

地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰り返しすべり実験

石原靖弘¹・小林剛²・皆田理³・西村宣男⁴

¹正会員 片山ストラテック株式会社 橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

E-mail:ishihara@katayama-st.co.jp

²正会員 工修 片山ストラテック株式会社 橋梁設計部 (同 上)

³正会員 工博 広島工業大学教授 工学部 建設工学科 (〒731-5143 広島市佐伯区三宅2-1-1)

⁴フェロー 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

高力ボルト摩擦接合はすべりを限界状態として設計されるが、すべり以後も破断までは相当な耐力を有している。先の阪神淡路大震災でもすべりを生じたボルト継手が散見され、その耐力評価方法ならびに補修方法が問題となった。本論文では、大地震により被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の力学特性を把握するため、地震直後に現地で行ったボルト軸力調査結果および補修方法を紹介するとともに、その後に行った高力ボルト継手試験体の繰り返しすべり試験について報告する。その結果、すべりを繰り返すことによるボルト軸力およびすべり係数の変化の状況ならびにすべり耐力の変動等を明らかにした。また、大地震時における高力ボルト摩擦接合のエネルギー吸収効果についても言及した。

Key Words : friction type bolted joints, cyclic slip experiment, bolt tension, shot blast, zinc rich paint, hot dip galvanized coatings, slip coefficient

1. はじめに

1995年1月17日未明に起きた兵庫県南部地震では橋梁構造物に大きな被害が生じたことは周知の通りである。特に高速道路や鉄道高架橋において鋼構造物にも種々の被害が生じ、鋼製橋脚では座屈や高力ボルト摩擦接合継手のすべり現象等が見受けられた¹⁾。

すべりが生じたと考えられる高力ボルト摩擦接合継手の一例を図-1に示す。添接板端部付近ならびにボルト近傍の塗装に数力所剥がれが確認できる。このような損傷は地震被害から言えば軽微なものであるが、現行の道路橋示方書²⁾ではすべりを終局限界状態としているため、すべりが生じた継手の挙動および保有耐力が明確でなく、補修方法に問題もある³⁾。すなわち継手耐力を決定付ける2大要素であ

るボルト軸力ならびにすべり係数とも、すべりを繰り返した後では変化しているはずであり、これらに着目した研究例は少ないのが現状である。

文献4)では、静的に一方方向の繰り返しすべり試験を行いボルト軸力ならびにすべり係数の変動を実験的に明らかにしている。また、最近ではすべり以

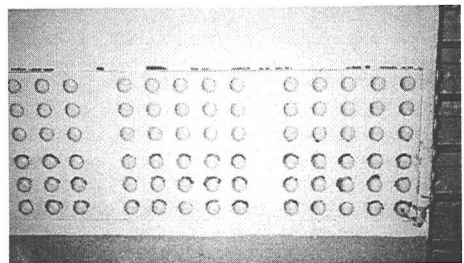


図-1 すべりが生じた橋脚継手

後の挙動を解析的に求めようとする試み⁹⁾も行われており、今後の研究の進展が期待される。しかし、これらは引張・圧縮が交互に作用する地震時の挙動とは若干異なるものと考えられる。

一方、建築分野においては、すべり荷重を上回る繰返し荷重を受けた高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力低下特性に関する研究⁹⁾や繰返し塑性履歴を受ける高力ボルト摩擦接合部の力学特性に関する研究⁷⁾が行われている。これらは大地震時におけるすべり以後の終局限界状態を想定した研究と考えられ、土木鋼構造物においても同様な研究が望まれるとともに設計法への反映が期待される。

そこで本論文では、地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の力学特性を明らかにすべく、大震災直後に行った現地調査結果を報告するとともに、大地震時を想定した繰返しすべり試験を行いボルト軸力およびすべり係数の変動状況や、すべり耐力特性を調査することとした。繰返しすべり試験はまず基礎的な特性を把握するため、高力ボルト1本を用いた単一ボルト試験体により行った。その後、単一ボルト試験体の試験結果確認のため、実構造により近い複数ボルト試験体を用いた繰返しすべり試験を行った。

2. 大地震による被害事例

(1) 概要

阪神淡路大震災直後に鋼製橋脚の被害調査を行ったところ、高力ボルト摩擦接合部において、継手部添接板近傍の塗装の剥離が数カ所確認できた。これは高力ボルト摩擦接合部が、すべり荷重を越える大きな地震力を受け、母材と添接板との相対的なずれにより生じたものと考えられる。このような継手では、高力ボルト摩擦接合における継手耐力の2大要素であるボルト軸力とすべり係数に変化が生じているはずであり、耐荷力の低下が懸念された。

そこで、すべりが生じた高力ボルト摩擦接合継手の残存耐力を確認するため、高力ボルトを抜き取り残存軸力を測定するとともに補修方法を検討した。

(2) ボルト軸力調査

a) 調査箇所

調査対象は新交通の駅舎を構成する鋼製橋脚である。被災した継手は数カ所あったが、全数のボルトを調査することは困難であるため、目視により被害が大きいと推測される継手を2カ所選定した。図-2

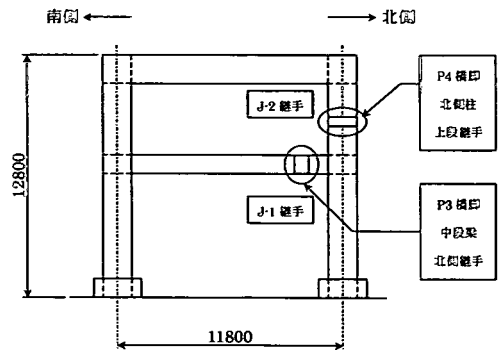
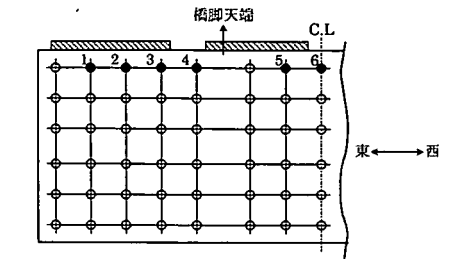
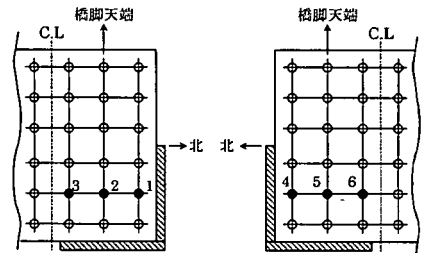


