

高力ボルト接合部にすべりが生ずる骨組の地震応答解析

Earthquake Response Analysis of Frames with Bolted Connections

谷口英武*・高梨晃一*

Hidetake TANIGUCHI and Koichi TAKANASHI

1. 序

高力ボルト摩擦接合はり継手を持つ部材について、既に、繰り返し载荷実験や、電算機-試験機オンラインシステムによる地震応答解析を行い、接合部にすべりが生じた場合の復元力特性や地震応答性状への影響等について検討を行ってきたが^{1)~3)}、その結果を基に、高力ボルト摩擦接合はり継手を持つ部材の復元力特性の数式モデル化を試み、このような部材を持つ骨組の数値計算による地震応答シミュレーションを行ったので報告する。

2. 復元力特性のモデル化

高力ボルト摩擦接合はり継手を持つ部材の復元力特性の特徴として次のような点が挙げられる²⁾。

(1) 接合部にすべりが生じる前の履歴ループは無継手のものと同様である。

(2) 初すべり荷重は、それ以前の加力パターンの影響をうけない。

(3) すべり後の履歴ループは、いわゆるスリップ型となり、スリップ部分と支圧部分に分かれるが、スリップ部分の耐力は、初すべり時耐力の40~50%程度であり、スリップ長さは、全振幅が大きくなるにつれて長くなる。

これらの点を考慮して、図1に示すようなボルトスリップモデルを作成した。これは、初すべり前の挙動を示すBi-linear型復元力特性と、すべり後の挙動を示すスリップ型復元力特性を組み合わせたものであり、履歴ループのルールは次のとおりである。

(1) ボルトにすべりが生じる前は、弾性勾配 K_E の直線①、第2勾配 K_P の直線②、③で表される。

(2) 曲げモーメントが初すべり曲げモーメント M_{so} を越えると、すべりが生じ、モーメントは、直線④、または、⑤のレベルに低下する。

(3) すべりは、モーメントの正、負側でそれぞれ1回、計2回起きるものとし、どちらか一方ですべりが生じると、逆側でのすべりが生じるまでは、すべりが生じた側ではスリップ型(④、⑥、⑧、もしくは、⑤、⑦、⑨)。

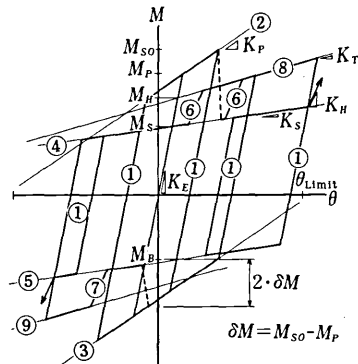


図1 ボルトスリップモデル

逆側ではBi-linear型(②、もしくは、③)の挙動を示す。ただし、一方ですべりが生じた後、逆側でのすべりが生じる前に、すべりが生じた側での変形が、ある限度 θ_{Limit} を越えると、除荷後は、逆側でも、スリップ型の挙動を示すものとする。たとえば、1回目のすべりが正側で生じ、負側でのすべりが生じる前に、正方向での変形が、 θ_{Limit} より大きくなると、除荷後は、③ではなく⑤の直線にのり、もはや負側でのすべりは生じないものとする。

ここで

$$|\theta_{Limit}| = \left| \frac{(1 - K_S/K_E) \cdot M_S - (1 - K_P/K_E) \cdot M_P}{K_P - K_S} \right| + \left| \frac{2 \cdot \delta M}{K_P} \right|$$

である。

(4) どちらか一方ですべりが生じた後、逆側でのすべりは、曲げモーメントが、初すべり曲げモーメント M_{so} を越えるか、 $M_B + 2 \cdot \delta M$ を越えると起きるものとする。ここで、 M_B は、Bi-linearの折れ曲がり点のモーメント値で、 $\delta M = M_{so} - M_P$ である。

(5) ボルトがすべった後は、スリップ型の復元力特性を示し、勾配 K_S のスリップ部分(④、⑤) 勾配 K_H の支圧部分(⑥、⑦)、勾配 K_T の支圧降伏部分(⑧、⑨)の各部で表される。

* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

(6) スリップ部のすべり長さは、支圧部、支圧降伏部の履歴をうけると、その分だけ長くなる。

3. 振動方程式の解き方

高力ボルト摩擦接合部を持つはりの $M - \theta$ 関係に、このモデルを適用し、骨組の振動解析を行う際の、すべり前後の計算方法について説明する。図2に示すような骨組を想定し、各層の質量は床面に集中しているものとする。この骨組が地動をうけ、ある時刻に、 i 層のはりの接合部にすべりが生じたとし、その直前の層の水平変位、速度、加速度、層の復元力をそれぞれ、 X, \dot{X}, \ddot{X}, F とする。ボルトのすべりは瞬間的に起こるものとし、その前後で、 X, \dot{X} は変化せず、 \ddot{X}, F のみ変化する。節点の回転慣性を無視すると、節点回転角 θ も変化しうる。すべりが生じた時の各変化量の関係は、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} \Delta F \\ \Delta M \end{Bmatrix} = [K] \cdot \begin{Bmatrix} \Delta X \\ \Delta \theta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 K は、すべりが生じたはりの剛性を0とした骨組の剛性マトリックスであり、 ΔM は、すべりが生じ

