

SBHS500 で製作した千鳥有孔板のボルト孔縁の応力集中と終局耐力に関する 2, 3 の考察

徳島大学 学生会員 ○坂本 寛太

徳島大学大学院 正会員 森山 仁志

1. 研究背景および研究目的

降伏比 YR が高い特徴を有する橋梁用高性能鋼材 SBHS で製作した部材をボルト接合する場合、穿孔による断面欠損と高降伏比に起因し、部材一般部が十分に塑性変形する前に継手部が破断する¹⁾。対応策の一つとして考えられるのが、ボルト孔を千鳥配置し破断線の総距離を増やす方法である。他方、 YR が高い材料であるため、破壊モードは初期降伏の発生位置が支配的であると予想される。そこで本研究では、高力ボルト継手の終局耐力を最大化し得る構造諸元に関する基礎検討として、SBHS500 で製作した 3 行 1 列千鳥有孔板を対象とし、各ボルト孔縁の応力集中係数 (以下 SCF) と構造諸元の関係を調査した。

2. 数値解析モデル

図-1 に示す 3 行 1 列の千鳥有孔板を対象とし、対称性を踏まえた 1/8 モデルとした。FE モデルは 8 節点 6 面体低減積分要素で構成することを基本とし、ボルト孔周辺の塑性進展に影響しない箇所で 4 面体要素を用い、モデル内で要素分割数を変更している。解析で導入した公称応力 σ - 公称ひずみ ε 関係は図-2 に示すマルチリニア型²⁾を採用した。検討パラメータは、表-1 に示す通りピッチ p とゲージ g とし、総幅 $b_g \cdot$ 板厚 $t \cdot$ ボルト孔径 d_h は一定とした。SCF は図-3 に示す孔縁要素の積分点応力で計算し、式(1)で評価した。SCF の基準応力 σ_n は作用荷重 P を総断面積 $A_g (= b_g \times t)$ で除した、部材一般部の平均垂直応力である。

$$SCF = \frac{\sigma_{mp}}{\sigma_n} \quad (1)$$

ここに、 σ_{mp} : 最大主応力、 σ_n : 部材一般部の平均垂直応力である。

3. 解析結果とその考察

各解析ケースのピッチ p とゲージ g の相関図を図-4 に示す。図中のシンボルの形状は、道路橋示方書³⁾ (以下道示) の最小配置間隔を満足するかどうかを表し、満たさない場合を菱形シンボルとしている。また、色合いは p の大きさで変化させている。M16 高力ボルトの最小間隔 ($p^2 + g^2 < 40^2, p < 20, g < 20$) を橙色、最小縁りあき距離 e_{2min} を確保できる最大のゲージ ($g = 48$) を赤線で示している。また、穿孔による存在不可の領域 ($p < 9, g < 9, p^2 + g^2 < 18^2$) を水色で示している。

Eval.elem.1 ~ 3 の SCF に対しその平均値と l_1/d_h の関係を図-5 に、Eval. 3 の SCF と l_1/d_h の関係を図-6 に、標準偏差と l_1/d_h の関係を図-7 にそれぞれ整理した。プロットのシンボル形状と色合いは図-4 と同じである。ま

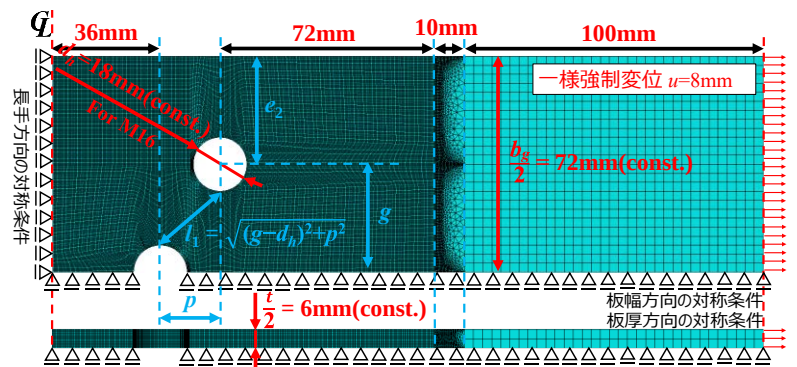
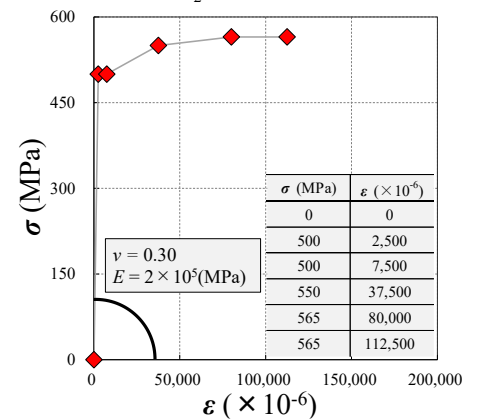
図-1 FE モデル ($p/d1.25-g/d2.25-e_2/d2.25$ を例に)図-2 FEA に用いた σ - ε 関係

