

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合当て板補修は、摩擦接合継手とは異なり、主板も荷重を伝達するため、荷重伝達が複雑となることから、荷重伝達特性を解明する研究が多数行われている。これまでに有限要素解析を用いた荷重の伝達に関する評価は数多くされているが、当て板の荷重伝達機構を簡易的な推定式で評価することはほとんど行われていない。

本研究では、高力ボルト摩擦接合当て板補修での荷重伝達評価として、高力ボルトを摩擦力によって力が伝達された部分と、肌すきが生じ荷重が伝達されない部分を考慮した当て板の荷重伝達を簡易的に評価する推定式を与える。そして、健全な主板を高力ボルト当て板摩擦接合した場合の解析を行い、分担軸力を推定式と比較して、主板から当て板の荷重伝達機構を明らかにする。

2. 有限要素解析

高力ボルト当て板摩擦接合の荷重伝達を評価するために有限要素解析プログラム Marc を用いて弾塑性有限変位解析(以下 FEM)を行い、主板の分担軸力を評価する。解析モデルは試験体の対称性を考慮して 1/8 モデルとした。図-1 に解析モデルの一例と境界条件を示す。主板と当て板および高力ボルト間は接触条件を用い、摩擦係数 μ は 0.4, 0.5, 0.6 とした。主板と当て板の降伏応力 σ_y は、355 N/mm²(16 mm 以上の板)あるいは 365 N/mm²(16 mm 未満の板)、高力ボルトの降伏応力 σ_y は、900 N/mm² とし、いずれも、ヤング係数 $E_S = 200$ kN/mm²、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。主板厚 t_S (mm) と当て板厚 t_P (mm) の比は $2t_P / t_S$ が 24/19, 18/19, 12/19, 24/14, 24/9 となるように設定し、板幅 $b = 100$ mm, ボルト間隔 80 mm, ボルトから主板中央までの距離およびボルトから当て板端部までの距離を 55 mm とした。高力ボルトは M22 とし、高力ボルトの軸力は、ボルト底面の節点を 1 つの節点に結節し、その節点に設計ボルト軸力(205 kN)を導入した際に得られる変位量を与えて導入した。載荷も同様に主板端部を 1 つの節点に結節し、その節点

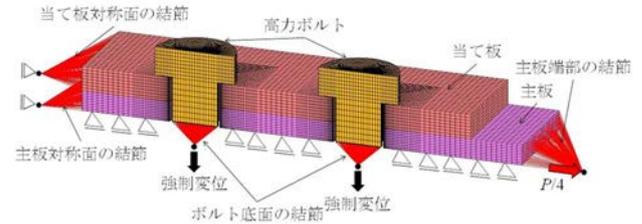


図-1 解析モデルの一例と境界条件

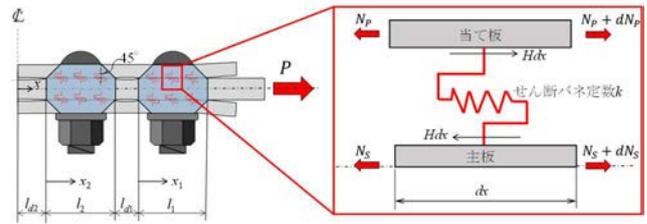


図-2 高力ボルト当て板摩擦接合のせん断バネモデル

に $P/4 = 150$ kN を与えた。

3. 高力ボルト当て板摩擦接合による荷重伝達

高力ボルトによる軸力伝達モデルをボルトが 2 列のモデルを例に図-2 に示す。高力ボルト当て板摩擦接合の荷重伝達を簡易的に評価できるようにせん断バネ(バネ定数 k)でモデル化し、主板と当て板の水平ずれ δ と単位長さあたりの水平せん断力 H がフックの法則に従うと仮定することで、主板の軸力 N_S に関する微分方程式が次式で与えられる¹⁾。

$$\frac{d^2 N_S}{dx_1^2} - c_1^2 N_S = -c_1^2 \xi_0 P \quad (1)$$

$$c_1 = \sqrt{k \cdot \frac{2}{1 - \xi_0} \cdot \frac{1}{E_S A_S}} \quad (2)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2A_P / A_S} \quad (3)$$

