

摩擦滑りを利用した構造物の耐震性の向上

倉西 茂

工博 関東学院大学工学部土木工学科(〒2368501 横浜市金沢区六浦町 4834)

鋼構造物中に設けられる高力ボルト摩擦接合は継手に作用する力が摩擦力より大きくなるとエネルギーを吸収しながら滑ることになるし継手はその摩擦力以上の力を伝えることはない。この性質を利用すれば、極めて大きな地震によって上部構造や鋼橋脚が励起されても、継手の持つ摩擦滑り耐力以上の力はそれらに伝わることはない。そこで橋脚の持つ降伏耐力以下に摩擦滑り耐力を設定すれば橋脚に降伏点以上の応力が生じる恐れはなくなる。この性質を考慮した解析を行い、その性質を論じる。

Key word: Joint, High tension bolt, Friction, Aseismic Design

1. はじめに

鋼橋脚と言った構造物の耐震性の向上のためには、構造物が地震によって励起される振動エネルギーを吸収する能力を持たさなければならない事は広く認められている。このエネルギー吸収能力は構成している材料のみならず、高力ボルト摩擦継手が存在するならば、その摩擦滑りによっても得る事ができる。摩擦と言うのはこういった目的のためには極めてより性質を持っている。自動車のブレーキのように確実に構造を止める働きを持っており、しかも止める事によって構造物にとって好ましくない変化を残さない事である。

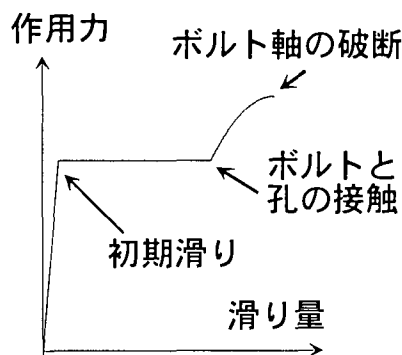


図1 高力ボルト継手に加わる力と変形の関係

高力ボルト摩擦継手は図に示したように、これに働く力が摩擦力より小さい場合はほとんど変位を示さない。それを越えるとボルトの軸がボルト孔に接するまで摩擦滑りが生じる。接すると、ボルト軸に支圧と、せん断応力が生じ、やがてはボルト軸はせん断破断に至る。この関係はその力-変位図だけを見ると、鋼材は最初弾性伸びを示し、降伏点を越えると降伏伸びとなり、やがてひずみ効果を起こし、破断するのと極めて似ている

事になる。材料は塑性変形により材料の劣化が起こるのに対し、摩擦滑りでは材料間の相対変位が生じるだけの違いと言う事になる。さらに、圧縮力が働く場合は鋼板に座屈が起こり、その後座屈変形によるエネルギー吸収能力を期待しなければならない、そのため問題を複雑なものにしている。本論文は継手による耐震性の向上の検討、それが要求する細部構造、および設計示方書との関係を論ずるものである。

2. 高力摩擦ボルト継手を持った鋼橋脚の設計

道路橋設計示方書・耐震編に従って高力ボルト摩擦継手を持った鋼橋脚を設計すると次のようになろう。

橋脚中の継手の位置は中間の任意の位置に設ける。震度法で考慮しているような地震動に対して、上部構造を含めたその慣性力に対して継手は十分に抵抗できるように強度設計を行う。一般の場合には、その震度は0.4程度になろう。

地震時保有水平耐力法を適用するような地震に対しては、後で述べる継手の変形能力(塑性率相当の)を継手に持たせ、それより得られる震度による慣性力に抵抗できるように継手の滑り出し強度を定める。この時、その強度は図に示したように、断面の強度に対してある安全率を持つようにする。

こうする事により、橋脚は震度法で考慮するような地震に対しては完全弾性体として挙動し、地震時保有水平耐力法で考慮するような地震に対しては継手部は塑性ヒンジが生じたような状態となり、振動エネルギーを吸収しながら変位する事になる。

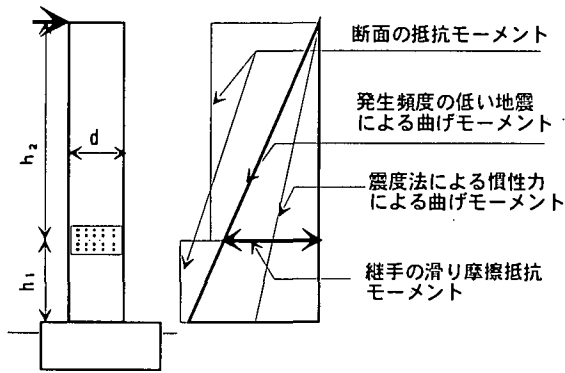


図2 橋脚に設けられた高力ボルト摩擦接合継手の強度と滑り耐力の設定

3. 高力ボルト摩擦継手の働き

摩擦継手を耐震性向上のために使用した場合の優れている点は、一つは高い応力下での滑りのため極めて大きなエネルギー吸収能力を持つ事であり、もう一つはクーロン摩擦のため、摩擦滑りが生じると、それ以上の力の伝達起きない事である。すなわち、継手の摩擦滑り耐力以上の力を伝えないため、橋脚に生じる力はそこで頭打ちになるし、上部構造に対しても同じである。と言う事は継手部で力のそれ以上の伝達が完全に遮断される事である。

