による Z_{pxy} は、理論値に対して最大で約10%過少評価されているものも存在する。

No.17は、回帰式のもととなった正解値を得るための解析変数のうち、正解値に対する精度が極めて悪い釘配列の例である。 I_x と I_y

Fig.5 Nailing patterns

Table 1 Model Parameters and results

No.	Model name	W (mm)	H (mm)	p (mm)	pattern	Z_{pxy} (cm)			$\alpha\ x$	yo/H	X_{err}	$\frac{R.Eq.}{Eq.(6)}$	$\frac{N.A}{Eq.(6)}$
						Eq.(6)	R.Eq.	N.A.					
1	S9x9@10N	900	900	100	SN	932	932	932	0.500	0.500	0.000	1.000	1.000
2	S9x9@10				S	990	996	987	0.480	0.500	0.033	1.006	0.997
3	K9x9@10				K	549	562	536	0.664	0.500	0.016	1.025	0.977
4	Y9x9@10				Y	758	737	577	0.577	0.379	0.108	0.973	0.762
5	S9x18@5			50	S	3828	3865	3810	0.244	0.500	0.089	1.010	0.995
6	S9x18@15			150	S	1266	1275	1255	0.250	0.500	0.057	1.007	0.991
7	S9x18@10		1800	100	S	1924	1944	1917	0.242	0.500	0.100	1.010	0.996
8	K9x18@10				K	1457	1376	1447	0.358	0.500	0.160	0.944	0.993
9	Y9x18@10				Y	1697	1669	1583	0.296	0.427	0.038	0.984	0.948
10	S9x27@10		S		2803	2874	2496	0.143	0.500	0.201	1.025	0.868	
11	K9x27@10		2700		K	2373	2352	2338	0.206	0.500	0.025	0.991	0.985
12	Y9x27@10				Y	2595	2626	2496	0.171	0.448	0.078	1.012	0.962
13	S9x30@10		3000		S	3099	3190	3055	0.122	0.500	0.253	1.029	0.986
14	K20x10@10	2000	1000		K	1452	1513	1439	0.833	0.500	0.123	1.042	0.991
15	Y20x10@10				Y	2054	2055	1484	0.792	0.387	0.035	1.001	0.723
16	S3x27@10	300	2700		SN	851	837*	831	0.028	0.500	0.033	0.984	0.977
17	K3x27@10				KN	826	685**	802	0.033	0.500	0.257	0.830	0.971

R.Eq. : Equations obtained by regression analysis, N.A. : Numerical analysis

Pattern SN : Nailed only along perimeter of a sheet, KN : Nailed along longitudinal edges

* Z_{xy} of S3x27@10 is 819cm > 788cm=0.941x837cm. ** Z_{xy} of K3x27@10 is 802cm > 685cm.

*** The numerical Analysis could not be correctly executed.

Table 2 Influence of unknown values (Unit:cm)

(a) Effect of variation in α_x only

(No.7) S9x18@10				(No.8) K9x18@10				(No.13) S9x30@10				(No.11) K9x27@10			
α_x	Z _{pxy}	Ratio		α_x	Z _{pxy}	Ratio		α_x	Z _{pxy}	Ratio		α_x	Z _{pxy}	Ratio	
0.100	1926	1.001		0.100	1593	1.093		0.076	3058	0.987	N.A.	0.087	2407	1.014	N.A.
0.174	1907	0.991	N.A.	0.200	1509	1.035		0.097	3072	1.000	Plastic	0.100	2396	1.010	
0.199	1910	0.992	Plastic	0.300	1464	1.005		0.100	3074	0.992		0.168	2368	0.998	Plastic
0.200	1910	0.992		0.303	1464	1.004	Plastic	0.122	3099	1.000	Elastic	0.200	2372	0.999	
0.242	1924	1.000	Elastic	0.332	1459	1.001	N.A.	0.200	3266	1.054		0.206	2373	1.000	Elastic
0.300	1963	1.020		0.358	1457	1.000	Elastic	0.300	3622	1.169		0.300	2448	1.032	
0.400	2077	1.079		0.400	1462	1.003		0.400	4100	1.323		0.400	2614	1.101	
0.500	2243	1.165		0.500	1500	1.029		0.500	4670	1.507		0.500	2853	1.202	

(b) Effect of variation in y_o and α_x ((No.15) Y20x10@10)

Y20x10@10 (y _o /H=0.387 : Elastic)				Y20x10@10 (y _o /H=0.363 : Plastic)				Y20x10@10 (y _o /H=0.5)			
α_x	Z _{pxy}	Ratio		α_x	Z _{pxy}	Ratio		α_x	Z _{pxy}	Ratio	
0.500	2498	1.216		0.500	2496	1.216		0.500	2537	1.236	
0.600	2285	1.113		0.600	2282	1.112		0.600	2340	1.140	
0.700	2131	1.038		0.700	2127	1.036		0.700	2203	1.073	
0.792	2054	1.000	Elastic	0.792	2049	0.998	Elastic	0.792	2140	1.042	Elastic
0.800	2050	0.998		0.800	2045	0.996		0.800	2138	1.041	
0.830	2043	0.995	Plastic	0.830	2037	0.992	Plastic	0.830	2135	1.040	Plastic
0.900	2060	1.001		0.900	2054	1.000		0.900	2163	1.047