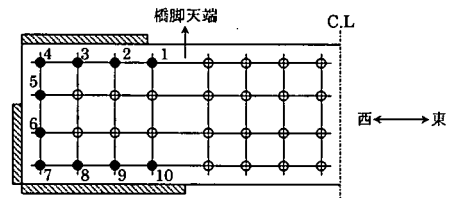
図-2 測定橋脚(P3・P4)の形状(単位: mm)



i) J-1 継手 (下フランジ)



ii) J-1 継手 (ウェブ)



iii) J-2 継手 (フランジ)

(注)斜線部は塗装の剥離が確認された箇所

図-3 各継手における測定ボルト位置

に示す J-1 (P3 橋脚・中間梁・北側継手) と J-2 (P4 橋脚・北側柱・上段継手) である。なお、J-1 と J-2 では橋脚が異なるが、橋脚形状は両者とも同一で上段梁には新交通の桁が、下段梁には歩行者通路の桁が載っている。

測定ボルトは作業の容易性かつ継手の被災状況を

表-1 残存ボルト軸力調査結果

測定箇所	ボルトサイズ	測定本数	残存ボルト軸力		軸力低下率	
			平均値 (kN)	変動係数 (%)	対設計軸力 (%)	対標準軸力 (%)
(i) J-1 (下フランジ)	M22×75	6	178	15.9	13.4	21.3
(ii) J-1 (ウェブ)	M22×70	6	178	11.2	13.4	21.3
(iii) J-2 (フランジ)	M22×65	10	143	5.3	30.1	36.5
合計		22	162	15.3	21.0	28.2

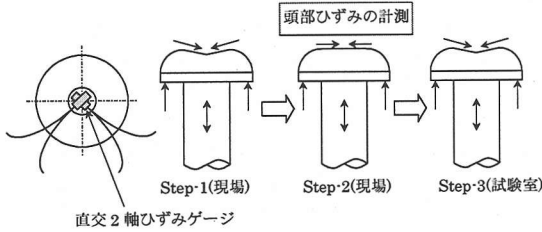


図-4 頭部ひずみゲージ法の概要

考慮して選定した。測定ボルトの継手内における位置を図-3 に示す (図中の●印が測定ボルト)。なお、本橋脚で使用されていた高力ボルトは等級 F10T、サイズ M22 のトルシア型高力ボルトであった。

b) 調査方法

ボルト軸力の調査方法は最も精度が高いと考えられるひずみゲージ法を採用した⁸⁾。ひずみゲージ法の概要を図-4に示す。まず、グラインダー等でボルト頭部の塗膜、メーカー刻印部を除去し、削りすぎに留意して平滑面に仕上げ、ボルト頭部をアセトンにて洗浄後、頭部中心に直交2軸ひずみゲージを貼り付ける。その後、ひずみ測定器にリード線を結線して、締め付け状態のボルト頭部のひずみ値を測定する(Step-1)。次にナットを緩め、軸力解放による頭部ひずみを測定する(Step-2)。取り外したボルトを試験室に持ち帰り、引張試験機により軸力とひずみ量の関係を測定し、現地でのボルト軸力に換算して推定する(Step-3)。

c) 調査結果

残存ボルト軸力の測定結果を表-1 および図-5 に示す。本橋脚で使用されている高力ボルトの設計軸力は 205kN、標準軸力(締め付け軸力)は 226kN である。

今回の測定結果を設計軸力と比較すれば、J-1 継手で約 13%、J-2 継手で約 30%低下しているという結果となった。また、標準軸力と比較すれば J-1 継手で約 21%、J-2 継手で約 37%の低下となる。従って、今回の測定結果からは J-2 継手の被害が大きかったものと推定できる。実際、J-2 継手近傍では橋脚の座屈現象も見受けられた。

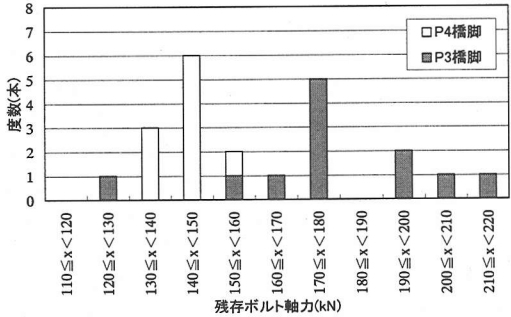


図-5 各継手における測定ボルト軸力

高力ボルトは施工時に軸力を導入してからリラクセーション等により軸力低下することが知られている。しかし、その量は通常 10%程度といわれており本橋脚では地震動による繰り返し荷重を受けて、ボルト軸力が低下した可能性がある。

(3) 補修事例と今後の課題

高力ボルト摩擦接合のすべり耐力はボルト軸力とすべり係数の積で表されるが、上記に示す調査検討の結果、ボルト軸力が低下していることから本橋脚継手部の耐力は設計値より低下していることが懸念された。そこで下記のように補修要領を検討した。

現地測定したボルト軸力の平均値は、ばらつきがあるものの設計値より 10~30%程度低下しており、最小値は 128kN、最大値は 214kN であった。軸力を向上させる手段として、ボルトを取り替える方法と現状のボルトを増し締めする方法が考えられるが施工性の問題から、ここでは後者の方法を用いるものとした。増し締めはナット回転角法によるものとし、キャリブレーション結果から 100kN 程度の追加軸力導入を目標に回転角として $\theta = 60^\circ$ を選定した。

文献 4)によれば、すべり係数については、被災した継手が何回すべっているかにより値が異なるが、当初の値に比べて 20~30%低下している可能性がある。ただし、すべり係数は通常、設計値 0.4 を大幅に上回ると考えられ、別途行った実験結果³⁾からもわかるように設計値 0.4 と比較して非常に高い。従って、当初の値より低下しているものの、設計値程

度は確保されているものと考えて、特に対策は講じなかった。なお、実際に添接板を取り替えるためにはボルトを全て取り外す必要があり、応急的に補修を行うことは不可能であった。

