ステンレスシート防水工法の耐風性能解析及び評価に関する研究

STUDY ON THEORETICAL ANALYSIS AND EVALUATION FOR WIND RESISTIVITY OF WATERPROOFING ROOF CONSTRUCTION MADE OF STAINLESS STEEL SHEET

飛田春雄 — * 1

Haruo TOBITA — * 1

キーワード:

近似解析法, 耐風性能, シーム溶接, ステンレス鋼, 防水工法, 屋根

Keywords:

Approximate analytical solution, Wind resistance performance, Seam welding, Stainless steel, Waterproofing roof construction, Roof

The wind resistivity of waterproofing roof made of stainless steel membrane as well as the effect due to displacement of clips has been analyzed by using an approximate analytical solution conducted by the author, and an evaluation on the solution was made in comparison with the result of durability test and FEM. As a result, it is verified that the solution can duly be applied. As the peel strength of stainless steel membrane measured by the test is 0.387kgf/mm when the wind pressure is 600kgf/m², it is confirmed that this waterproofing roof is sufficiently durable. From the result of this study, the analytical solution can easily be obtained and it hopefully provides a reliable waterproofing roof.

1. はじめに

ステンレスシート防水工法は、1986年3月日本建築学会発行「建築工事標準仕様書・同解説 JASS8 防水工事」(以下、JASS8と呼ぶ)に制定以来、陸屋根の改修工事から各種のドーム防水屋根などの大規模物件に至るまで幅広く採用されてきた。施工実績も1988年から2000年の13年間で約800万㎡に達するが、その中でも大部分はステンレス鋼をメンブレンとして用いた防水工法である。筆者は、既報¹⁾²⁾(第14号、15号)で2000年7月JASS8改定時、ステンレス鋼に追加して対象材料となったチタンのシーム溶接の最適化に関する研究並びに耐風性能評価に関する研究報告をした。

本報では、これらの研究を更に深めて、風圧によるメンブレンの挙動、つまりメンブレン各部、及び躯体とメンブレンを緊定している吊子部の変位、並びにメンブレン同士を溶接している部分のピール力(剥離力)の解析を、金属薄板を用いた防水工法の代表工法であるステンレスシート防水工法に対して、メンブレン下部が大気開放状態の条件で行った。本工法は、ステンレスシートを溶接により一体化してメンブレンとしているため気密性が高く、実際には、風圧力(以下、負圧を指す)で生じるメンブレン表面に作用する力は小さいが、メンブレン下部が大気開放状態で解析することは、安全検討に欠かせなく、長期耐久性能及び信頼性に繋がる。以下、研究結果を報告する。

2. 耐風性能近似解析法の適用と溶接性能検証

2-1 検証に用いる耐風性試験概要

ステンレスシート防水工法は図1に示すように、メンブレンを軀

体と吊子を介して緊定する絶縁工法であるが、その吊子は、基本的に固定吊子、スライド吊子、通し吊子の3種類に分類され、躯体の規模などにより使い分けている。本研究ではスライド吊子をRC躯体に緊定した断面構成に基づいた試験体(図2)に対して、筆者が既に導出した耐風性能近似解法を適用すると共に、吊子及び吊子間の変位については、新たな理論式を用いて検証を行った。

検証の対象とした試験体は、図3に示すように、RC躯体で、軒先部立上げがR150mmの納まりを持ち、メンブレンは板厚0.4mmのJISG4305の冷間圧延ステンレス鋼帯 SUS304 で構成されたバラペットを有する陸屋根に相当する試験体を用いた。ステンレスシート防水工法は、当初バラペットを有する陸屋根に採用されたアスファルト防水工法など既存の防水工法の改修工法として急速に普及して今日に至っている。従って、本試験体による近似解析法の検証は流れ方向の長さの制約はあるが、軒先の自由度が高く、高度で貴重な検証が得られると考える。なお、図4にJISA1414に準じた試験装置の概要を示す。

図1 ステンレスシート防水工法

*1 明治大学理工学部機械情報工学科 兼任講師・博士(工学)
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*1 Lecturer, Dept. of Mechanical System Science and Engineering, School of Science and Technology, Meiji Univ, Dr. Eng.

