

# 橋梁用高性能鋼材 SBHS500 で製作した千鳥有孔板の終局状態に関する解析的検討

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

近年開発された橋梁用高性能鋼材 SBHS<sup>1)</sup> は降伏比  $YR (=σ_y/σ_t)$  が高い特徴を有する。SBHS で製作した鋼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。対応策の一つとして考えられているのが、図-1 に示すように、ボルト孔を千鳥配置し破断線の合計距離を増やす方法である。道路橋示方書<sup>2)</sup>では、引張応力を受ける千鳥配置継手の有効断面積  $A_e$  を式(1), (2)のように計算している。式(1), (2)はピッチ  $p$ , ゲージ  $g$ , ボルト孔径  $d_h$  などの寸法諸元のみで構成されるため SBHS の高降伏比に関する塑性域の進展プロセスなどは考慮できていない。したがって本研究では基礎的検討として、SBHS500 の有孔板を対象に、ボルト孔間の塑性進展に関連する  $p, g$  が終局モードや最大荷重に及ぼす影響を数値解析的に検討した。

$$w = d_h - \frac{p^2}{4g} \quad (1) \qquad b_e = b_g - d_h - (n_r - 1)w \quad (2)$$

ここに、 $d_h$  : ボルト孔径 (ボルト軸平行部径  $d+3\text{mm}$ ),  $p$  : ピッチ,  $g$  : ゲージ,  $b_e$  : 純幅,  $b_g$  : 総幅,  $n_r$  : ボルト行数である。

## 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を 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  $\sigma$  - 公称ひずみ  $\epsilon$  関係は図-2 に示すマルチリニア型<sup>3)</sup>を採用した。検討パラメータは、表-1 に示すように、式(1)に関するピッチ  $p$  とゲージ  $g$  とし、縁りあき距離  $e_2$ , 板厚  $t$  およびボルト孔径  $d_h$  は一定とした。

## 3. 解析結果とその考察

解析での終局モードは、図-3 に示すように最大荷重  $P_{\max}$  時の von Mises 応力  $\sigma_{Mises}$  が引張応力  $\sigma_t$  (真応力値) に到達している塑性域で判断し、千鳥状破断をモード SN, 直線状破断をモード NN と定義した。また、ピッチ  $p$  とゲージ  $g$  によるモード分類図を図-4 にそれぞれ示す。図-4 中のシンボルの形状がモードの種類、色合いが  $g/d$  の大きさを示す。M16 高力ボルトの最小間隔が 40mm であることを踏まえ、該当領域 ( $p^2 + g^2 < 40^2, p < 20, g < 20$ ) を橙色で示している。また、ボルト孔間隔はボルト孔径  $d_h = 18\text{mm}$  以上であるため、存在不可の領域 ( $p < 9$  かつ  $g < 9$  かつ  $p^2 + g^2 < 18^2$ ) を水色で示している。黒直線はモード SN の設計上の発生限界 (式(1)の  $w = 0$ ) であり、黒点線はモード SN, NN の設計有効断面積が一致する境界である。すなわち、モード SN は黒点線より内側で発生することが予想される。

図-4 の黒直線より外側の領域ではモード SN が発生していない。黒点線と黒直線に挟まれる区間ではモー

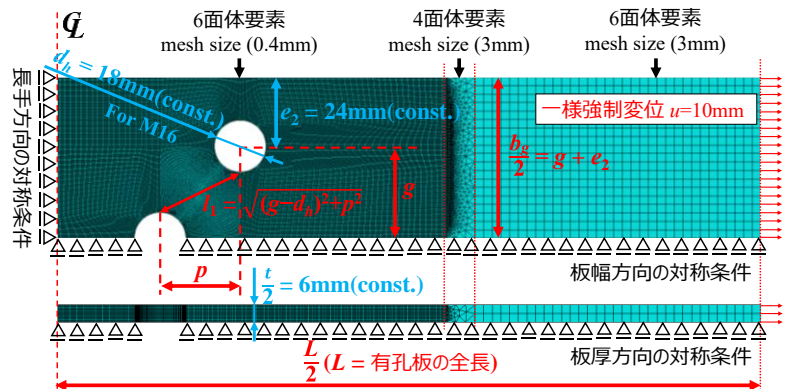


図-1 FE モデル ( $p/d1.75-g/d2.00-e_2/d1.50$  を例に)