結果的にすべり耐力としては、すべり係数が低下しているものの、ボルト軸力は増し締めにより設計値以上に大きくなっているため、当初の耐力は確保しているものと考えた。ただし、大地震力を繰り返し受けた継手耐力の定量的な評価という面では課題が残った。そこで、後述する繰り返しすべり試験を行い、定量的な評価を試みた。

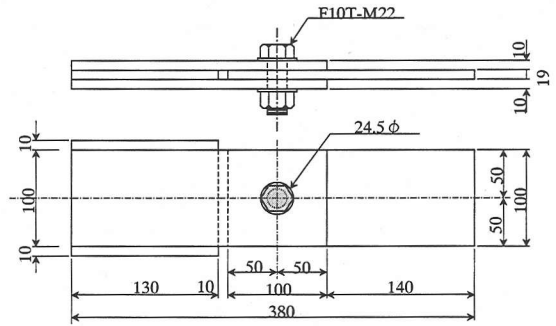


図-6 試験体の概要(単位: mm)

3. 単一ボルト試験体による繰り返しすべり試験

(1) 実験概要

a) 試験体の形状寸法

繰り返しすべり特性の基礎データを得るため、まず高力ボルト1本を用いた単一ボルト試験体による繰り返しすべり試験を行った。本実験で使用した試験体を図-6に示す。試験体のパラメータとして母材の材質および摩擦面の表面処理方法を選定し試験体の材質はSS400とSM490Yの2種類、試験体の表面処理としてはショットブラスト(設計粗さS70)(Aシリーズ)、無機ジンクリッチペイント(設計塗膜厚75μ)(Bシリーズ)、溶融亜鉛メッキ(HDZ55)(Cシリーズ)の3種類とした。

溶融亜鉛メッキ試験体の接合面に関してはメッキ後ショットブラスト処理を施した。使用ボルトはF10T-M22でありボルト孔の直径は実構造物に合わせ24.5mmとしている。ボルト軸力を測定するためボルト頭部に孔を開けゲージを埋め込んだ。導入した軸力は設計軸力205kNの1割増の226kNである。

表-2に試験体の諸元を示す。参考までに材質ごとの各試験体のすべり強度・降伏強度比パラメータβを計算し表-3に示す。ここに、パラメータβを式(1)に示す。βの値より本試験体はすべり先行型で母材降伏の影響が少ない範囲にあるといえる。

$$\beta = \frac{N_{SL}}{N_{Yn}} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{SL} : \text{すべり強度の公称値} \\ N_{Yn} : \text{純断面降伏強度の公称値} \end{array} \right.$$

b) 载荷方法および測定項目

実験に用いた試験機は油圧サーボ型の50トン疲労

表-2 試験体の諸元

試験体名	表面処理	材質	試験体数
A1-1~A1-3	ショットブラスト	SS400	3
A2-1~A2-3		SM490Y	3
B1-1~B1-3	無機ジンクリッチペイント	SS400	3
B2-1~B2-3		SM490Y	3
C1-1~C1-3	溶融亜鉛メッキ	SS400	3
C2-1~C2-3		SM490Y	3

表-3 すべり強度・降伏強度比パラメータβ

材質	すべり強度 (kN)	降伏強度 (kN)	β
SS400	164.0	334.9	0.490
SM490Y	164.0	505.9	0.324

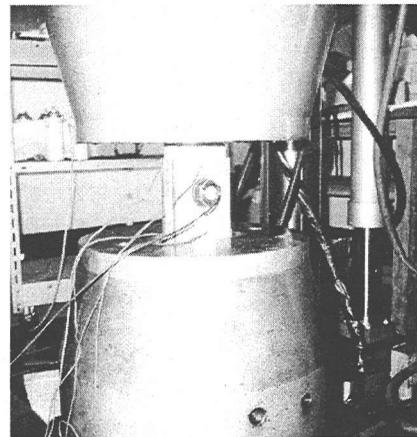


図-7 繰り返しすべり試験状況

試験機である。载荷方法は変位制御とし、試験体のボルト孔とボルト径の隙間量を考慮して、変位量が約±1.5mmになるまで引張・圧縮の両振を10サイクル繰り返しした。繰り返し速度は試験機の载荷能力より約0.5Hzとした。なお、繰り返し試験終了後、静的に単純引張試験を行い、すべり係数を求めた。繰

り返しすべり試験の状況を図-7に示す。

測定項目は繰返し試験，すべり試験ともに荷重と変位の関係，およびボルト軸力である。載荷荷重は疲労試験機の制御盤上の出力電圧値からキャリブレーションして求めた。また，試験体の変位は疲労試験機のチャック間変位を，ボルト軸力の測定に関してはボルト軸部中心に埋め込んだゲージにより測定したひずみ値をキャリブレーションして算出した。

従って，測定変位にはすべり変位のみでなく試験体構成部材の伸縮変位も含まれている。

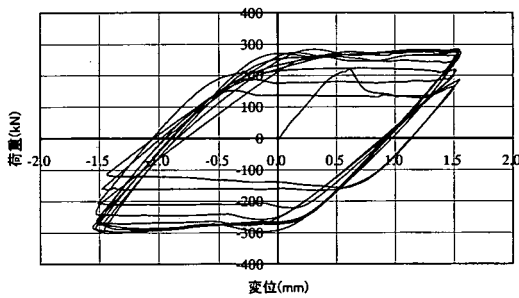
(2) 実験結果と考察

a) 荷重～変位履歴特性

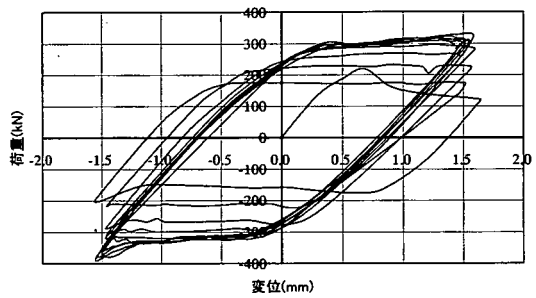
図-8 に繰返しすべり試験から得られた荷重～

変位履歴曲線（以下，ヒステリシスループという）の一例を示す。いずれの試験体も，すべり荷重を越えると変位のみが進行するバイリニア型の挙動を示す。ショットブラスト試験体(A シリーズ)では1回目のすべり以降，荷重が低下するため複雑な曲線となるが，2回目以降は徐々にすべり荷重が大きくなり数回目以降はすべり荷重がほぼ一定で同様な形状のヒステリシスループとなる。また，材質による相違は見受けられない。これは，後述するすべり面の観察結果からもわかるように摩擦面の表面粗さの変化によるものと考えられる。

