第Ⅰ部門　ボルト孔が斜めに配置された有孔板の降伏挙動に及ぼす列数およびゲージ間隔の影響

大阪公立大学大学院　学生会員　○芦矢　和葉　　北海道大学大学院　正会員　佐倉　亮
大阪公立大学大学院　正会員　森山　仁志　　大阪公立大学大学院　正会員　山口　隆司

1. 研究背景および目的

高力ボルト摩擦接合継手の純断面積は，ボルト配置を砲台配置とすることで，矩形配置のそれより大きくすることができる．そのため，引張力を受ける継手部では砲台配置が多く採用される．道路橋示方書 [1]（以下，道示）では，Cochrane のp/gルールに基づく孔径控除値

$$w = d - \frac{p^2}{4g} \tag{1}$$

を用いて降伏モードを判定する．その後，**図-1** に示す純断面モード（以下，N）と千鳥モード（以下，St）の降伏耐力を算定し，値の小さい方を継手の降伏耐力としている．ここで，$w<0$ となる場合にはモード St は発生しないものとしている．しかしながらこれは設計上の判定結果であり，有限要素解析においては，$w<0$ となる配置条件においてもモード St が発生することが確認されており，現行の設計法ではこの場合の降伏耐力を評価できない．モード St の耐力を評価できるようになるためには，**図-1** に示すように，複数パターン想定される St の降伏挙動を分類できる必要がある．

本研究では，ボルト孔を斜めに配置した有孔板の引張数値解析を実施し，孔の列数とゲージ間隔が塑性進展および降伏モードに及ぼす影響について検討している．

2. FEM 解析

解析ソルバーは汎用非線形有限要素解析プログラム Abaqus/Standard2023 を用いた．解析モデルの一例を**図-2** に示す．本モデルは構造対称性を考慮した 1/2 モデルであり，対称面に境界条件を与えた．使用要素は 8 節点低減積分ソリッド要素とし，着目部は板厚方向 5 分割以上となるよう要素分割している．境界条件として，母材端面の部材軸方向に一様強制変位を与えた．鋼種は SM490Y とし，**表-1** に示す材料特性を基に，加工硬化係数を $E/100$ とするバイリニア型の構成則を用いた．

各ケースの構造諸元と設計降伏モードを**表-2** に示す．設計降伏モードは**図-1** に示す通り，N, St の 2 種類を考慮する．解析ケースは，ゲージ間隔 g を 7 パターン，列数 n = 2~7 の 6 パターン，合計 7×6 = 42 ケースを用意した．

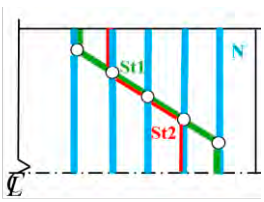


図-1　設計降伏モード

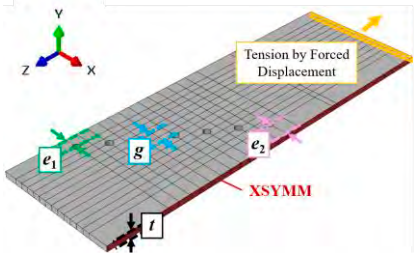


図-2　解析モデル

表-1　材料特性

鋼種	ヤング率 E (N/mm²)	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_y (N/mm²)	引張強度 σ_t (N/mm²)
SM490Y	200, 000	0.3	355	490

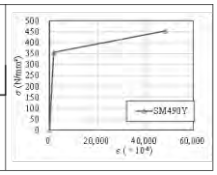


表-2　解析ケースおよびその構造諸元

ゲージ間隔 g (mm)	孔径控除値 w (mm)	列数 n	板厚 t (mm)	縁端距離 e_1 (mm)	先端孔対象面長さ e_2 (mm)	設計降伏耐力 P_{yd} (kN)	設計降伏モード
37.5	-13	2~7	19	45	65	830~2,094	N
40	-10.7	2~7	19	45	65	846~2,195	N
42.5	-8.6	2~7	19	45	65	863~2,297	N
45	-6.8	2~7	19	45	65	880~2,398	N
50	-3.6	2~7	19	45	65	907~2,559	N
75	5.8	2~7	19	45	65	1,030~3,299	St
150	15.1	2~7	19	45	65	1,479~5,989	St