こういった良い性質を持ちながら、なぜ今までその利用が行われなかったかの理由の一つに摩擦力の不確実性にあると思われる。事実、使用状態での摩擦係数を計ったデータはほとんどないのが実状である。しかし、阪神大震災では写真1に示したように幾つかの高力ボルト摩擦継手を持つ橋脚で、滑りが見られ。

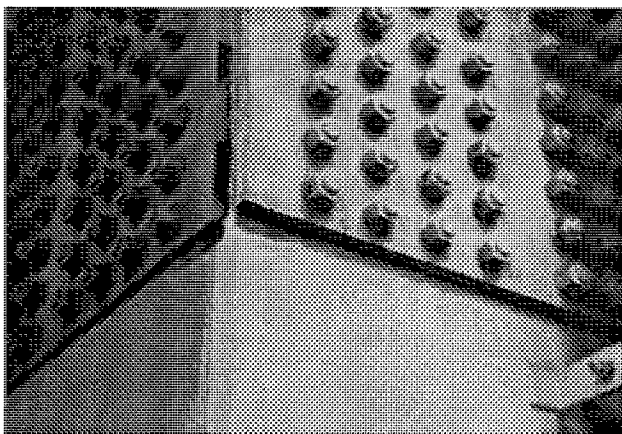


写真1 阪神大震災で生じた高力ボルト摩擦接合継手の滑り

一般の強度設計で要求される摩擦係数はその

継手強度を満足させるために、ある値(示方書では0.4)以上が要求されるのに対して、この場合は十分なエネルギー吸収能力を満足させながら、なおかつ橋脚本体に塑性を起こさせない事が要求される。すなわち、ある値より大きくなならない事が保証されなければならない。ところが、使用状態での程度の摩擦係数を持つのかと言うデータは見出せない。

しかし、この場合、ここでボルト列に対する応力分配が過大な摩擦係数の平均化に有利に働いてくる。

このボルト列は図3のようにモデル化されその結果は図中に示したようになる。

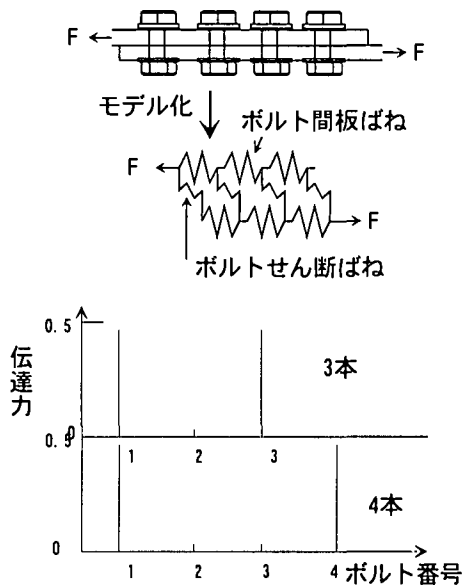


図3 ボルト列のモデル化とその結果

今簡単化のために応力方向に3本のボルトが締められている状態を考えてみる。一般にボルト列の内前後のボルトが大部分の応力を受け持ち、中間のボルトは遊んだ状態になる。そこで、ここでは前後のボルトのみが伝達力を受け持っているとする。設計摩擦係数流0.4に対して、実状では0.6になっていたとする。すると、伝達力をFとし、ボルト軸力をNとすると

$$F=2 \times 0.6N$$

となり、この値は設計時の耐力

$$F=3 \times 0.4N$$

と一致する。ボルト数が増加すると、設計時に期待した耐力よりさらに大きな力を前後のボルトが受け持つ事になる。そこで、設計時の橋脚の抵抗断面力を越える事なく継手の滑りが始まる。一般に滑りが始まればその衝撃で他のボルトも滑ると考えられる。高力ボルトの同摩擦係数は不明であるが、設計で期待している値より大きい事は

ない事が期待される。事実、写真1に見られるように一部の橋脚の高力ボルト摩擦接合継手に滑りが見られたが、材料の塑性化は観察されないのので、設計強度以下で滑りが生じたと見て良いだろう。