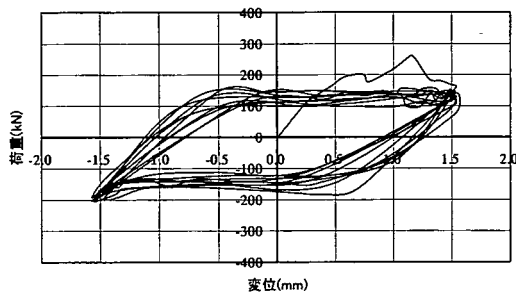
一方，無機ジンクリッチペイント試験体(B シリーズ)では，1回目のすべり以降，すべり荷重が上昇せず，逆に低下した値で安定する傾向が見受けられ



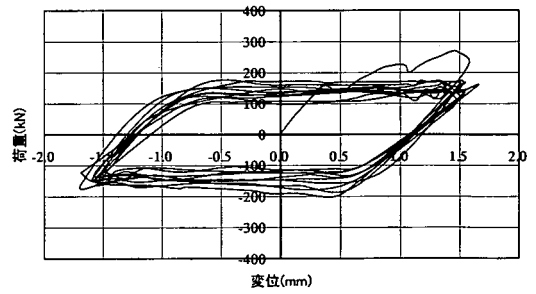
(A1) ショットブラスト(SS400)



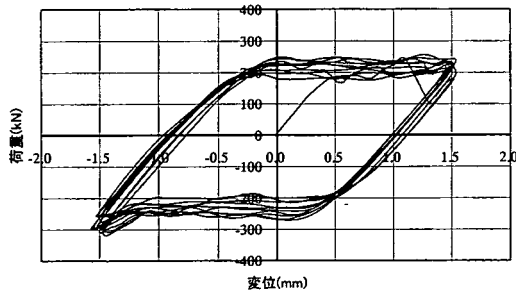
(A2) ショットブラスト(SM490Y)



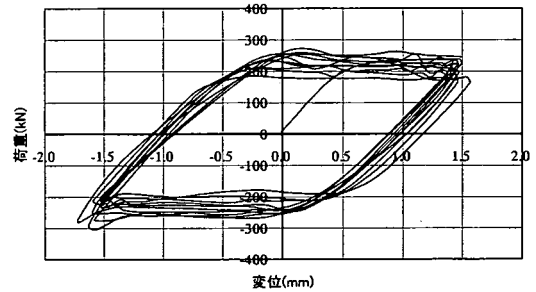
(B1) 無機ジンクリッチペイント(SS400)



(B2) 無機ジンクリッチペイント(SM490Y)



(C1) 溶融亜鉛メッキ(SS400)



(C2) 溶融亜鉛メッキ(SM490Y)

図-8 各試験体の荷重～変位履歴特性

る。また、亜鉛メッキ試験体(C シリーズ)では 1 回目のすべり荷重が明確ではないが、2 回目以降もすべり荷重は低下せず、ほぼ一定で安定したヒステリシスループとなる。

以上より表面処理方法の相違に着目するとヒステリシスループは特徴的な形状となっており、ショットブラスト試験体(A シリーズ)、亜鉛メッキ試験体(C シリーズ)では繰り返しによるすべり荷重の低下は見受けられないが、無機ジンクリッチペイント試験体(B シリーズ)では、すべり荷重が低下するという結果となった。

b) ボルト軸力の変化

図-9 に繰り返し回数(以下、サイクルという)とボルト軸力低下率の関係を示す。なお、ボルト軸力低下率は試験体 3 体の平均値である。ボルト軸力低下率 ϕ を式(2)に示す。

$$\phi = \frac{N_0 - N_i}{N_0} \times 100 \quad (2)$$

ϕ : ボルト軸力低下率
 N_0 : 初期ボルト軸力 (測定開始時)
 N_i : サイクル毎のボルト軸力(サイクル終了時)

同図より、ボルト軸力は繰り返しすべりによって当初の1サイクルで急激に低下するが、その後は徐々に低下し、ばらつきはあるものの20%程度の低下率になるものと思われる。またSS400材の軸力低下率がSM490Y材と比較して大きい傾向が見受けられた。これは前述した β と材質による摩耗の影響と考えられる。また、表面処理が無機ジンクリッチペイント(Bシリーズ)の場合、他の表面処理と比較して軸力低下が大きい。これは塗膜厚が繰り返しすべりにより減少するためと思われる。

c) すべり荷重およびすべり係数の変化

サイクル数毎のすべり荷重およびすべり係数を求めた。すべり係数 μ_i の算出式を式(3)に示す。

$$\mu_i = \frac{P_i}{2 \times N_i} \quad (3)$$

ここに、 i はサイクル数、 P は履歴曲線の引張側変位急変点におけるすべり荷重(図-12 の P_d)、 N はすべり荷重時のボルト軸力である。

図-10 にすべり荷重とサイクル数の関係を、図-11 にすべり係数とサイクル数の関係を示す。両図よりショットブラスト試験体(A シリーズ)は 2 サイクル目にはすべり耐力が若干低下するものの、3 サイクル目以降は徐々に上昇していくことがわかる。

