

I-43

面内膜応力を考慮した曲面スキンプレーットの応力算定法について

電力中央研究所 正会員 山本 広祐
電力中央研究所 正会員 中村 秀治
電力中央研究所 正会員 松浦 真一

1. まえがき 水門扉のスキンプレーットに生じる曲げ応力は、水門鉄管技術基準によれば DIN 19704に従いチモシェンコの算定式によって計算される。この式は、平板の微小変位理論の厳密解であるが、これを曲面板にまで拡張して適用するのは、(i)設計段階で他に適当な簡易応力算定式がないこと、(ii)安全側評価になること、から妥当であるとしても、保守管理が目的である場合には必ずしも適当ではない。そこで、平面スキンプレーットに対する算定式を面内膜応力まで含めて一般化し、式中に含まれる係数および指数を詳細な数値解析結果に基づいて定めた算定式の作成を試みた。

2. 曲面スキンプレーットの簡易応力算定式 曲面スキンプレーットの応力成分を面外曲げ応力と面内膜応力に分離した形で、以下のような近似算定式を与えることは可能である。

$$\sigma_1 = \pm k_1 p \left(\frac{s}{t} \right)^{n_1} - h_1 p \left(\frac{s}{t} \right)^{m_1}$$

面外曲げ応力 面内膜応力

$$\sigma_2 = \pm k_2 p \left(\frac{s}{t} \right)^{n_2} - h_2 p \left(\frac{s}{t} \right)^{m_2}$$

$$\sigma_3 = \pm k_3 p \left(\frac{s}{t} \right)^{n_3} - h_3 p \left(\frac{s}{t} \right)^{m_3}$$

$$\sigma_4 = \pm k_4 p \left(\frac{s}{t} \right)^{n_4} - h_4 p \left(\frac{s}{t} \right)^{m_4}$$

σ_i : 応力 ($i=1\sim 4$) (kgf/cm²)

R: 曲率半径 (cm)

s: 区画の曲線辺長 (cm)

ℓ: 区画の直線辺長 (cm)

p: 水圧 (kgf/cm²)

t: 板厚 (cm)

k_i, h_i : 表-1～表-5に示す係数 ($i=1\sim 4$)

n_i, m_i : 表-1～表-5に示す指数 ($i=1\sim 4$)

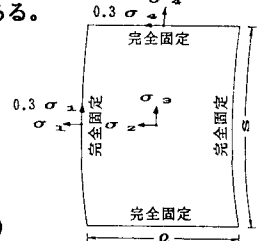


図-1 応力算定箇所

符号のとり方は、上段をゲート前面（凸面）、下段を背面（凹面）とする。なお、形状不整や境界条件の相違に対して膜応力は敏感で、減少しやすい傾向にあるため、 σ_2 、 σ_3 に関して点線内の膜応力を省略した方がよいと考えられる。また、係数および指数を確定するために実施した数値解析の範囲から板厚 t が著しく外れる場合の本算定式の適用には注意すべきである。

3. 係数および指数表作成のための数値解析 解析コードはMARCを用い、4節点2重曲面アイソパラメトリック・シェル要素（要素番号4）を採用した。多くのラジアルゲートの形状を調査した結果、以下の範囲で係数および指数表を作成した。（表-1～表-5）

$s/R=0.1\sim 0.3$, $t=0.8\sim 1.4$ cm, ヤング率 $E=2.1\times 10^6$ kgf/cm²

$s/\ell=0.4\sim 3.0$, $R=10$ m, ポアソン比 $\nu=0.3$

4. あとがき 本算定式を実際の曲面スキンプレーットに適用することにより、実態に近い良好な応力評価が可能となると考えられる。今後、実測結果との対比により有効性を検討していきたい。

参考文献

- 1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，昭和56年。
- 2) 中村秀治・松浦真一・山本広祐：曲面スキンプレーットの応力算定法について，電力土木，No.212，昭和63年1月。

表-1 $s/R=0.1$ における k_i, h_i, n_i, m_i ($i=1\sim 4$)