結局、設計時に考慮している滑り耐力を越えない事を期待しても良いように思われる。もしこういった面の不安があるならば接合面の処理等に対応する事になろう。となると、継手に要求されるのは変形能力と言う事になる。変形能力はボルト孔を小判型とすることで達成されよう。

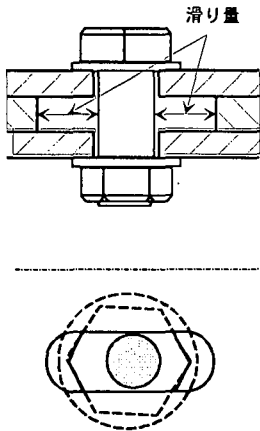


図4 小判型の孔を持った高力ボルト摩擦接合継手

4. 解析モデル

橋脚躯体に高力摩擦接合継手を持った橋脚および上部構造を1自由度の振動モデルで表わすと図5のようになる。

同モデルの振動方程式は、もし

$$F \leq m(\ddot{z} + \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) \leq F \quad (1)$$

ならば、弾性振動となり

$$-m(\ddot{z} + \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) - ky_2 = 0 \quad (2)$$

となる。もし、

$$F < m|(\ddot{z} + \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2)| \quad (3)$$

ならば、滑りを起こし、

$$-m(\ddot{z} + \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) \pm F = 0 \quad (4)$$

となる。ただし、

$$\dot{y}_1 < 0 \quad \pm \rightarrow +$$

$$\dot{y}_1 > 0 \quad \pm \rightarrow -$$

である。

ここで、

はそれぞれ、 $m, k, F, \ddot{z}, y_1, y_2$

上部構造の質量、質量位置に換算したばね定数、質量位置に換算した摩擦力であるがここでは一定値、質量位置に換算した継手継手位置における地震動加速度、摩擦滑りによる質量の水平変位、および、ばねの変形による質量の水平変位である。

以上の式をニューマークのペーター法により数値的に解析を行う事ができる。

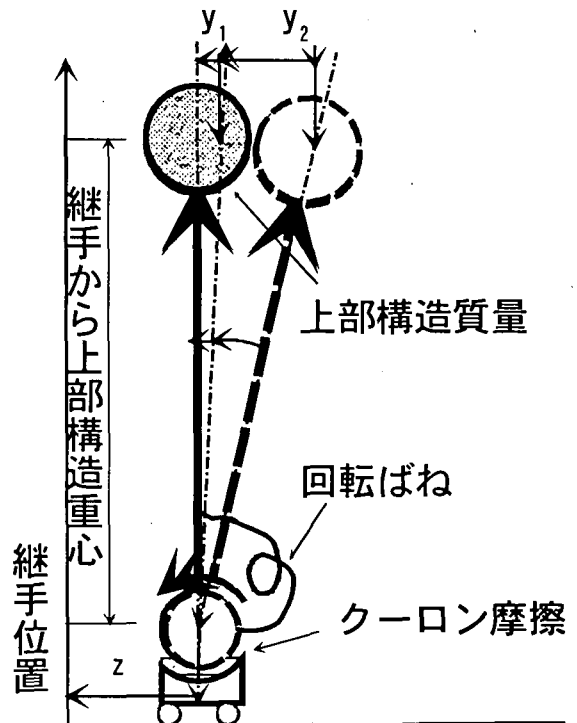


図5 高力ボルト摩擦接合継手を持った橋脚の振動モデル

5. 数値解析結果

地震入力として、道路橋示方書V耐震設計編。(時刻歴応答解析に用いる標準地震入力の例(平成8年))のタイプIおよびタイプIIの地震動を用いる。タイプIは(1978 KAIHOKU BRG, LG.)とし、タイプIIは(1995 JMA KOBE, N-S)の地震動を採用した。ここでは継手位置に座標の原点を取り、地震加速度はこの点に入力しているのので、地表とは異なる。しかし、その点での応答の増幅を考えればよいので、ここで論じようとしていることには本質的な影響を与えるものではない。