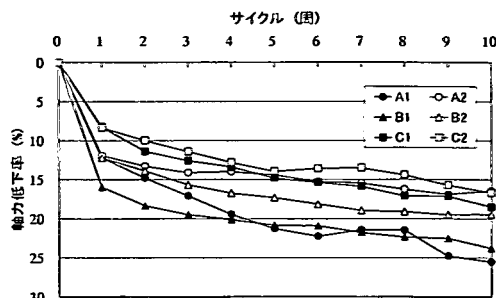


図-9 ボルト軸力低下率とサイクル数の関係

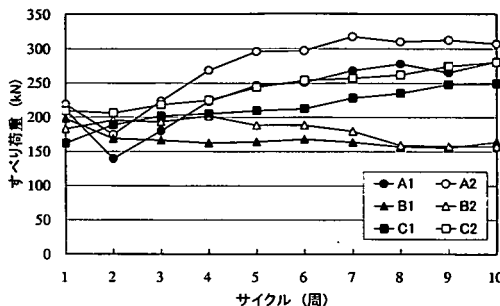


図-10 すべり荷重とサイクル数の関係

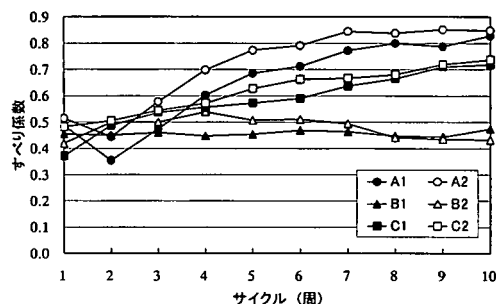


図-11 すべり係数とサイクル数の関係

一方、無機ジンクリッチペイント試験体(B シリーズ)はすべり係数の上昇が見られず、逆に若干低下する傾向が見受けられる。

以上より、表面処理がショットブラストならびに亜鉛メッキでは大地震により繰り返しすべりが生じた場合、初期にはすべり耐力が低下するが、数回繰り返された後では、すべり耐力が回復し、所定の耐力を保持できるものと考えられる。一方、無機ジンクリッチペイントでは繰り返しによるすべり耐力の上昇はなく、むしろ若干低下する傾向にあるため設計すべり耐力を保持できない可能性もある。

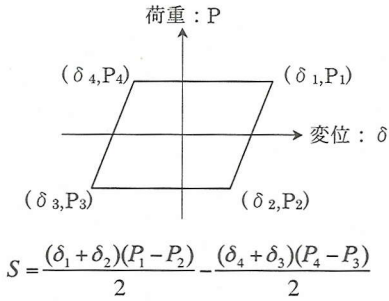


図-12 ループ面積の算出方法

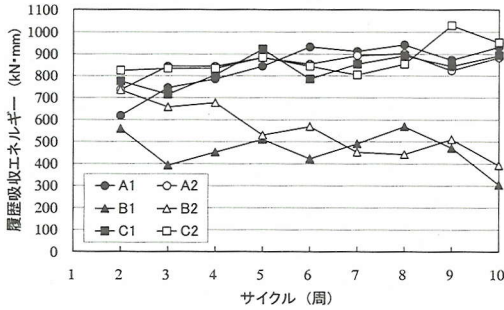


図-13 サイクル毎の履歴吸収エネルギー

d) 履歴吸収エネルギーの変化

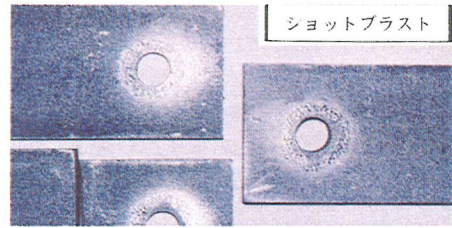
今回得られたヒステリシスループの形状がエネルギー吸収効果の高いバイリニア型であったため、地震エネルギーの吸収効果という面から検討を行った。

ヒステリシスループの描くループの面積を履歴吸収エネルギーとし、サイクル毎のエネルギー吸収量を概算で求めた(図-12参照)、図-13にサイクル毎のエネルギー吸収量を示す。

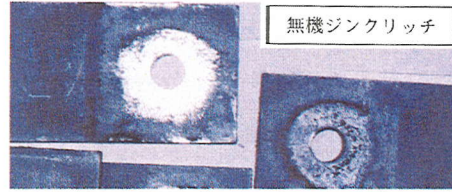
これはヒステリシスループの形状から推定できることでもあるが、ショットブラスト試験体(Aシリーズ)および亜鉛メッキ試験体(Cシリーズ)では、繰り返し回数の増加とともに履歴吸収エネルギー量が増加する傾向にある。一方、無機ジンクリッチペイント試験体(Bシリーズ)では繰り返しに伴い、吸収エネルギー量が減少する傾向にあり、10サイクル繰り返した後のAシリーズならびにCシリーズの半分以下になっていることがわかる。なお、ここに示した値は母材も含む継手全体のエネルギー吸収量である。

e) すべり面の観察結果

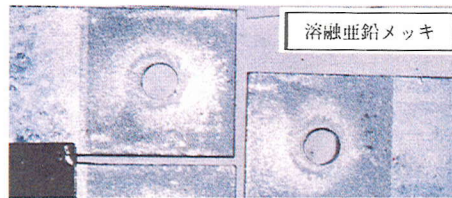
試験終了後、ボルトを取り外し、すべり面を観察した。すべり面の状況を図-14に示す。ショットブラスト試験体(Aシリーズ)では表面の凹凸が顕著で鋼材表面の圧着摩擦による掘り起こし現象が見られ、



(A) ショットブラスト



(B) 無機ジンクリッチペイント



(C) 亜鉛メッキ

図-14 各試験体のすべり面

表-4 すべり試験結果

試験体	すべり係数	平均	
ショットブラスト SS400	A1-1	0.65	0.67
	A1-2	0.65	
	A1-3	0.70	
ショットブラスト SM490Y	A2-1	0.71	0.62
	A2-2	0.75	
	A2-3	0.41	
無機ジンクリッチ ペイント SS400	B1-1	0.38	0.43
	B1-2	0.50	
	B1-3	0.42	
無機ジンクリッチ ペイント SM490Y	B2-1	0.40	0.46
	B2-2	0.59	
	B2-3	0.38	
亜鉛メッキ SS400	C1-1	0.68	0.63
	C1-2	0.59	
	C1-3	0.61	
亜鉛メッキ SM490Y	C2-1	0.56	0.52
	C2-2	0.44	
	C2-3	0.49	

表面が粗くなることにより、すべり係数が上昇したものと考えられる。また、亜鉛メッキ試験体(Cシリーズ)でも同様な傾向であるが、Aシリーズほど顕著ではない。一方、無機ジंकリッチペイント試験体(Bシリーズ)では、表面の掘り起こしも顕著でなく無機ジंकリッチペイントの塗料が鋼材表面に擦り込まれたような状態で、当然すべり耐力も低下したものと考えられる。

f) 単純引張試験結果

繰り返し载荷試験終了後、試験体を解体しボルトを締め直した後、静的に単純引張試験を行った。試験結果からすべり荷重をボルト軸力で除してすべり係数を求め、その結果を表-4に示す。同表より、無機ジंकリッチペイント試験体のすべり係数が若干低いものの、平均値としては設計値0.4をクリアしていることがわかる。