3. 解析結果と考察

FEM 解析による降伏荷重 P_{ya} と設計降伏耐力 P_{yd}[1]の比率 P_{ya}/P_{yd} を**図-3** に示す．数値解析での降伏限界は，板厚中央断面において，ボルト孔から進展する塑性域が全幅に渡って連結した時点の荷重としている．プロットのシンボル形状は解析と実験の降伏モードの関係を整理しており，▲が解析/設計モードいずれも N，●が設計モードが N で解析モードが St1，○（斜線ハッチング）が設計モードが N で解析モードが St2，■が解析/設計モードいずれも St1，のいずれかであることを意味する．**図-4** には g = 37.5, 150mm の降伏モードを示す．

図-3 に示すように，P_{ya}/P_{yd} はゲージ g や降伏モードによらず，孔列数 n の増加に伴い低下した．**図-3, 4** および**表-2** より，w が負の最小値を示す g = 37.5mm では n の増加に伴い，解析/設計モードが一致しない一方，w が正の最大値を示す g = 150mm では，n によらず解析

Kazuha ASHIYA, Ryo SAKURA, Hitoshi MORIYAMA and Takashi YAMAGUCHI
sg22291x@st.omu.ac.jp

/設計モードが一致している．関連して，n によらず P_{ya}/P_{yd} が概ね 1.0 となるのは g = 150mm の場合であり，モードの推定可否が降伏耐力の推定精度に影響を与えていると考えられる．他方，w = 5.8mm と正値を示す g = 75mm は解析/設計モードがともにモード St1 であったにも関わらず，P_{ya}/P_{yd} は小さい傾向にある．すなわち，降伏耐力低下の要因に降伏モードの推定可否だけでなく，孔間の応力性状も関係している．

g =37.5, 150mm の降伏限界時点の主応力線図（**図-5**）を基に，孔間の応力性状に着目して検討を行った．**図-6** は，図中の黄色枠で示す孔間中央部の要素群を対象として算出した最大主応力角度 θ の平均値を，各荷重レベルについて示している．θ は，部材軸方向を 0°，板幅方向を 90°とし，反時計回りを正方向と定義している．

図-5 より，最大主応力角度 θ はゲージ g が小さいほど大きく，また，その傾向は変形が進むにつれて顕著となっていた．そこで降伏荷重 P_{ya} 時点の最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_2 に着目すると，g = 37.5mm では(σ_1, σ_2) = (303N/mm^2, -74N/mm^2)，g = 150mm では (σ_1, σ_2) = (361N/mm^2, 0.73N/mm^2)となっており，2 軸応力 [2)]が g により変化している．すなわち，g が小さいほどせん断応力が増加し，また，平面応力場を仮定した際の主応力比 $r = \sigma_2/\sigma_1$ が変化したと判断される．

相当応力 σ_{eq} は式(2)の通り主応力比 $r = \sigma_2/\sigma_1$ で表すことができ，σ_2 - σ_1 平面上のミーゼスの降伏関数との関係を**図-7** に示す．図中には，千鳥モード St1 である g = 50, 75, 150mm と，**図-4** において P_{ya}/P_{yd} の傾向が異なる 3 ケースの結果を示している．

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = \sigma_1\sqrt{1 - r + r^2} = \sigma_1 f \qquad (2)$$

g = 50mm の場合，第 4 象限で σ_{eq} が σ_y に到達し，f=1.16 であった．すなわち，純引張状態（σ_2 = 0）より小さい最大主応力で降伏に至ったということである．これが，w < 0 で千鳥モード St が観測された一因と考えられる．