上部構造を含めた橋脚の固有振動数を0.3s、0.5sおよび0.8sにとり、振動方程式から分かるよ

うに減衰力は考慮しない。その計算結果の一例を
図 6 に示す。

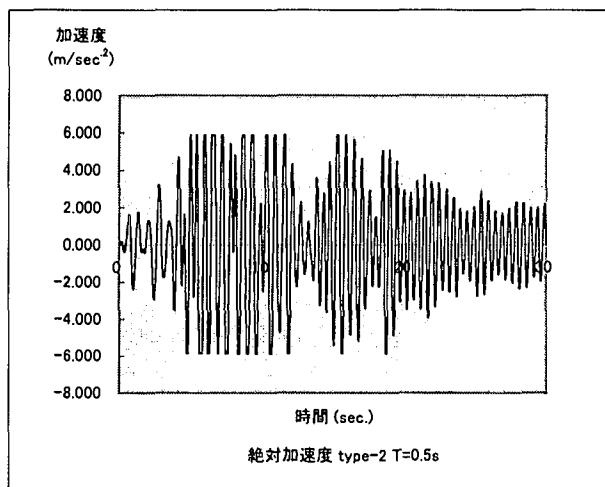


図 6(a) 上部構造等が受ける絶対加速度

採用した振動方程式からの当然の結果である
が、絶対加速度はそれによる慣性力が摩擦力以上
にならないので一定値以下になる。弾性変位 y_2 も
同様である。総体加速度も摩擦による減衰作用

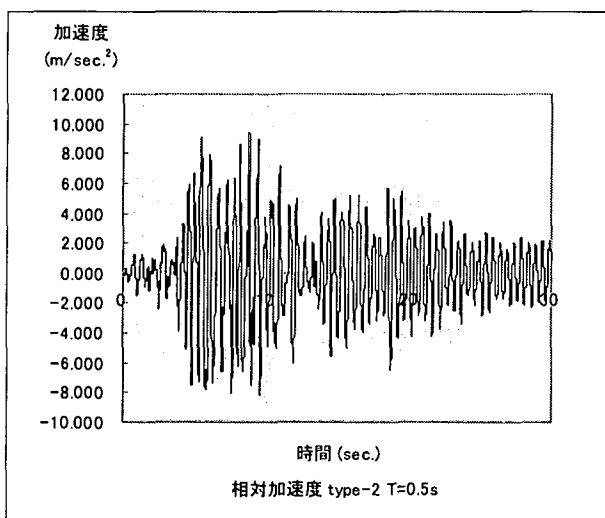


図 6(b) 上部構造等に生じる相対加速度

を受け、その倍率は 1 倍に近い。 y_1 は滑り変
位を表しているの、その最終の値は残留変位を
表している。固有周期がタイプ II の地震で
0.3s, 0.5s, 0.8s の場合 7.5cm, 20cm, 0.5cm であつた。
タイプ I の地震ではすべて 1 cm 以下であつた。

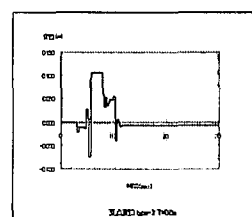
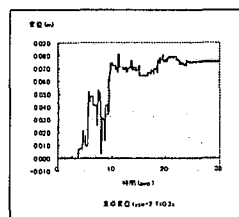
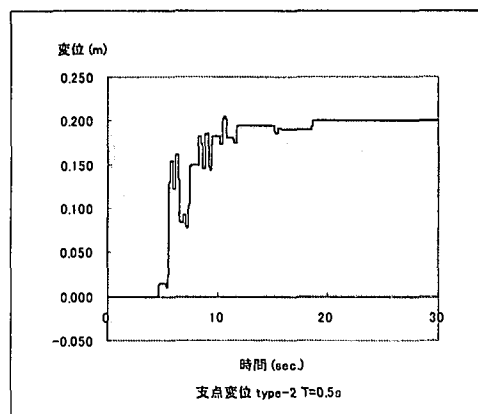


図 6(c) 時刻歴支点変位図

橋脚の継手位置からの高さを 10m とすると、
 $T=0.5s$ の計算例中一番大きい場合でも、これは 1
/50 の残留変形となる。上部構造からの慣性力も
これも当然摩擦力以上にはならない。

ここでは、高力摩擦ボルト継手の摩擦滑りの問
題を取り上げたが、支点到摩擦滑りを期待できる
支承板支承を用いた橋梁でも同様の効果が期待
できる。

6. まとめ

摩擦力の利用は次の点で耐震設計上有利な点
を有している。

1. 変位に対してエネルギー吸収能力を有する。
2. 継手部等に利用する事により、その摩擦力以
上の力を伝える事はない。
3. 材料の劣化を伴うような変形が生じない。

残留変形の補修が簡単である。

本論文では、鋼製橋脚に設けられる高力ボルト
摩擦接合の摩擦滑りを考慮した、地震動解析を行
い、その効果を数値的に検討したが、その効果が
高い事を示す事ができた。

(1998 年 8 月 17 日受付)

IMPROVEMENT OF SEISMIC CAPACITY OF STEEL STRUCTURES BY UTILIZING FRICTION

Shigeru KURANISHI

The high-tension-bolt friction joints will dissipate the dynamic energy of steel structures excited by earthquake and not transmit the inertial forces more than the frictional forces. This paper presents this utility of the friction joints by a numerical analysis.