Fig.6 Model for numerical analyses

Fig.7 Z_{pxy} obtained from numerical analysis

の差が極端に大きく、かつ X_{err} の値が大きい例であり、回帰式による Z_{pxy} は Z_{xy} (釘の配列係数¹⁾²⁾を下回っており、明らかに矛盾している。No.16は低減率0.9411を乗じると Z_{xy} を下回る例である。このように少数ではあるが、回帰式ゆえの問題のある釘配列が存在する。

参考値として、弾塑性解析ソフトSNAP Ver.7を用いて、30度毎にせん断バネを設け、任意角度のせん断力に対して一様な降伏局面を有するM.S.S.モデルで釘の降伏を表現したFig.6に示すような解析モデルによる数値解析結果も示す。面材はFig.6のように線材でトラス置換している。両端の釘の距離 H と W の寸法で枠材を線材でモデル化した。また、外周以外で釘を打っている間柱と枠材とは、Fig.5の赤で示しているようにピン接合されている。モデル化に際して、枠材と面材を表現している全ての線材は、釘の剛性／間隔と比べて十分剛とみなせる値($EA=10^{15}$ N、 $EF=10^{20}$ Nmm²、 $GA=10^{13}$ N)で設定している。釘のせん断性状は、比較の容易さを考慮して、N50の値に近い $k=0.5$ kN/mm、 $\Delta P=1$ kNとし、第2勾配は $0.0001 \cdot k$ としたBi-Linearモデルとする。

数値解析結果より、Fig.7に示すように抵抗モーメントが一定となった $R=1/30$ rad.時の値を M_p として、 $Z_{pxy}=M_p/\Delta P$ を求めた。数値解析では、釘の降伏曲面を12分割のM.S.S.モデルで近似表現していること、長辺1辺のみ釘打ちする山の字釘配列では $R=1/30$ rad.時に全塑性状態とならないため、理論式から算出された Z_{pxy} よりも低くなる傾向にある。

4.3. 弾性時の α_x と中立軸位置を用いることの妥当性の検討

対称釘配列の場合は、終局状態に至るまで中立軸位置の移動は生じないので、未知数は α_x のみとなる。X方向とY方向の回転剛性は直列関係となるので、塑性化の進行に伴う回転剛性の低い方向の変形の増大の影響を、回帰式では式(15)で表現されている。また、対称性の悪い釘配列ほど、塑性化に伴う中立軸位置の移動量は大きく、回帰式ではその影響を式(16)で表されている。

そこで、代表的な釘配列に対して、未知数の変動に対する Z_{pxy} への影響を調べ、弾性時の α_x と中立軸位置の値を用いた場合に対する比率をTable 2に示す。表中の $y_o/H=0.387$ と 0.363 はそれぞれ弾性時と式(15)または式(16)による全塑性時の値である。同表(a)では、中立軸位置の変動がなく α_x のみが変動する釘配列の例を、同表(b)では中立軸位置も変動する釘配列の例を示している。同表(a)では、参考値として数値解析で $R=1/30$ rad.時の変形から求めた α_x (N.A.)の値も示してある。同表(a)に見られるように、 α_x の変動と比べて Z_{pxy} の変動幅は極めて小さい。その理由は、釘の滑り量は、 α_x の変動によって変形が減少した方向と増加した方向のベクトルの成分を式(5)で合成されるため、結果として合成されたベクトルの大きさの変化が少なくなるためである。また、同表(b)に見られるように、塑性化に伴う中立軸位置の移動の影響も極めて少ない。したがって、未知数である α_x と中立軸位置の値に、弾性時の値を用いて計算しても1.5%以内の誤差に収まっており、問題ないと判断できる。

5. まとめ

本論文で得られた知見を以下に示す。

1. 任意の釘配列で打たれた面材壁の全塑性釘配列係数 Z_{pxy} の算

定式を上界定理を用いて理論的に誘導した。

2. 計算の際の未知数である α_x と中立軸位置は、弾性時の値を用いても、誤差は1.5%以内と極めて少ない。
3. 実務で多用する釘配列に関しては、回帰式から求まる Z_{pxy} の理論値との誤差は5%以内である。回帰式では5%下限値とするために低減係数0.9411を乗じており、実際に使用する面材の釘配列では、回帰式による Z_{pxy} は、理論値に対して最大で約10%過少評価している釘配列が存在する。
4. 回帰式では Z_{pxy} が Z_{xy} を下回る例が存在することを示した。
5. 理論式に対して、M.S.S.モデルによる数値解析結果はやや下回る傾向にある。