ここに、 P : 載荷荷重, E_S : 鋼のヤング係数, A_S, A_P : それぞれ主板と片側の当て板の断面積。

2 列目のボルトも同様に考えて、バネ定数 k は一定であると仮定すると式(1)に対して軸力 N_S に関する一般解が次式より与えられる。

$$N_S = A_{11} \cosh(c_1 x_1) + A_{12} \sinh(c_1 x_1) + \xi_0 P \quad (0 \leq x_1 \leq l_1) \quad (4)$$

$$N_S = A_{21} \cosh(c_2 x_2) + A_{22} \sinh(c_2 x_2) + \xi_0 P \quad (0 \leq x_2 \leq l_2) \quad (5)$$

ここに、 $A_{11} \sim A_{22}$: 未定係数。

文献1)では、高力ボルト間に肌すきがあった場合の影響

響が考慮されていないため、式(4)、(5)に対して、当て板端部($x_1 = l_1$)で主板の軸力 N_S が P となる条件、高力ボルト部と肌すき部の境界 $x_1 = 0$ および $x_2 = l_2$ で N_S が連続し、主板と当て板のずれとせん断ばねによるせん断変位が等しくなる条件($x_2 = 0$ の場合式(6))を与えて、式(7)から未定係数 $A_{11} \sim A_{22}$ を得る。

$$\frac{N_S(x_2 = 0)}{E_S A_S} \cdot l_{d2} - \frac{N_P(x_2 = 0)}{E_S A_P} \cdot l_{d2} = \frac{1}{2k} \cdot \frac{dN_S(x_2 = 0)}{dx_2} \quad (6)$$

$$A = B^{-1}F \quad (7)$$

$$A = (A_{11} \quad A_{12} \quad A_{21} \quad A_{22})^T \quad (8)$$

$$F = ((1 - \xi_0)P \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (9)$$

ここに、 B は各成分が $b_{11} = CH(c_1 l_1)$, $b_{12} = SH(c_1 l_1)$, $b_{21} = 1$, $b_{23} = -CH(c_2 l_2)$, $b_{24} = -SH(c_2 l_2)$, $b_{32} = -c_1/k$, $b_{33} = (c_2/k)\{SH(c_2 l_2) + l_{d1} c_2 CH(c_2 l_2)\}$, $b_{34} = (c_2/k)\{CH(c_2 l_2) + l_{d1} c_2 SH(c_2 l_2)\}$, $b_{43} = l_{d2} c_2^2$, $b_{44} = -c_2$, その他の成分は 0 となる 4×4 次元のマトリックス、 N_P は当て板の軸力である。ただし、 CH は \cosh , SH は \sinh を表す。ボルトの列数が異なる場合も同様にして、境界条件を与えることで多列に対する N_S の推定式が得られる。

高力ボルトを締結した際に摩擦力で力が伝達される範囲は、前述の解析結果を参考に、図-2 のようにボルト頭から 45 度の角度とした。バネ定数 k の決定は、ボルトが 1 列の場合の FEM 解析結果から得られた当て板中央の主板の軸力 N_S が、式(4)の $N_S(x_1 = 0)$ と合致するように、逆算して導出した。ただし、解析結果では、主板の全強 P_Y (純断面降伏) の 50% ($0.5P_Y$) まで主板の軸力 N_S が線形を示したので、 $0.5P_Y$ の N_S を用いた。導出した k 値を図-3 に示す。この結果から、主板と当て板の比 $2t_p / t_s$ および摩擦係数によってバネ定数 k の値が若干変動するが、本研究では、摩擦係数 $\mu = 0.5$ の平均のバネ定数が $k = 71.2 \text{ kN/mm}^2$ であったので、 $k = 70.0 \text{ kN/mm}^2$ を用いて高力ボルト当て板摩擦接合の力の伝達を評価する。

高力ボルト 1 列に対して FEM 解析結果と、式(4)の値の比較を図-4 に示す。この結果から、 $0.5P_Y$ までは、FEM 解析結果を式(4)の N_S で推定できることがわかる。