4. 複数ボルト試験体による繰り返しすべり試験

(1) 実験概要

単一ボルト試験体により基礎的な繰り返しすべり特性を把握できたが、実構造では2列以上のボルトを用いた複数ボルト継手が用いられる。従って、ボルトを2本用いた試験体により確認実験を行った。

実験に使用した試験体を図-15に示す。試験体の材質はSM490Yのみであり、高力ボルトは試験機の载荷能力の関係からF10T-M20としている。従って、ボルトの設計軸力は165kN、標準軸力(締め付け軸力)は181.5kNである。試験体の表面処理方法は単一ボルト試験体と同様であり、ショットブラスト試験体(Aタイプ)、無機ジंकリッチペイント試験体(Bタイプ)、

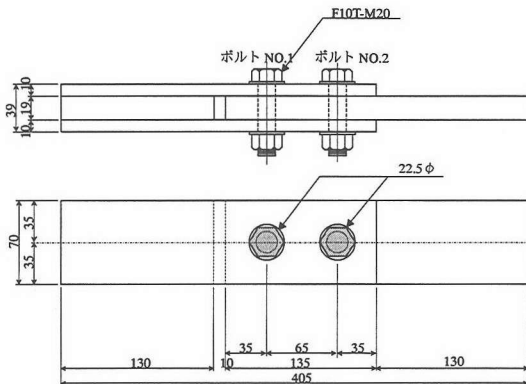
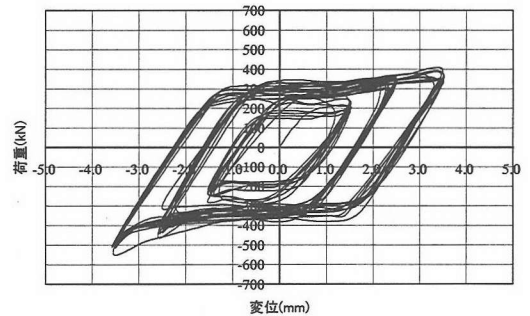
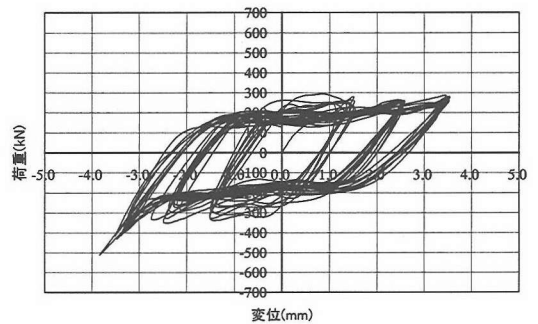


図-15 試験体の概要(単位: mm)

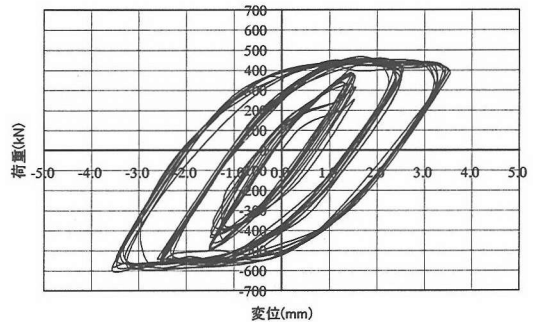
融亜鉛メッキ試験体(Cタイプ)を各1体ずつ製作した。载荷方法は変位制御とし、チャック間の変位量が約±1.5mm、±2.5mm、±3.5mmになるまで引張・圧縮の両振を各10サイクルずつ繰り返した。これは振幅の影響を確認することおよび孔壁にボルト軸部が接触し支圧状態となる影響を確認するためである。なお、測定項目および測定方法は単一ボルト試験体と全く同様である。ちなみに、本試験体の公称すべり強度 N_{SL} は264.0kN、公称降伏強度 N_{Yh} は317.0kNであり、パラメータ β は0.833と単一ボルト試験体に比べて若干高い。



(a) ショットブラスト (Aタイプ)



(b) 無機ジंकリッチペイント (Bタイプ)



(c) 溶融亜鉛メッキ (Cタイプ)

図-16 各試験体の荷重～変位履歴特性

(2) 試験結果と考察

a) 荷重～変位履歴特性

図-16 に各試験体のヒステリシスループを示す。ショットプラスト試験体(A タイプ)および無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)では、単一ボルト試験体と同様に、すべり荷重を越えると変位のみが進行するバイリニア型である。また無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)では、ショットプラスト試験体(A タイプ)に比べてすべり荷重が低いためループが小さい。なお、両試験体とも変位を±2.5mm、±3.5mm と増大させることにより、変位が進行せず荷重が増加する傾向が見受けられる。これはボルト軸部とボルト孔が支圧状態になっているためと考えられる。

一方、亜鉛メッキ試験体(C タイプ)では、ショットプラスト試験体(A タイプ)および無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)と比較して、明確なすべりが見られずやや紡鐘型に近い。この原因として下記が考えられる。すなわち、西村ら¹⁰⁾は、摩擦面の表面処理を変えた高力ボルト摩擦接合の疲労試験を実施し、鋼板表面の温度測定結果から、接触面における温度が数百度に達することを報告している。

また、Fisher&Struik¹¹⁾は、すべりを生じた継手の繰返し載荷試験を行っている。これによると、亜鉛メッキ処理を行った摩擦接合継手の疲労強度は、亜鉛メッキの熱固着現象により低下せず、破壊は総断面において生じることを報告している。すなわち、本試験によって得られた亜鉛メッキ皮膜継手の応力履歴特性は、高いボルト軸力の導入によって密着した接触面の亜鉛メッキ被膜が、繰返しすべり挙動の過程で摩擦発熱現象を起こし、それによって母材ならびに添接板面の亜鉛メッキが固着し、継手のずれ変形を拘束したことによるものと推定される。

また、単一ボルト試験体に比べてすべり強度・母材降伏耐力比 β が1.0に近く母材降伏が先行したことも一因と考えられる。

b) ボルト軸力の変動

各試験体におけるサイクル毎のボルト軸力低下率を図-17 に示す。単一ボルト試験体と同様に10サイクル(変位±1.5mm)までは各ボルトともに約20%程度の軸力低下が見られるが、さらに20サイクル(変位±2.5mm)30サイクル(変位±3.5mm)と増大させることにより軸力低下率は大きくなり、最終的には約40%程度となった。また、2本のボルトを相对比较した場合、ショットプラスト試験体(A タイプ)および亜鉛メッキ試験体(C タイプ)では、外列(No.2)ボルトの軸力低下が内列(No.1)ボルトと較