たはりのモーメント低下量で、図1のモデルにより与えられる。 $\Delta X = 0$ であるから、 $\Delta F, \Delta \theta$ が求められ、すべり後の復元力 F' 、節点回転角 θ' が求められる。ボルトスリップ後も、振動方程式は満足されなければならないから、次式が成立する。

$$m\ddot{X}' + C \cdot \dot{X}' + F' = -m\ddot{y}_0 \quad (2)$$

ここで、 \dot{X}', F', \ddot{y}_0 は、既知量であるから、すべり直後の応答加速度 \ddot{X}' が求められる。

こうして求められた、すべり直後の各値 $X, \dot{X}, \ddot{X}, F', \theta'$ を初期値として、以後の振動解析を続ければよい。本報では、振動方程式の数値解法として、線型加速度法を用いた。

4. 1層骨組の地震応答解析

既に、高力ボルト接合部をもつH形鋼はり柱脚でピン支持された剛な柱からなる門型骨組に電算機・試験機オンラインシステムを適用し、地震応答解析を行ったが²⁾ 本報の復元力特性モデルを用いて同じ骨組の応答を数値解析により求め、結果を比較し、モデル化の妥当性を検討した。材端モーメント・材端回転角関係、変位の時刻歴、応答変位のフーリエスペクトル図の比較を図3～5に、最大変位 X_{max} 、履歴吸収エネルギー E の比較を表1に示す。各図とも、(a) がオンライン解析の結果 (b) がボルトスリップモデルによる数値解析結果である。高力ボルト接合部にすべりが生じると、非常に複雑な復元力特性を示すが、図1のような、直線のみで構成された単純なモデルを用いた数値計算によっても、その挙動を比較的良好に近似できることがわかる。