4. 多列の解析結果と推定値の比較

高力ボルトが 2 列、3 列の場合に対しても、各ボルトの摩擦係数が等しいとして、 $0.5P_Y$ の際の N_S の FEM 解析結果と推定式の比較を示す。この結果から、高力ボルト列数が増加しても、バネ定数 k を用いて主板の軸力 N_S が推定できることがわかる。

5. まとめ

本研究では、主板への高力ボルト当て板摩擦接合に対して、摩擦係数を用いて、荷重伝達を簡易的に評価す

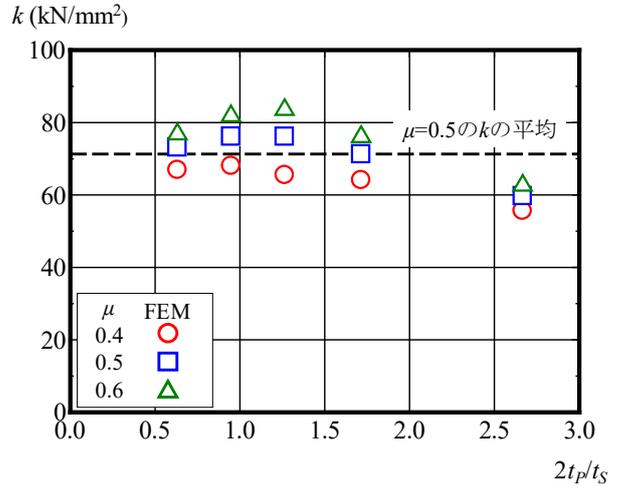


図-3 せん断バネ定数 k の比較

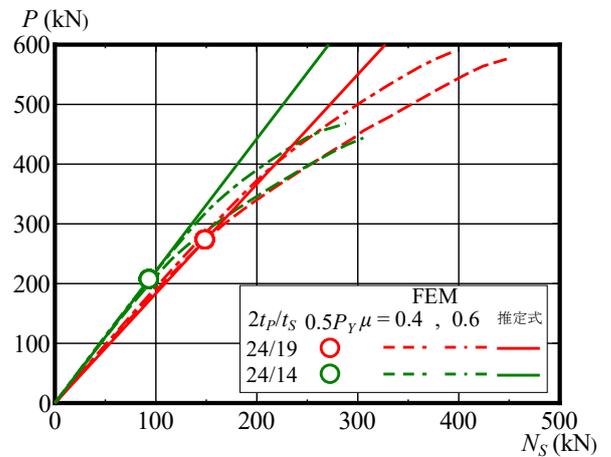


図-4 $P-N_S$ 関係

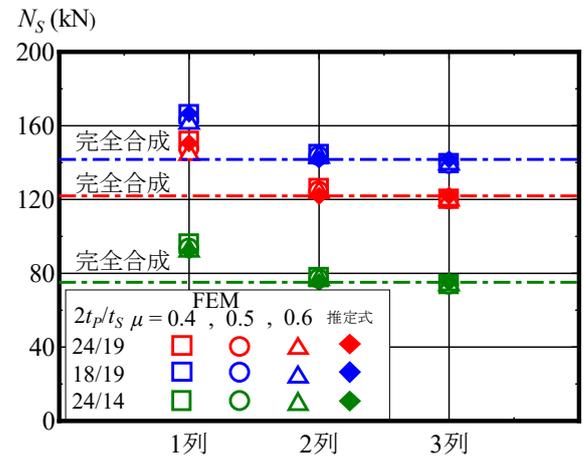


図-5 N_S -ボルト列数関係

る方法を提案し、主板の軸力の推定式を与えた。推定式を用いて、純断面降伏の 0.5 倍までの $P-N_S$ 関係が線形を示す範囲において、FEM 解析結果と同程度の主板の分担軸力が推定できた。

参考文献

- 1) 石川敏之, 池田拓矢, 堀井久一: 接着と高力ボルト摩擦接合の混合による鋼部材の補修に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.67A, pp384-397, 2021.