s/R=0.1 s/ℓ	面外曲げ応力								面内膜応力							
	σ_1		σ_2		σ_3		σ_4		σ_1		σ_2		σ_3		σ_4	
	k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_4	n_4	h_1	m_1	h_2	m_2	h_3	m_3	h_4	m_4
0.4	3.924	1.211	8.615	0.747	22.40	0.804	40.31	0.794	5.4×10^{-3}	1.990	0.036	1.836	0.153	1.800	0.169	1.807
0.6	3.923	1.261	26.95	0.564	18.32	0.851	31.83	0.850	4.2×10^{-3}	2.042	0.024	1.915	0.120	1.855	0.113	1.889
0.8	3.809	1.292	13.49	0.808	8.858	0.997	14.51	1.014	2.0×10^{-3}	2.162	0.010	2.068	0.052	2.023	0.049	2.045
1.0	2.776	1.374	4.683	1.092	3.228	1.185	5.145	1.216	7.9×10^{-4}	2.312	4.1×10^{-3}	2.244	0.019	2.215	0.016	2.235
1.2	1.587	1.492	1.755	1.324	1.139	1.364	1.809	1.408	2.9×10^{-4}	2.481	1.4×10^{-3}	2.416	6.4×10^{-3}	2.399	5.5×10^{-3}	2.406
1.5	0.638	1.663	0.510	1.580	0.279	1.583	0.460	1.638	9.7×10^{-5}	2.669	3.4×10^{-4}	2.623	1.5×10^{-3}	2.617	1.2×10^{-3}	2.622
2.0	0.197	1.842	0.132	1.807	0.053	1.798	0.103	1.845	2.6×10^{-5}	2.862	5.7×10^{-5}	2.825	2.8×10^{-4}	2.827	1.9×10^{-4}	2.833
2.5	0.093	1.923	0.058	1.905	0.019	1.901	0.043	1.927	1.2×10^{-5}	2.921	1.7×10^{-5}	2.916	9.5×10^{-5}	2.908	5.8×10^{-5}	2.926
3.0	0.056	1.958	0.033	1.955	0.010	1.946	0.023	1.963	5.0×10^{-6}	2.954	7.8×10^{-6}	2.940	4.0×10^{-5}	2.951	2.3×10^{-5}	2.975

表-2 $s/R=0.15$ における k_1, h_1, n_1, m_1 ($i=1\sim4$)

$s/R=$ s/δ	面外曲げ応力								面内膜応力							
	σ_1		σ_2		σ_3		σ_4		σ_1		σ_2		σ_3		σ_4	
	k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_4	n_4	h_1	m_1	h_2	m_2	h_3	m_3	h_4	m_4
0.4	30.79	0.686	41.95	0.281	171.2	0.243	301.9	0.238	0.064	1.476	0.435	1.271	1.765	1.240	2.022	1.240
0.6	21.88	0.814	215.0	-0.037	212.7	0.201	373.8	0.199	0.045	1.517	0.397	1.289	2.140	1.204	2.090	1.233
0.8	19.94	0.862	2533	-0.453	259.8	0.159	319.1	0.242	0.025	1.610	0.274	1.364	1.817	1.242	1.387	1.309
1.0	19.74	0.882	1093	-0.186	188.8	0.215	139.1	0.419	0.013	1.722	0.136	1.484	0.865	1.389	0.621	1.452
1.2	16.90	0.924	228.1	0.197	84.77	0.360	45.41	0.646	6.2×10^{-3}	1.852	0.054	1.653	0.307	1.585	0.216	1.636
1.5	8.080	1.075	26.09	0.682	15.73	0.663	7.739	0.987	1.8×10^{-2}	2.084	0.011	1.926	0.054	1.898	0.036	1.938
2.0	1.357	1.407	1.562	1.250	0.841	1.176	0.634	1.435	2.4×10^{-4}	2.442	7.3×10^{-4}	2.344	3.5×10^{-3}	2.349	2.2×10^{-3}	2.382
2.5	0.313	1.652	0.248	1.581	0.097	1.538	0.119	1.697	5.1×10^{-5}	2.676	9.6×10^{-5}	2.622	4.9×10^{-4}	2.632	2.8×10^{-4}	2.662
3.0	0.114	1.801	0.078	1.763	0.026	1.745	0.041	1.832	1.7×10^{-5}	2.807	2.5×10^{-5}	2.768	1.3×10^{-4}	2.785	7.1×10^{-5}	2.818

表-3 $s/R=0.2$ における k_1, h_1, n_1, m_1 ($i=1\sim4$)

$s/R=$ s/δ	面外曲げ応力								面内膜応力							
	σ_1		σ_2		σ_3		σ_4		σ_1		σ_2		σ_3		σ_4	
	k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_4	n_4	h_1	m_1	h_2	m_2	h_3	m_3	h_4	m_4
0.4	109.3	0.353	63.96	0.095	217.9	0.091	398.6	0.080	0.108	1.340	0.760	1.116	3.086	1.083	3.487	1.086
0.6	54.24	0.562	28.77	0.250	246.6	0.066	382.0	0.090	0.073	1.393	0.660	1.145	3.178	1.078	3.621	1.078
0.8	39.20	0.659	773.9	-0.358	562.2	-0.104	387.9	0.101	0.044	1.474	0.658	1.150	4.160	1.030	3.684	1.071
1.0	34.57	0.704	82460	-1.186	2342	-0.397	308.1	0.167	0.025	1.571	0.546	1.184	4.208	1.034	2.686	1.125
1.2	34.21	0.719	69000	-1.061	6851	-0.622	160.6	0.312	0.016	1.650	0.366	1.249	2.697	1.123	1.489	1.225
1.5	32.31	0.742	3743	-0.397	4493	-0.557	45.28	0.572	9.4×10^{-3}	1.755	0.140	1.402	0.820	1.342	0.416	1.439
2.0	11.85	0.935	69.44	0.441	103.5	0.156	5.018	0.985	2.5×10^{-3}	1.998	0.014	1.768	0.070	1.767	0.032	1.859
2.5	2.280	1.232	3.851	1.003	2.458	0.859	0.665	1.332	4.3×10^{-4}	2.284	1.2×10^{-3}	2.148	5.9×10^{-3}	2.166	2.7×10^{-3}	2.242
3.0	0.496	1.492	0.497	1.376	0.198	1.317	0.140	1.576	8.8×10^{-5}	2.520	1.6×10^{-4}	2.443	8.4×10^{-4}	2.456	8.8×10^{-4}	2.524