表-1 検討パラメータの組合せ

p/d	$b_g = 2e_2 + g$ (mm)	g/d
1.25 to 3.25	144	1.25 to 3.875
3.50 to 6.25	144	1.25 to 2.50

[Note] $p/d, g/d$ は 0.25 刻み (d : 軸平行孔径)
 $g/d = 3.75 (60\text{mm}) \sim 3.875 (63\text{mm})$ は 1mm 刻み

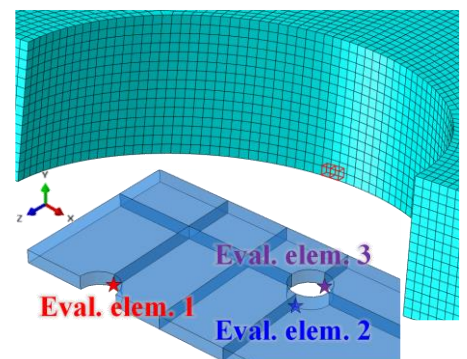
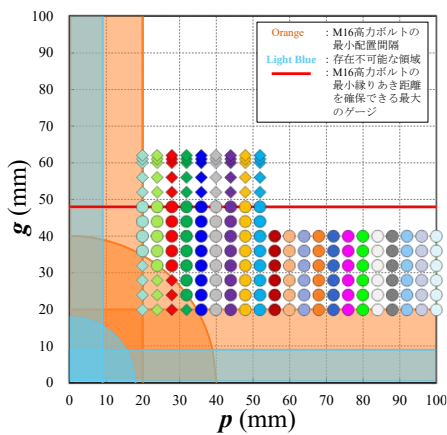
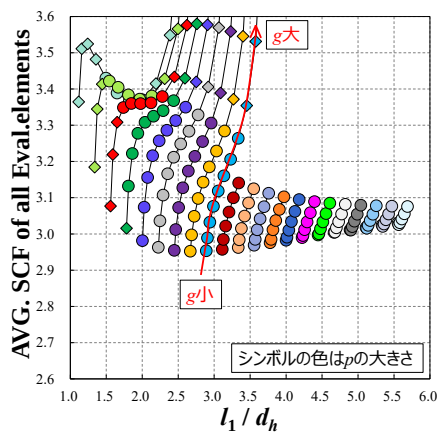
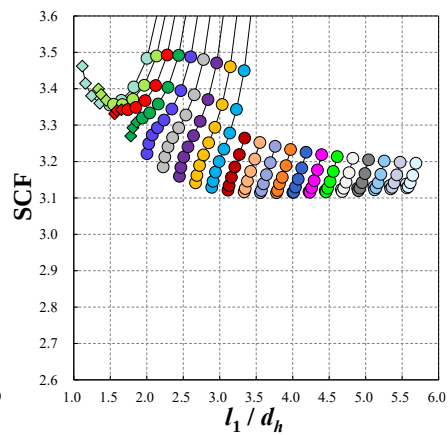


図-3 SCF の評価要素

キーワード SBHS500, 千鳥有孔板, 応力集中係数, FEM 解析, 終局耐力

連絡先 〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地 徳島大学 理工学部 理工学科 社会基盤デザインコース

図-4 各ケースの p - g 相関図図-5 SCF の平均値と l_1/d_h の関係図-6 Eval. elem. 3 の SCF と l_1/d_h の関係

た、平均値の最小、縁りあき降伏に関する Eval. elem.3 の最小、標準偏差の最小と l_1/d_h の関係を図-8 に示す。また、ボルト孔縁距離 l_1 (図-1) は Eval. elem.1, 2 間の距離であり、図-5~7 中の p 一定の同一色プロット群は、 g に応じて l_1 が変化している。

SCF の平均値は図-4 中の橙色境界線上 ($g = 20\text{mm}$)、標準偏差は p によらず概ね $g = 36\text{mm}$ ($=0.25b_g$) のケースにてそれぞれ最小となった。また、SCF の平均値は $e_{2\min}$ を確保できていない $g \geq 48\text{mm}$ の場合に急増した。これは Eval. elem. 3 の応力の急増に起因したものであり、光弾性法を用いた引張実験においても確認されている⁴⁾。