回帰式による全塑性釘配列係数 Z_{pxy} の算定式は、力学的根拠に乏しく、また、計算が煩雑な割に、使用頻度の高い面材の釘配列では過小評価となるなど計算精度も良くない。そのため、筆者は実務において、回帰式の代わりに本理論式を用いることを強く推奨する。

謝辞

数値解析に際しては、株式会社エヌ・シー・エヌ 小谷竜城氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Murakami M. Inayama M.: Formulae to Predict the Elastic and Plastic Behavior of Sheathed Walls with any nailing Arrangement Pattern, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.519, pp.87-93, 1999.5 (in Japanese)
村上雅英, 稲山正弘: 任意の釘配列で打たれた面材壁の弾塑性挙動の予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第519号, pp.87~93, 1999.5
- 2) Japan Housing and Wood Technology Center: Allowable Stress Design of Wooden Houses with Post and Beam Construction System 2017, pp.198, 203, 2017.3 (in Japanese)
日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の許容応力度設計2017年度版, pp.198-203, 2017. 3
- 3) Azumi.Y. Murakami M.: Prediction of the Performance of Sheathed Shear Elements Reinforced with Shear Keys along Panel Joints and It's Verification with Numerical Analyses, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.707, pp.93-103, 2015.1 (in Japanese)
安曇良治, 村上雅英: 面材の継ぎ目に沿ってせん断キーで補強した面材張り耐力要素のせん断性状の推定と数値解析による検証, 日本建築学会構造系論文集, 第707号, pp.93~103, 2015. 1
- 4) Tuomi.L. and McCutcheon W.J.: Racking Strength of Light-Frame Nailed Walls. Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, Vol.104. ST7, pp.1131-1140, 1978.7
- 5) Kamiya F.: Theoretical Studies on Racking Stiffness and Strength of Wooden Sheathed Walls, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.309, pp.86-91 1981.11 (in Japanese)
神谷文夫: 面材を釘打ちした耐力壁のせん断剛性及び強度に関する理論的研究, 日本建築学会論文報告集, 第309号, pp.86~91. 1981.11

注

注1) 仮定を満たす具体的な仕様は、文献2に記載されている。

注2) $I_x=I_y$ の場合、塑性化に伴う変形の局所化は生じないが、式(15)では $\theta_{px}=1.28458 \cdot \theta_{py}$ となっており、明らかに実現象とは矛盾している。その原因は筆者が回帰式を作成する際のミスに起因していたことが、今回の検討で見いだされた。しかしながら、そのような場合であっても、式(17)が機能して必要な計算精度は確保できている。ちなみに、Table 1に示すNo.1における式(15)を用いた回帰式による計算値の理論値に対する誤差は0.968である。

THEORETICAL FORMULA TO PREDICT THE ULTIMATE SHEAR CAPACITY OF SHEATHED SHEAR WALLS WITH ANY NAILING ARRANGEMENT PATTERN

Comparison between values calculated from theoretical equations and regression equations

Masahide MURAKAMI^{*1}

^{*1} Prof., Faculty of Architecture, Dept. of Architecture, KINDAI Univ., Dr.Eng.

The formula for the full plastic nail arrangement modulus Z_{pxy} which is used in calculating ultimate shear capacity M_p of the sheathed shear walls with any nail arrangement was theoretically derived using the upper bound theorem.

The unknown values are the rotation ratio (θ_x/θ_y) and the neutral axis positions (x_o and y_o) in the calculation. The difference between the calculation with the elastic values and the plastic values as unknown values is within 1.5%.

The derived formula Eq.(6) provides the theoretical values of the ultimate moment capacity Z_{pxy} of sheathed shear walls.

$$M_p = \Delta P_v \cdot \sum \sqrt{\left\{ \left(y_j - y_{op} \right) \cdot \alpha_x \right\}^2 + \left\{ \left(x_i - x_{op} \right) \cdot (1 - \alpha_x) \right\}^2} = \Delta P_v \cdot Z_{pxy} \quad (6)$$

with x_j and y_i the co-ordinate of ij -th nail, x_{op} and y_{op} the neutral axis position in the X and Y directions shown in Fig. 4, ΔP_v the yield shear force of nails in Fig.1, and α_x the rotation angle ratio given in Eqs. (7) - (11).

The values of Z_{pxy} obtained from the numerical analyses and the equations obtained from the regression analysis are compared to theoretical values. The values of Z_{pxy} obtained from equations with the regression analysis are always smaller than theoretical values and are 10 % smaller at the maximum.

The equation obtained from the regression analysis gives unreasonable values of Z_{pxy} . For example, Z_{pxy} becomes smaller than Z_{xy} in a few cases of nail arrangement. The values of Z_{pxy} obtained from numerical analyses are smaller than the theoretical values.

(2021 年 1 月 2 日原稿受理, 2021 年 4 月 12 日採用決定)