

東京都立大学 正 ○ 長嶋文雄
同上 正 伊藤文人

1. まえがき 高力ボルト摩擦接合継手の継手特性を表現しうる解析モデルは未だ十分なものがあるとは言えない。過去の解析例では継手全体を連続体と見做して応力関数を用いたもの¹⁾や、伸びばね、あるいはそれに剪断ばねを付加させたモデルに置換し離散的手法を用いたもの等がある。前者はすべり挙動を表現するには適さず、また後者は、ばね特性の決め方が問題となる。また後者に対して有限要素法による解析も考えられるが、すべり面の処理や自由度が多くなる等の問題がある。ここに提示する有限剛体要素モデル (Finite Rigid Body Element Model) による解法は基本的に後者の考え方と同様であるが、剪断ばね特性に主な特徴を有するものである。以下に主すべりまでの解析手法を示し、またモデル化の精度を検討するために静的引張試験結果との比較をしたものを例示する。

2. 摩擦接合継手のF.R.B.E.モデルと解析法

単一ゲージラインの高力ボルト摩擦接合継手を対称性を利用し、剛体とそれを連結する伸びばね k_e また剪断ばね k_s で構成されたモデルに置換する (Fig. 1)。継手は主すべりと部材の純断面降伏点を一致させるように設計するの一般的な考え方であるので、主すべりまでの解析では伸び

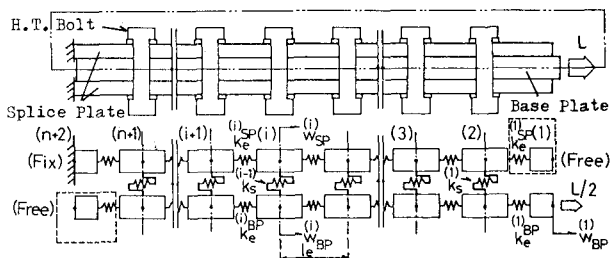


Fig. 1 Finite Rigid Body Element Model

ばねは線形を考えればよく、長さ l_0 、断面積 A 、弾性係数 E の軸力要素の歪エネルギーと剛体要素の伸びばねによる歪エネルギーを等置することによって $k_e = EA/l_0$ となる。剪断ばねには Fig. 2-a で示されるような履歴特性を持たせる。縦軸は剪断力 S で横軸は母材と添接板に対応する剛体要素の重心 (ボルト中心軸) 位置における相対変位 $\beta = w_{BP} - w_{SP}$ である。 β が零から β_{rev1}^* まで増加し、次に β_{rev2}^* まで減少し、さらに増加するような繰り返し荷重を受けるときは図中の A→F の経路をたどる。このときの剪断変形およびすべりの状態を略図で示したのが Fig. 2-b である。 S_0^* は無載荷状態におけるすべり限界剪断力であり、一点鎖線はポアソン比に起因するボルト軸力 N の低下に対するすべり限界剪断力 $S^* = \mu N$ (μ : 摩擦係数) を示す。

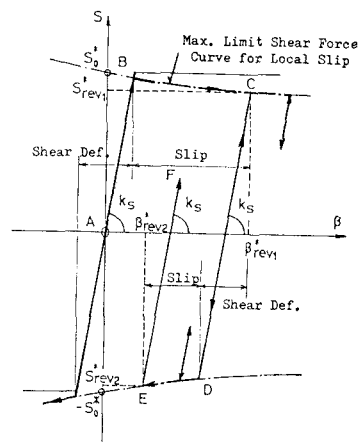


Fig. 2-a Hysteresis Curve Model of Shear Force

ボルト軸力 N は初期導入軸力を N_{in} 、ボルト軸の断面積を A_0 、弾性係数を E_0 、無応力状態の全板厚を t_0 とすると式で示される。

$$N = N_{in} - A_0 E_0 \frac{\Delta t}{t_0} \quad (1)$$

また Δt は Fig. 3 を参照して式となる。

$$\Delta t = \frac{1}{E} \left(\sigma_{BP}^{(i)} t_{BP} + 2 \sigma_{SP}^{(i)} t_{SP} \right) \quad (2)$$

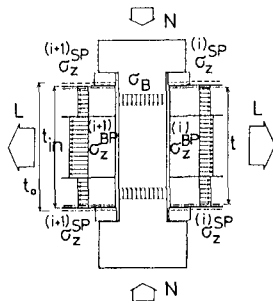


Fig. 3 Axial Stress in and around the H.T. Bolt

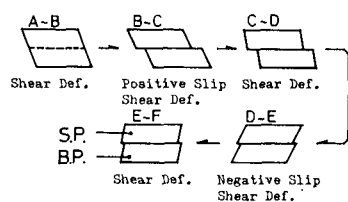


Fig. 2-b Shear Def. and Slip Behaviour

剪断ばね定数 k_s は剪断歪エネルギー V_s と剛性要素の剪断ばねによる歪エネルギー V_s^* を等置することによって求められる。

$$k_s = \frac{8GA_s}{\pi b^2 + \pi b^2} \varphi \quad (3)$$

ここで G は剪断弾性係数、 A_s は剪断面積である。また φ は補正係数であり、単純剪断歪エネルギー V_{s1} (Fig. 4-b) に対する実際の剪断歪エネルギー V_s の比である。

$$\varphi = V_s / V_{s1} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2G} \left(\int_V \tau^2 d(vol) \right) / \left(\frac{1}{2} G \left(\frac{Q}{A_s} \right)^2 d(vol) \right)$$