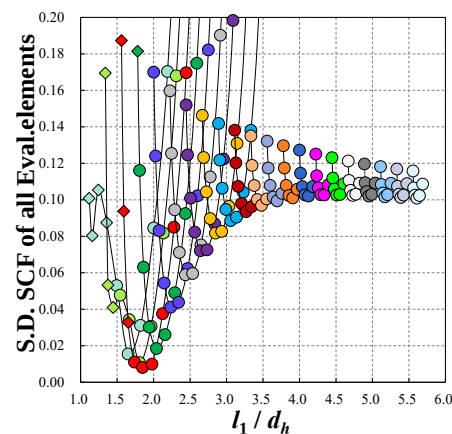
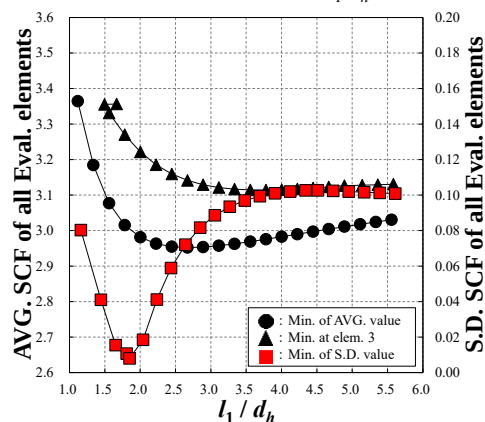
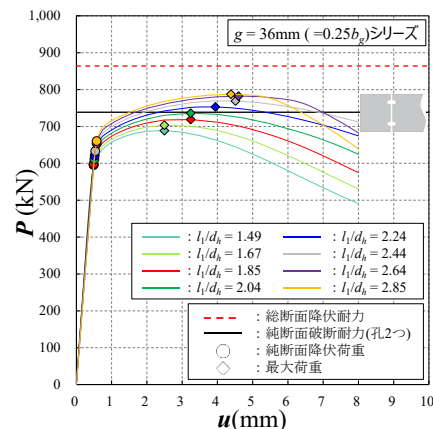
SCF の平均値が g の減少により低下しているのは、主な荷重伝達経路がゲージ区間ではなく縁りあき区間に移行し Eval. Elem. 1, 2 の SCF が低下したこと、縁りあき e_2 が増加し、形状による Eval. elem. 3 の応力集中が緩和されたことが理由である。なお、 $p = 20, 24\text{mm}$ の SCF 平均値の増減傾向が異なるのは、ボルト孔が極端に近づき、着目要素以外の孔縁要素で最大主応力が最大になったためである。

SCF の標準偏差は、図-7, 8 に示すように、 $g = 0.25b_g$ かつ l_1/d_h が 1.8 程度で最小である。他方、SCF の平均値は l_1/d_h が 2.5 程度で最小、Eval. elem.3 の SCF は l_1/d_h が増加するほど低下している。そこで、 $g = 0.25b_g$ のもと $l_1/d_h = 1.49 \sim 2.85$ ($p = 20 \sim 48\text{mm}$) の範囲で弾塑性解析を行い、応力集中と終局耐力の関係を調査した。図-9 には荷重 P - 強制変位 u 関係を示す。図-9 より、千鳥有孔板の最大荷重は純断面破断が発生するまでは l_1/d_h に比例して増加する傾向にあり、Eval. elem.3 の SCF の影響が支配的である。千鳥有孔板の終局耐力の最大化には、縁りあき区間の降伏を防止できるボルト配置とすることが望ましい。

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) Zi-Ce Qin, H. MORIYAMA, T. YAMAGUCHI, M. SHIGEISHI, Yu-Yue Xing and A. HASHIMOTO: Ultimate strength, ductility, and failure mode of high-strength frictional bolted joints made of high-strength steel, Advanced Steel Construction, Vol. 19, No.1, pp.17-22, 2023.
- 2) 日本鋼構造協会 鋼橋の合理化構造・耐久性向上研究委員会 合理化構造・設計法研究部会: 鋼橋の強度設計の合理化, JSSC テクニカルレポート, No.98, 2013.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
- 4) 西田正孝: 応力集中 増補版, 森北出版, 2001.

図-7 SCF の標準偏差と l_1/d_h の関係図-8 SCF の AVG・SD と l_1/d_h の関係図-9 荷重 P と強制変位 u の関係