4. まとめ

孔が斜方配置された有孔板の FEA により，列数とゲージ g が降伏モードや降伏耐力に及ぼす影響を分析した．その結果，孔径控除値 w < 0 の条件においても St が発生することがわかった．これは，g の減少により孔間断面に引張・圧縮の 2 軸応力状態が形成され，早期に降伏するためと考えられる．また，孔列数の増加に伴い，

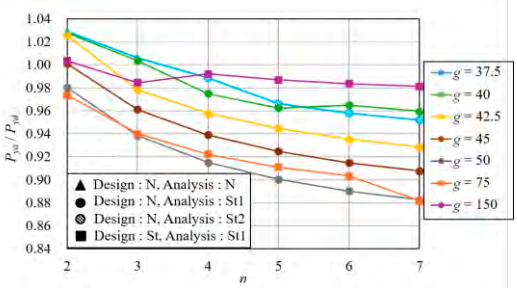


図-3　降伏耐力比

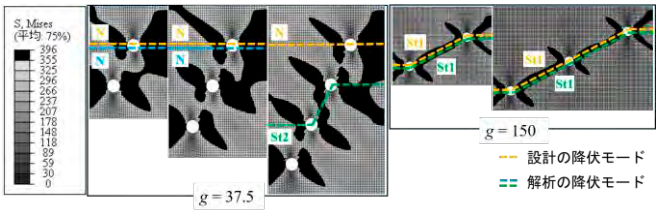


図-4　ミーゼス応力コンター

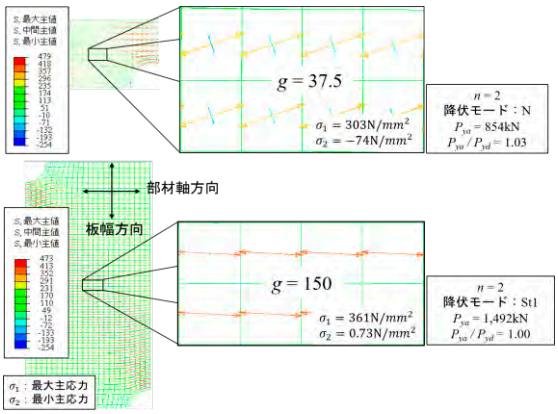


図-5　主応力線図

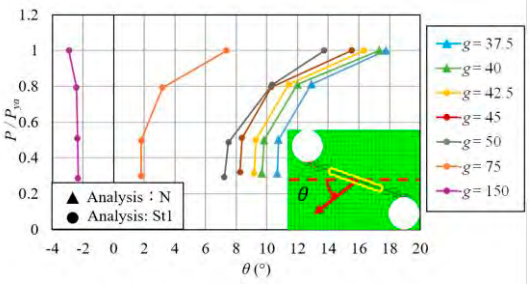


図-6　主応力角度の変化

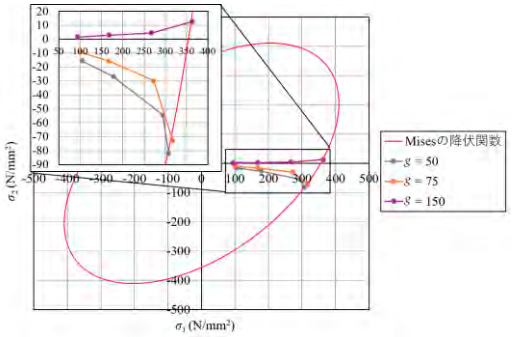


図-7　ミーゼスの降伏関数との関係

降伏モードは N から St へ移行する傾向も確認した．

謝辞　本研究は（一社）日本鉄鋼連盟の鋼構造研究・教育助成事業の支援を受けて行った．ここに記し謝意を示す．

参考文献　1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2026.
2)Xue-Mei Lin, Michale C.H. Yam, Kwok-Fai Chung, Ke Ke, Qun He. Experimental and numerical study on net section resistance of high strength steel staggered bolted connections. Engineering Structures, 2021, 113111.