ここで τ は Fig. 4-a における剪断応力度である。 φ は $\lambda = L'/L$ の関数となり Fig. 5 で示される。

全体系の解析は局部すべりが発生すると非線形系となるため、収束計算により解を求める必要がある。また主すべりの時点における平衡解を求めるために変位制御による計算をしている。

3. 解析的引張試験結果²⁾との比較

Fig. 6 はボルト列数 n が 3, 6, 12, 18 の場合 (各 3 体) における主すべり発生時のボルト軸力低下の様子を初期導入軸力に対する百分率で表わしたものである。試験結果に対して本解析 (摩擦係数は実験で得られたものを使用) による結果は良く合致しており、またいわゆるボルト荷重の値も 2% 以内の誤差範囲にとどまっていた。

Fig. 7, 8 は繰り返し荷重作用下の継手のすべり挙動を例示したものである。実験結果 (Fig. 7) と本解析による解析結果 (Fig. 8) は非常に良く合っている。ここで K : 設計ボルト荷重 / 純断面積状荷重、 ρ : 継手断面の充実率。

4. おわりに

ここに提示した高力ボルト摩擦接合継手解析用 F.R.B.E.M. はすべり挙動を含む継手特性を低自由度で、しかも精度良く表現できることが確認された。ゲージラインが複数 (千鳥、平行配列) の場合であっても引張応力場における挙動をシミュレートするのであれば、今回の解析モデルを単純に拡張するだけではないと思われる。但し、曲げ応力場においては F.E.M. (例えば非適合要素) と F.R.B.E.M. の混合型モデルを用いて解析する必要がある。

[参考文献] 1) 田島二郎: 高力ボルト摩擦接合概説, 2) 森田公明等: 建設工事標準設計: 高力ボルト摩擦接合継手試験報告 57.11

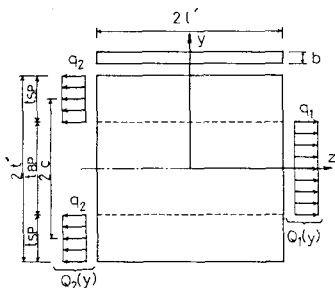


Fig. 4-a Actual Shear

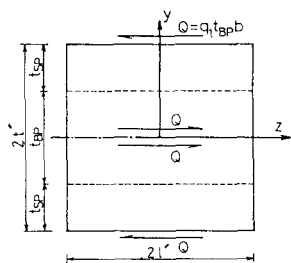


Fig. 4-b Simple Shear

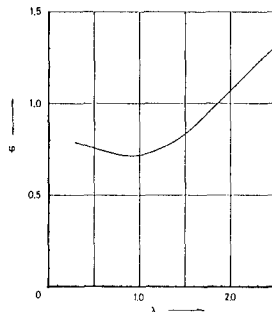


Fig. 5 Compensation factor

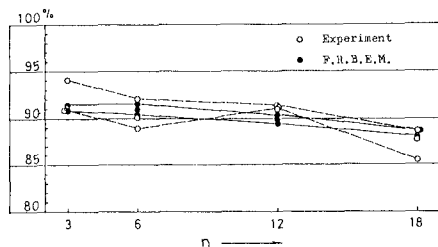


Fig. 6 Bolt Tension Decrement Behavior (Average)

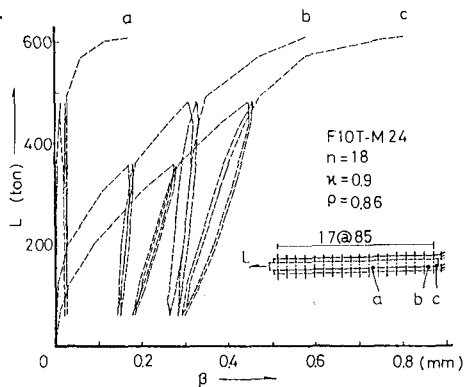


Fig. 7 Load-Slip Relation to Cyclic Loading (Experiment)

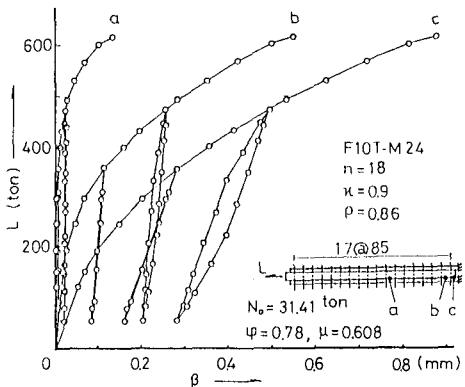


Fig. 8 Load-Slip Relation to Cyclic Loading (F.R.B.E.M.)