図2 試験体 ●変位測定点 (1,2,3,4,5)
○吊子打設位置

図3 立上り部詳細 (A-A断面)

図4 動風圧試験装置 (JISA1414)

2-2 近似解法の適用と検証

模式図 (図5) に示すように、風圧により変位するメンブレンのふくれ量 Y_1 、吊子の浮上り量 Y_2 、吊子間のたわみ量 Y_3 について検証する。

図5 防水層各変位模式図

Y_1 : 防水層のふくれ、 Y_2 : 吊子の浮上り、 Y_3 : 立上部のたわみ
A: 吊子有りの中央部のふくれ、B: 吊子無しの中央部のふくれ
h: 立上り高さ、H: ピール力、m: ハゼ部の横幅

(1) 防水層自体の変位 Y_1 の検証

既報 (第15号) で風圧により変位するメンブレンの曲線にカテナリ曲線を当てはめた近似解析法を導出した。本解析法によりふくれ量 Y_1 は式 (1) で表される。この近似解析法で導出される変位に対して耐風圧試験値及び有限要素法 (以下、FEM と呼ぶ) 解析値による検証を行った。近似解析法 (1) 式の I は断面二次モーメント) 及び FEM の入力値を表1に示す。

$$Y_1 = \frac{H}{2p} \left[e^{\frac{p}{H}r} + e^{-\frac{p}{H}r} \right] - \frac{H}{p} + \frac{Hl^3}{3EI} \cdot \frac{e^{\frac{p}{H}r} - e^{-\frac{p}{H}r}}{2} \dots\dots\dots (1)$$

表1 入力データ

計算条件		入力値
P	風圧力 N/mm ²	0.00049 ~ 0.0049
E	ヤング率 N/mm ²	199,300
t	板厚 mm	0.4
h	立上り高さ mm	15
m	ハゼ部の横幅 mm	2.5
S	防水層底部の幅 mm	222.5

なお、FEM 解析は汎用解析ソフト (要素タイプ: シェル構造) を使用したが、解析条件は図5に示すC点を全固定、E点是对称条件とし、負圧はD-E面に作用させた。近似解析法に対する耐風圧試験値及びFEMでの検証結果を表2、図6に示すが、近似解析法とFEMはほぼ一致した。また、耐風検討に用いられる風圧力 200kgf/m² ~ 400kgf/m² 間は両者と試験値の差異は小さく、300kgf/m² で近似解析法と試験値、FEM三者が一致した。

表2 耐風圧性試験値-近似解析法-FEMふくれ値比較

荷重 (負圧)	kgf/m ²	N/m ²	各測定点のふくれ値 mm			ふくれ値 mm		
			測定点1	測定点2	測定点3	試験値	近似解析法	FEM
50	490	1.0	12.9	2.3	11.3	16.52	16.71	
100	980	2.0	17.6	3.7	14.8	20.91	20.97	
200	1960	3.8	27.8	5.9	23.0	26.47	25.91	
300	2940	5.5	35.7	8.0	29.0	30.43	29.19	
400	3920	9.4	47.2	10.6	37.2	33.62	31.71	
500	4900	17.5	65.2	20.9	46.0	36.33	33.79	

$$\text{試験値のふくれ値} = \text{測定点2} - (\text{測定点1} + \text{測定点3}) / 2$$

図6 ふくれ量比較

(2) 吊子の浮上り量 Y_2 の考察・検証

メンブレンと躯体を緊定している吊子の剛性により、吊子自身の浮上り量は変化するがその浮上り量に対する吊子の有効性（弾性範囲）も検討する必要がある。以下に検討結果を示す。

吊子 1 個にかかる負荷重 W は、吊子間のピッチを V とすると、

$$W = 2 \text{ SVP } \text{ kgf/個}$$

吊子の浮上り高さ Y_2 は吊子のバネ係数を k とすると下式となる。

$$Y_2 = \frac{W}{k} = \frac{2\text{SVP}}{k} \dots\dots\dots (2)$$

ここで吊子のバネ係数を求めるために図 7 に示すように、吊子の引張り試験を実施した。結果を表 3 に示すが、図 8 に示す通り回帰分析（最小 2 乗法）してバネ係数を得た。