べて大きく、30サイクル時における軸力低下の差はショットプラスト試験体(A タイプ)で約20%、亜鉛メッキ試験体(C タイプ)では約10%となった。これは外列ボルト近傍母材の局所的降伏の影響⁵⁾と考えられる。

一方、無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)では傾向が異なり、30サイクル時の外列ボルトと内列ボルトの軸力低下の差はほとんど無かった。

c) すべり荷重およびすべり係数の変化

単一ボルト試験体と同様、サイクル数毎のすべり荷重およびすべり係数を求めた。なお、亜鉛メッキ試験体(C タイプ)については明確なすべりが見られず、すべり荷重が特定できないため、除外している。

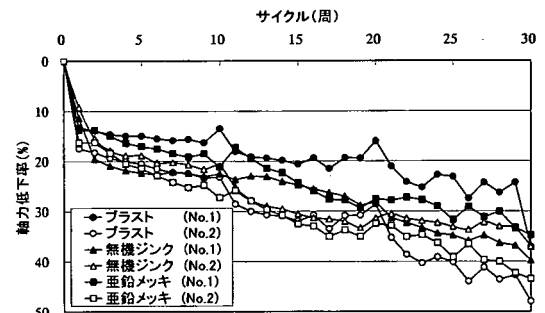


図-17 軸力低下率とサイクル数の関係

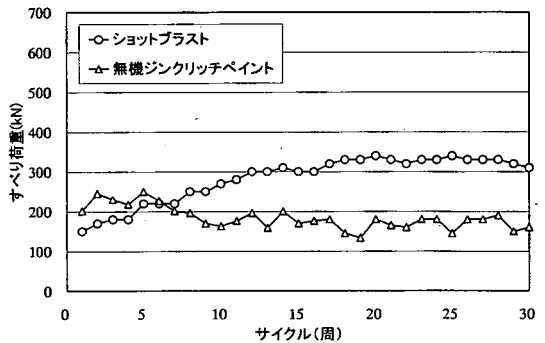


図-18 すべり荷重とサイクル数の関係

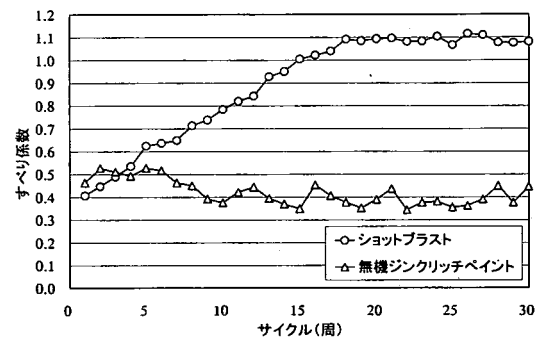


図-19 すべり係数とサイクル数の関係

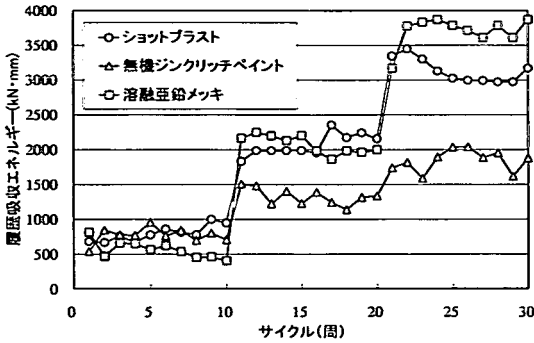


図-20 サイクル毎の履歴吸収エネルギー

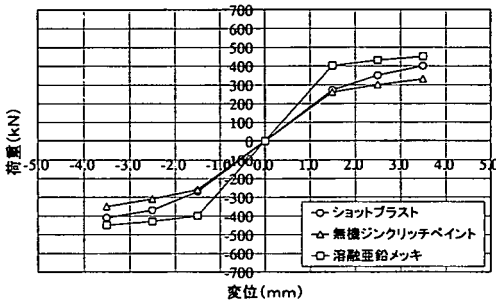


図-21 骨格曲線の概略図

図-18 にすべり荷重とサイクル数の関係を、図-19 にすべり係数とサイクル数の関係を示す。図-18 よりショットブラスト試験体(A タイプ)の場合、初期のすべり荷重は低いものの、サイクル数の増加とともに増加傾向にあり、15 サイクル以降は安定している。一方、無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)の場合、サイクル数の増加とともにすべり荷重は減少傾向にあるが、10 サイクル以降は傾向的に大きな変化がない。

一方、図-19 よりすべり係数については単一ボルト試験体と同様な傾向が見られた。すなわち、ショットブラスト試験体(A タイプ)はサイクル数の増加とともにすべり係数も増加するが、無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)では増加が見られず、0.4 付近で安定する傾向となった。

d) 履歴吸収エネルギーの変化

図-20 にサイクル毎のエネルギー吸収量を示す。当然のことながら変位が±2.5mm、±3.5mm と増大することにより、ループが大きくなることから、全ての試験体において吸収エネルギー量が増加するが無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)では増加量が少ない。各試験体の 30 サイクル時のエネルギー吸収量を比較すると、ショットブラスト試験体

(A タイプ)および亜鉛メッキ試験体(C タイプ)のエネルギー吸収量は、無機ジンクリッチペイント試験体(B タイプ)のそれと比べてそれぞれ約 1.5 倍および 2 倍程度となる。ただし、亜鉛メッキ試験体(C タイプ)では母材の塑性化によるひずみエネルギーの影響が大きく含まれていることに留意する必要がある。

図-21 は、図-16 に示したヒステリシスループのチップを結んで描いた繰返し荷重～変位曲線の概略図である。これは、耐震解析に用いられる骨格曲線に類するものである。剛性は異なるが、各タイプともに骨格曲線はバイリニア型となることが認められる。

5. おわりに

本論文では、兵庫県南部地震で被災した高力ボルト摩擦接合継手のボルト軸力調査結果を示すとともに、その補修方法を紹介し、問題点を提起した。また、大地震時を想定した繰返しすべり試験により繰返しすべりを生じた継手の特性を明らかにした。得られた結論を要約し下記に示す。