つぎに、既に行った高力ボルト摩擦接合はり継手を持つ部材についての繰り返し載荷実験の結果²⁾ から、6本

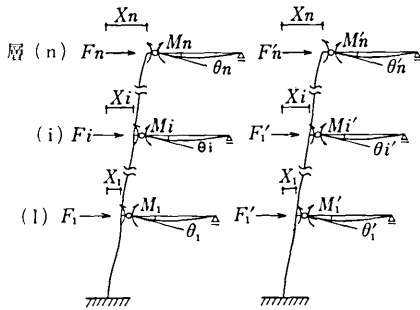


図2 解析フレーム

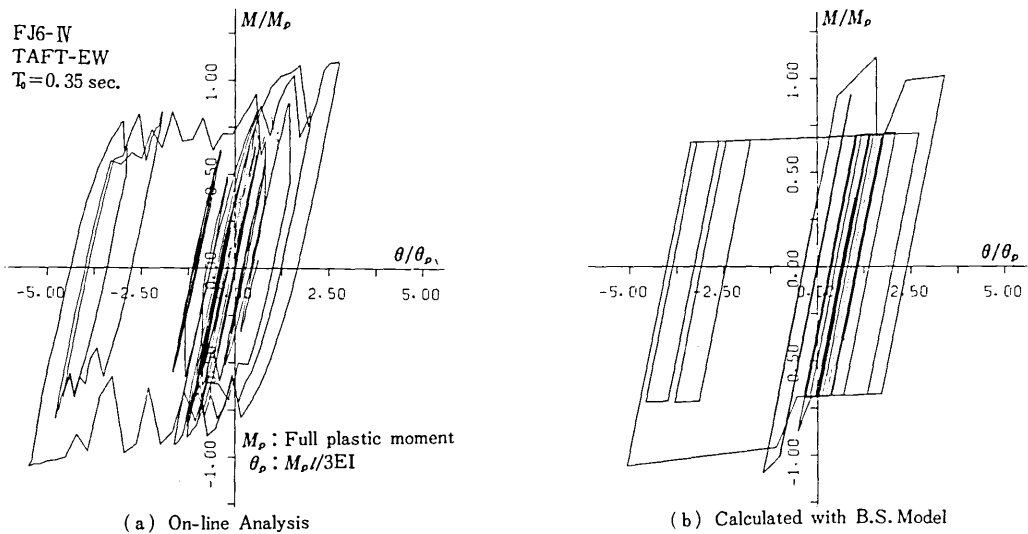


図3 M- θ カーブ

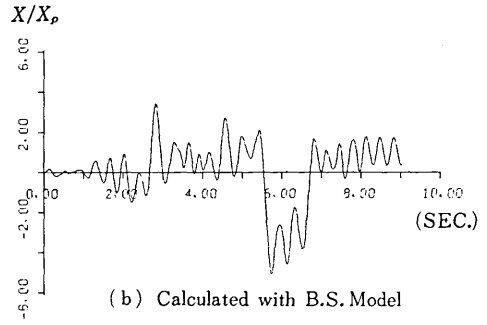
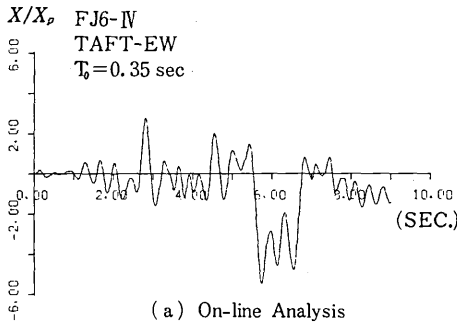


図4 Time Histories of Response Displacement

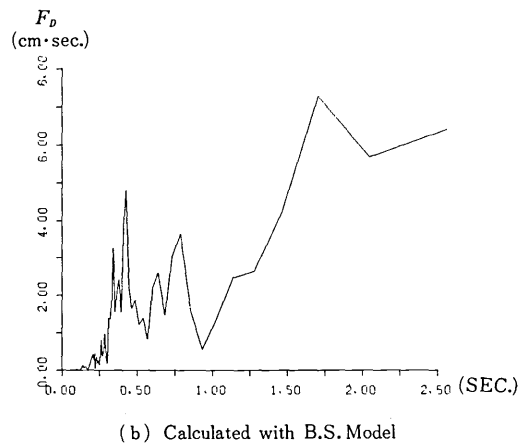
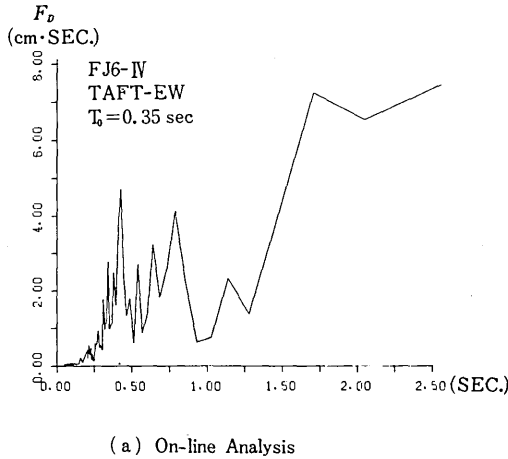


図5 Fourier Spectrum of Response Displacement

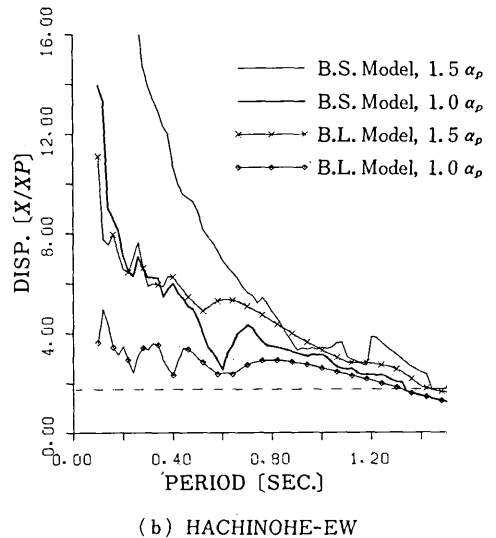
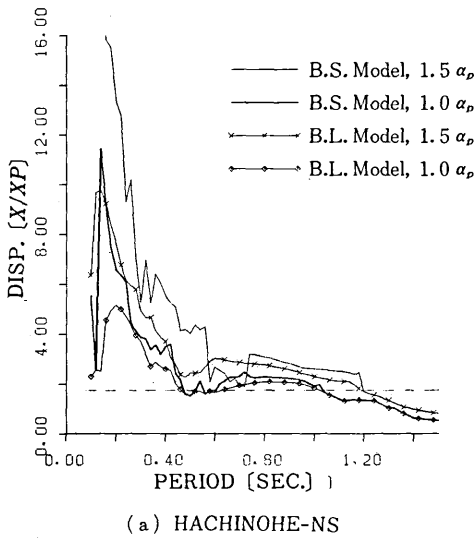


図6 Maximum Displacement Spectrum

接合の場合の平均的な値として、ボルトスリップモデルの各パラメーターの値を表2に示すように定め、これを標準モデルとして、ボルトのすべりの影響を検討した。

例として、先程と同様の1層門型骨組を対象とし、八戸NS波、八戸EW波の最大加速度を、降伏加速度 α_p の1倍、1.5倍とし、各場合について、ボルトスリップモデル