表 3 吊子引張り試験値

荷重 Y		変位 X
kgf	N	mm
10	98	0.21
20	196	0.64
30	294	1.06
40	392	1.48
50	490	1.92
60	588	2.53
70	686	3.17
80	785	3.88
90	883	4.67
100	980	5.49
110	1079	6.33
120	1179	7.30
130	1275	8.35
140	1373	9.47
150	1470	10.78

図 7 吊子引張り試験要領

表 4 及び図 9 に試験値と理論値の比較を示すが、試験値の方が相

対的に浮上り量が多いが両者の差は僅小であり、風圧力に対する変位の傾向もほぼ同一である。また、風圧力 350kgf/m^2 程度まで吊子の変位は比例関係であり有効性が評価出来る。バネ係数は $k = 16.213 \text{ kgf/mm}$ となり、荷重 Y (kgf) と変位 X (mm) の関係は、下式となる。

$$Y = 16.213 X \quad (r = 0.986)$$

なお、バネ係数については、吊子の形状、材質、製作精度により異なるため、その浮上り量解析については採用する吊子について、個々に引張り試験を実施してバネ係数を適用することが必要となる。

表 4 耐風圧性試験値－理論値吊子の浮上り量比較

荷重 (負圧)	変位 mm	Y_2			
		kgf/m²	N/m²	測定点 1	測定点 3
50	490	1.0	2.3	1.7	0.83
60	590	1.2	2.5	1.9	1.00
70	690	1.4	2.9	2.2	1.17
80	780	1.5	3.3	2.4	1.33
90	880	1.8	3.4	2.6	1.50
100	980	2.0	3.7	2.9	1.67
150	1470	2.8	4.7	3.8	2.50
200	1960	3.8	5.9	4.9	3.33
250	2450	4.6	6.8	5.7	4.16
300	2940	5.5	8.0	6.8	5.00
350	3430	6.9	9.1	8.0	5.83
400	3920	9.4	10.6	10.0	6.66

図 9 吊子の浮上り量比較

(3) 吊子間の立上げ部中央部のたわみ量 Y_3 の解析

部分吊子がステンレスシート防水工法では一般的に多く使用されるが、図 5 に示すように吊子間のピッチ V の中央部の立上げ部が、吊子の有る箇所よりたわみ量が大きくなりこのたわみ量が働き幅中央部にも影響して、吊子間の中央部の断面の変位（図 5 の B 点）が

吊子が有る箇所の断面の変位 (図 5 の A 点) より大きくなる。このたわみ量 Y_3 は、次の式 (3) で表される。

$$Y_3 = \frac{SPV^4}{32Eth^3} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、式 (3) より求めた、たわみ量と耐風性試験値を比較すると表 5 及び図 10 となる。風圧力約 150kgf/m²において、試験値と理論値両者が一致し、150kgf/m²より風圧力が高くなると、低圧部とは逆に理論値に比較し僅かに変位が小さくなる傾向となる。しかし、50kgf/m²から 400kgf/m²全域に亘ってほぼ一致した結果が得られた。

表 5 耐風性試験値—理論値吊子間の立上げ部中央部のたわみ量比較

荷重 (負圧)		変位 mm			Y ₃	
kgf/m ²	N/m ²	測定点 1	測定点 4	測定点 5	試験値	理論値
50	490	1.0	2.0	3.9	2.0	1.1
60	590	1.2	2.4	4.3	2.2	1.4
70	690	1.4	2.7	4.6	2.3	1.6
80	780	1.5	3.0	5.0	2.5	1.8
90	880	1.8	3.4	5.5	2.7	2.1
100	980	2.0	3.6	5.8	2.7	2.3
150	1470	2.8	5.2	7.3	3.5	3.4
200	1960	3.8	7.3	8.7	4.2	4.6
250	2450	4.6	8.8	10.2	4.9	5.7
300	2940	5.5	10.6	11.8	5.7	6.8
350	3430	6.9	13.2	14.1	6.8	8.0
400	3920	9.4	18.6	17.5	8.7	9.1