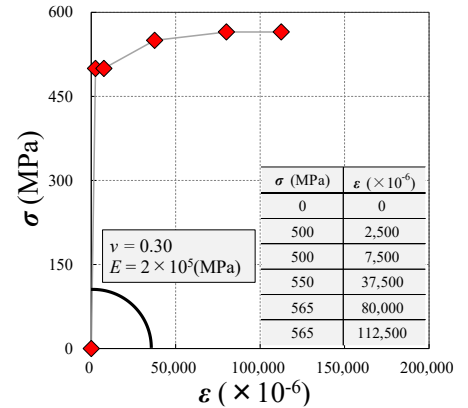


図-2 FEA に用いた  $\sigma - \epsilon$  関係

表-1 検討パラメータの組合せ

| $g/d$ | $b_g = 2e_2 + g$ (mm) | $p/d$        |
|-------|-----------------------|--------------|
| 2.00  | 112                   | 1.75 to 3.50 |
| 2.25  | 120                   | 1.50 to 3.50 |
| 2.50  | 128                   | 1.50 to 3.50 |
| 2.75  | 136                   | 1.75 to 3.75 |
| 3.00  | 144                   | 2.25 to 3.75 |

[Note]  $p/d$  は0.25刻み( $d$ : 軸平行部径)

ド SN, NN のいずれもが発生していることから、式(1), (2)に基づきモードを分類することはできない。しかしながら、両モードの境界は式(1)を構成する  $p^2/g$  が関係しており、その値が一定であることが予想できる。

図-5 には最大荷重  $P_{max}$  と総断面降伏耐力  $P_{ygd}$  の比率  $P_{max}/P_{ygd}$  とボルト孔縁間距離  $l_1$  とボルト孔径  $d_h$  の比率  $l_1/d_h$  の関係、図-6 には応力集中係数 (以下、SCF) と  $l_1/d_h$  の関係をそれぞれ示す。SCF は式(3)により計算している。図-5, 6 中のシンボルの形状がモードの種類、色合いが  $g/d$  の大きさを示す。図-5 中には  $g/d = 2.00$  で並列配置した 2 行有孔板の FEA での  $P_{max}/P_{ygd}$  (赤一点鎖線) を併せて示す。

$$SCF = \sigma_{mp} / \sigma_n \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_{mp}$  : 最大主応力、 $\sigma_n$  : 部材一般部の公称応力である。

$P_{max}/P_{ygd}$  はモード SN が発生している場合には  $l_1/d_h$  に概ね線形比例し、モードが NN に遷移すると非線形性を呈し、ボルト孔が並列配置された 2 行有孔板の  $P_{max}/P_{ygd}$  の値に近づく傾向がある。また、 $P_{max}/P_{ygd}$  の収束値は  $g/d$  の増加に伴い大きくなる傾向にあった。

$P_{max}/P_{ygd}$  が  $l_1/d_h$  に伴い増加したのは、図-6 に示す Eval. element : 1, 2, 3 の SCF が  $l_1/d_h$  に伴い減少したことで、ボルト孔間の塑性進展が遅れるためである。収束値が  $g/d$  に関係するのは、縁りあき距離  $e_2$  一定条件においては、総幅  $b_g$  に対する  $g$  の割合が増加することで Eval. element : 3 の SCF が小さくなり、自由端となる部材端部での降伏が遅れて発生したためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、SBHS500 の有孔板を対象にボルト孔間の塑性進展に関連するピッチ  $p$ 、ゲージ  $g$  が終局モードや最大荷重に及ぼす影響を数値解析的に検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 式(1), (2)で算出する有効断面積に基づきモード SN, NN を分類することは難しいが、両モードの境界は式(1)を構成する  $p^2/g$  が関係しており、その値が一定であると予想された。
- (2) 最大荷重  $P_{max}$  と総断面降伏耐力  $P_{ygd}$  の比率  $P_{max}/P_{ygd}$  はモード SN ではボルト孔縁間距離  $l_1$  とボルト孔径  $d_h$  の比率  $l_1/d_h$  に概ね線形比例し、モード NN に遷移すると非線形性を呈し、並列配置された 2 行有孔板の  $P_{max}/P_{ygd}$  の値に収束する傾向があった。 $P_{max}/P_{ygd}$  の増分や収束値は、孔縁の応力集中の程度が  $p, g$  により変化し、ボルト孔間や部材端部での塑性化に影響したことが関係していた。