表1 オンライン解析結果と数値解析結果の比較

骨組記号	解析の種類	X_{max}/X_P	$E(F_P \cdot X_P)$	入力波
FJ 6-I	On-line	8.27 (2.16 Sec)	35.81	八戸-NS
	数値解析	7.37 (2.14 Sec)	37.92	
FJ 6-II	On-line	5.90 (4.62 Sec)	27.56	八戸-EW
	数値解析	5.46 (4.59 Sec)	24.88	
FJ 6-III	On-line	4.38 (2.15 Sec)	14.90	ELCENT-RO
	数値解析	3.67 (2.14 Sec)	12.60	
FJ 6-IV	On-line	5.48 (5.74 Sec)	18.92	TAFT
	数値解析	5.08 (5.74 Sec)	19.48	

X_{max} : Maximam response displacement

E : Energy absorbed

X_P : F_P/K_E , F_P : $2 \cdot M_P/H_C$, M_P : Full plastic moment of beam, H_C : Column length, K_E : Elastic stiffness of frame

表2 標準モデルの諸定数

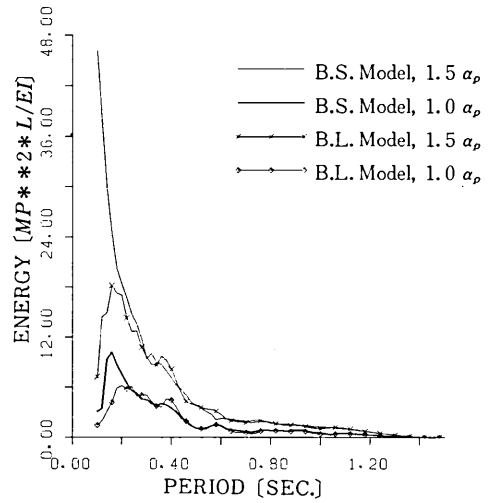
M_{SO}	M_H	M_S	K_P	K_S	K_H	K_T
$1.15 M_P$	M_P	$0.5 M_{SO}$	$0.2 K_E$	$0.01 K_E$	$0.6 K_E$	$0.01 K_E$

と Bi-linear モデルによる応答計算を行い、最大変位、履歴吸収エネルギーを求め、結果を図6, 7に示す。図6は応答変位スペクトル図であるが、図中、破線はボルトの初すべりに対する変位であり、この線より下では、すべりは生じていない。この図から、接合部にすべりが生じると、変位は、おおむね、大きくなるが、周期によっては、逆に Bi-linear モデルによる応答結果の方が大きくなる場合もあることがわかる。履歴吸収エネルギーについては、図7から、八戸NS波に対しては、ボルトスリップモデルと Bi-linear による違いはあまりないが八戸EW波については固有周期が0.5秒付近以下から、ボルトスリップモデルによる結果が大きくなっている。

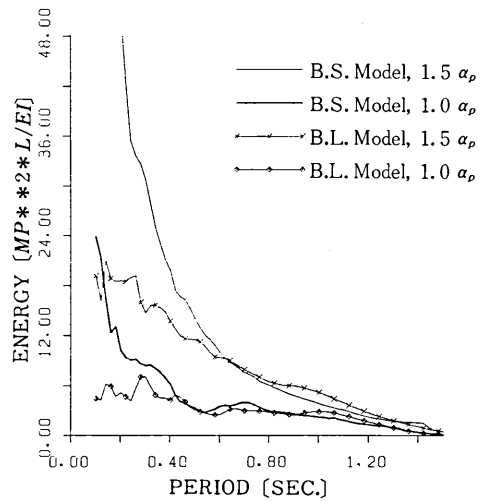
5. 結 語

高力ボルト接合部にすべりが生じると、復元力が大幅に低下し、スリップ型の履歴ループとなり、非常に複雑な復元力特性を示すが、図1に示すような復元力特性モデルを用いることにより、大まかな応答性状は、十分に把握できることが、オンライン解析の結果との比較から確かめられた。

なお、フーリエスペクトル解析は、東大の大崎順彦教授作成のプログラムによるものであり、同教授に謝意を



(a) HACHINOHE-NS



(b) HACHINOHE-EW

図7 Energy Absorbed

表します。

(1979年8月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 高梨, 宇田川, 田中: 地震動をうける高力ボルト接合部の挙動 生産研究 p.40~43 29巻5号, 1977.
- 2) 高梨, 田中, 阪口, 田中: 高力ボルト摩擦接合による変形鋼はり継手の弾塑性挙動 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和53年9月 p.1229
- 3) 高梨, 田中, 谷口, 阪口, 田中: 高力ボルト摩擦接合はり継手をもつ骨組の地震応答 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和53年9月 p.1227