$$Y_3 \text{試験値} = \frac{(\text{測定点 4} + \text{測定点 5})}{2} - \text{測定点 1}$$

図 10 吊子間立上げ部中央部のたわみ量比較

2-3 水平力 (ピール力) の解析

図 5 の模式図で示したようにメンブレンに風圧力が作用すると溶接部を剥離する水平力つまりピール力 H が働くが、この H は、溶接強度を評価する大事な要素である。このピール力 H は既報 (第 15 号) で導出した式 (4) で表され、未知数が H だけの方程式であり容易に数値解析法で求められる。

$$\frac{H}{2p} \left\{ e^{\frac{p}{H} \left(S - \frac{H^3}{3EI} \right)} - e^{-\frac{p}{H} \left(S - \frac{H^3}{3EI} \right)} \right\} - S = 0 \dots\dots\dots (4)$$

表 6 に風圧力に対する解析したピール力及び試験値³⁾を示すが、溶接部のピール強度は風圧力 600kgf/m²においても約 38 倍以上の安全率があり、メンブレン下部の気密性が低下しても溶接部が剥離することはない、溶接部の信頼性評価が確認出来た。

表 6 ピール力解析値と試験値

風圧力 (負圧)		水平力 (ピール力)	
kgf/m ²	N/m ²	kgf/mm	N/mm
50	490	0.075	0.735
100	980	0.119	1.167
200	1960	0.188	1.844
300	2940	0.245	2.403
400	3920	0.297	2.913
500	4900	0.343	3.364
600	5880	0.387	3.795

試験値			
試験片形状	強度		
	N	{kgf}	N/mm {kgf/mm}
4001	408	160
	4119	420	165
	3677	375	147

3. まとめ

ステンレスシート防水工法の耐風性能解析に対して筆者が導出した近似解析法を用いて、耐風性試験、FEM との比較検証を行った。更に、吊子の変位及び吊子間の溶接立上がり部の変位も耐風性試験値と理論値により比較検証を行った。結果を以下に要約する。

- (1) 風圧力によるメンブレンの変位 (ふくれ量) は近似式と FEM による値はほぼ一致し、試験値に対しては特に、200kgf/m²～400kgf/m²間で両者との差異は小さく、300kgf/m²では三者とも一致した。
- (2) 吊子の変位 (浮上り量) は理論値と試験値両者の差異は僅小であり、風圧力に対する変位の傾向はほぼ同一である。
- (3) 吊子間の溶接部の立上がり部のたわみは、理論値と試験値両者は風圧力全ての範囲でほぼ一致し、吊子の有効性も確認出来た。
- (4) 溶接部のピール力は風圧力 600kgf/m²において、0.387kgf/mm であり、試験値に対して約 38 倍以上の安全率を有する。

以上により、JASS 8 で標準化されている本工法の耐風性能に関する理論的な検証が出来た。今後、本研究により不具合兆候が生じた時の原因解析及び対策は無論、躯体の形状、風環境、下地の仕様 (気密性) など各条件における設計段階の耐風性能検討が容易になり、工法の信頼性確立に繋がると考える。

謝辞

本研究で実施した耐風性試験及び吊子の引張り試験については、日本冶金工業 (株) 加工品販売部殿の関係の方々にご協力頂きました。ここにそのことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 飛田春雄：チタンをメンブレンとして用いた防水工法のシーム溶接の最適化に関する基礎研究, 日本建築学会技術報告集第 14 号, pp.53～56, 2001.12
- 2) 飛田春雄：チタンをメンブレンとして用いた防水工法の耐風性能評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集第 15 号, pp.23～26, 2002.6
- 3) 日本建築学会：断熱勾配屋根防水 (設計・施工) 技術指針・同解説, pp.182, 1993.1

[2002年10月17日原稿受理 2003年2月25日採用決定]