表-4 $s/R=0.25$ における k_1, h_1, n_1, m_1 ($i=1\sim4$)

$s/R=$ s/δ	面外曲げ応力								面内膜応力							
	σ_1		σ_2		σ_3		σ_4		σ_1		σ_2		σ_3		σ_4	
	k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_4	n_4	h_1	m_1	h_2	m_2	h_3	m_3	h_4	m_4
0.4	384.3	0.043	43.91	0.086	168.8	0.059	348.7	0.023	0.111	1.307	0.776	1.075	3.249	1.035	3.688	1.036
0.6	112.3	0.362	37.39	0.125	292.3	-0.049	226.0	0.109	0.069	1.378	0.640	1.114	3.136	1.041	3.755	1.031
0.8	67.14	0.500	31.70	0.148	1168	-0.334	124.8	0.237	0.040	1.467	0.722	1.097	3.450	1.025	3.855	1.024
1.0	51.81	0.571	28020	-1.110	39410	-1.040	107.1	0.291	0.023	1.564	0.815	1.073	4.683	0.974	3.632	1.030
1.2	45.18	0.611	1.5×10^3	-3.107	9.3×10^7	-2.558	100.5	0.330	0.016	1.632	0.776	1.074	5.313	0.957	2.747	1.076
1.5	43.39	0.632	3.1×10^7	-2.232	2.9×10^{13}	-9.005	63.46	0.447	0.014	1.667	0.519	1.127	3.462	1.040	1.279	1.202
2.0	35.67	0.680	7236	-0.514	1.6×10^6	-1.776	16.90	0.710	0.010	1.731	0.120	1.349	0.636	1.336	0.203	1.501
2.5	12.97	0.867	115.8	0.311	232.4	-0.060	3.300	0.998	3.2×10^{-3}	1.913	0.014	1.681	0.074	1.692	0.024	1.841
3.0	2.968	1.129	7.000	0.844	3.666	0.731	0.642	1.267	5.7×10^{-4}	2.154	1.6×10^{-3}	2.024	8.5×10^{-3}	2.033	2.9×10^{-3}	2.161

表-5 $s/R=0.3$ における k_1, h_1, n_1, m_1 ($i=1\sim4$)

$s/R=$ s/δ	面外曲げ応力								面内膜応力							
	σ_1		σ_2		σ_3		σ_4		σ_1		σ_2		σ_3		σ_4	
	k_1	n_1	k_2	n_2	k_3	n_3	k_4	n_4	h_1	m_1	h_2	m_2	h_3	m_3	h_4	m_4
0.4	1815	-0.307	30.22	0.089	135.9	0.033	256.6	0.014	0.103	1.297	0.674	1.070	2.994	1.017	3.432	1.017
0.6	235.5	0.171	88.89	-0.098	838.7	-0.313	84.87	0.227	0.058	1.388	0.604	1.095	2.925	1.022	3.511	1.011
0.8	108.5	0.361	296.9	-0.331	44770	-1.088	30.67	0.435	0.033	1.488	0.750	1.059	2.857	1.027	3.434	1.012
1.0	74.49	0.457	6963	-0.970	2.1×10^{13}	-4.876	25.82	0.494	0.021	1.572	0.966	1.011	3.436	0.996	3.221	1.020
1.2	58.70	0.517	—	—	—	—	34.39	0.471	0.017	1.615	1.080	0.983	4.732	0.944	2.889	1.036
1.5	45.78	0.577	—	—	—	—	48.67	0.444	0.018	1.613	0.928	0.992	5.701	0.917	1.895	1.104
2.0	39.59	0.617	2.9×10^7	-2.124	—	—	30.81	0.558	0.022	1.581	0.373	1.121	2.387	1.072	0.558	1.300
2.5	28.48	0.687	5170	-0.442	174400	-1.346	10.10	0.761	0.013	1.652	0.080	1.359	0.475	1.341	0.109	1.556
3.0	11.41	0.854	123.0	0.280	97.63	0.086	2.526	0.992	4.2×10^{-3}	1.826	0.012	1.656	0.069	1.650	0.017	1.838