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) 日本規格協会 : JIS G 3140, 橋梁用高降伏点鋼板, 2021.
- (2) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, II鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
- (3) 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.

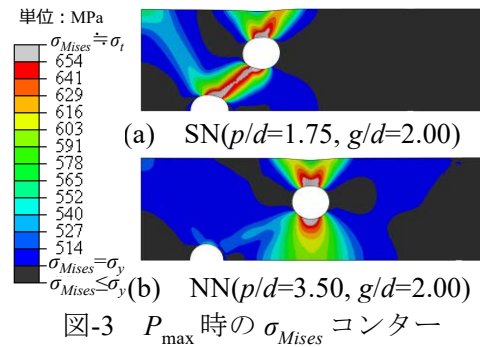


図-3  $P_{max}$  時の  $\sigma_{Mises}$  コンター

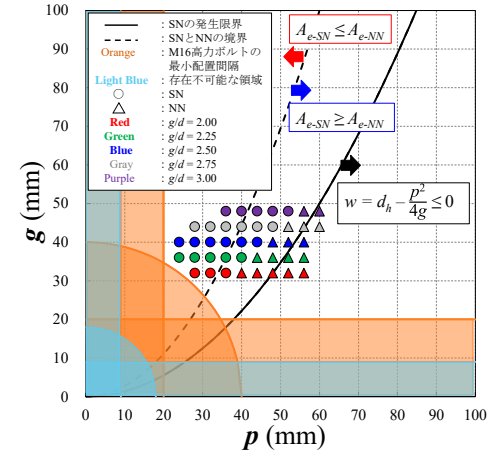


図-4  $p$ - $g$  相関図によるモード分類

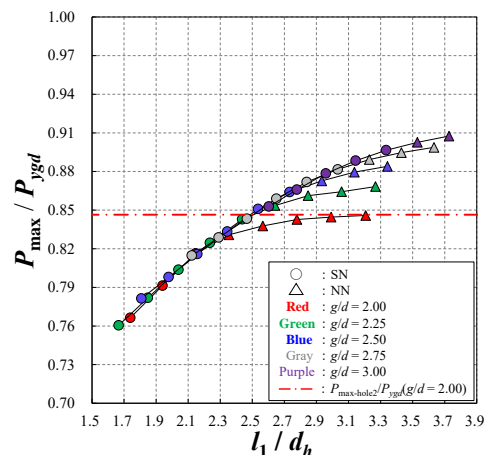


図-5  $P_{max}/P_{ygd} - l_1/d_h$  関係

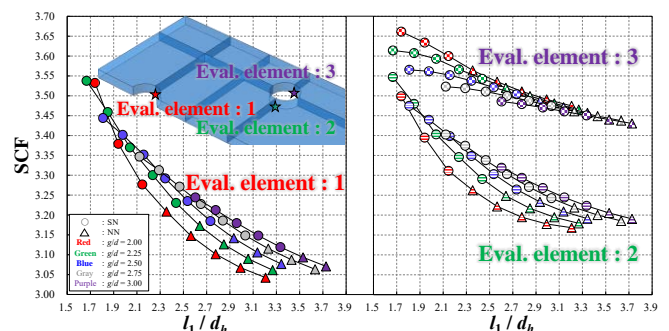


図-6 SCF -  $l_1/d_h$  関係