- ①地震を受けて被災した高力ボルト摩擦接合継手のボルト軸力を調査したところ、本調査例では設計軸力に対して 10～30%程度低下していることがわかった。
- ②基礎的な特性を調べるため単一ボルト試験体を用いた繰返しすべり試験を行った結果、荷重～変位履歴曲線(ヒステリシスループ)はいずれもすべり荷重を越えると変位のみが進行するバイリニア型であった。ただし、試験体は $\beta < 0.5$ と完全なすべり先行型である。なおショットブラスト試験体および熔融亜鉛メッキ試験体では、繰返しによる荷重の低下は見られず安定したループを描くことがわかったが、無機ジンクリッチペイント試験体では荷重の低下が見られ、ループが小さくなることがわかった。
- ③ボルト軸力は最初のすべり発生で大きく低下しその後は繰返しとともに徐々に大きくなるが、10回の繰返し後では初期軸力に対し 15～25%程度の低下率となった。これは、震災直後の実測結果とほぼ一致する値である。なお、母材材質の影響が若干見受けられ、SM490Y 材と比べ SS400 材の方が軸力低下率が大きい傾向にあった。
- ④すべり荷重およびすべり係数については表面処理の影響を受け、ショットブラスト試験体では 2 サ

イクル目に低下するものの、3サイクル目以降は上昇することがわかった。また亜鉛メッキ試験体ではサイクル初期の低下もなく、徐々に上昇する傾向が見られた。一方、無機ジンクリッチペイント試験体ではサイクル毎の上昇は見られず、若干低下する傾向が見られた。

- ⑤ヒステリシスループの面積から履歴吸収エネルギーを求め比較したところ、無機ジンクリッチペイント試験体では繰り返しの伴い吸収エネルギー量が減少する傾向にあるのに比べ、ショットブラストおよび亜鉛メッキ試験体では増大する傾向が見られた。
- ⑥試験終了後、すべり面を観察した結果、ショットブラスト試験体では鋼材表面が粗く、掘り起こし現象も見られた。一方、無機ジンクリッチペイント試験体では、塗料が鋼材表面に擦り込まれたような状態で、これらの表面性状の相違がすべり係数の相違に影響しているものと考えられる。
- ⑦すべり面観察後、再度ボルトを締め直し、静的すべり試験を行った。その結果、全試験体とも平均値としては、設計すべり係数0.4を上回っていたが、無機ジンクリッチペイント試験体のすべり係数が最も低かった。
- ⑧実際の継手形状に近い2本ボルト試験体を用いて($\beta=0.833$)同様な繰り返しすべり試験を行った。ショットブラスト試験体ならびに無機ジンクリッチペイント試験体では単一ボルト試験体と同様な傾向が見られたが、溶融亜鉛メッキ試験体では、繰り返しすべり挙動の過程で固着現象が生じ明確なすべりが見られなかった。
- ⑨ヒステリシスループのチップを結んで得られた荷重～変位曲線(骨格曲線)から、各タイプとも剛性は異なるが、ほぼバイリニア型となることが認められた。

本研究を行った結果、摩擦面の表面処理方法がショットブラストあるいは溶融亜鉛メッキの場合、すべりを繰り返すことによる吸収エネルギー量が大きく、またその量が低下しないため、一種のダンパー効果を保有しているものと考えられる。高力ボルト摩擦接合継手を鋼製橋脚のダンパー機能として評価しようとする研究¹²⁾も見受けられるので、今後はこの特性に着目した実験および解析を行いたいと考えている。そのためには高力ボルト摩擦接合継手要素の繰り返し荷重下における非線形挙動の定式化ならびにそのような継手要素を取り入れた橋脚全体の

非線形動的解析が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うに当たり、広島工業大学の村中昭典助手ならびに学生諸氏には実験およびデータとりまとめの際に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌一，1997.9.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(Ⅱ)鋼橋編，2002.3.
- 3) 山口史夫，石原靖弘，夏秋義弘，寺田能通，松尾昇：地震力を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，I-A194，1996.9.
- 4) 西村昭：高力ボルト摩擦接合のすべり耐力変動について，土木学会論文報告集，第187号，pp.37-47，1971.3.
- 5) 亀井義典，西村宣男：高力ボルト摩擦接合継手の主すべり以降の挙動，鋼構造年次論文報告集，Vol.8，pp.17-29，2001.9.
- 6) 沢田明樹：すべり荷重を上回る動的繰り返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力低下特性，日本建築学会論文報告集，第324号，pp.63-72，1983.2.
- 7) 辻岡静雄：ショットブラスト摩擦面を有する高力ボルト接合のすべり荷重と履歴特性，日本建築学会構造系論文集，第471号，pp.173-179，1995.5.
- 8) 西村昭，加藤藤吾，神田正孝，山崎信之，米谷真二：既設高力ボルトの各種非破壊検査の特質，橋梁と基礎，Vol.83，No.11，pp.26-33，1983.11.
- 9) 秋山寿行，西村宣男，亀井義典，池端文哉：高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態の区分，鋼構造年次論文報告集，Vol.3，pp.289-296，1995.11.
- 10) 西村昭，島田喜十郎，古賀太郎：高力ボルト継手の摩擦面の処理状態が疲労強度に及ぼす影響，土木学会関西支部年次学術講演概要集，I-10-1～4，1971.
- 11) Fisher, J.W. and Struik, J.H.A.: Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, pp.206-208, John Wiley & Sons, 1987.
- 12) 倉西茂：摩擦すべりを利用した構造物の耐震性の向上，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.173-176，1998.

(2002. 11. 14 受付)

CHARACTERISTIC INVESTIGATION AND CYCLIC SLIP EXPERIMENT OF HSFG BOLTED JOINTS WHICH WERE DAMAGED BY EARTHQUAKE

Yasuhiro ISHIHARA, Go KOBAYASHI, Osamu MINADA and Nobuo NISHIMURA

The major slip of high-strength friction grip(HSFG) bolted joint is the limit state on design, but it has more load carrying capacity after the slipping. When the South Hyogo earthquake was occurred in 1995, there were many bolted joints at which slip phenomena appeared, then the problem was the way of evaluating their load carrying capacity and repairing. This paper shows the characteristic investigation and the cyclic slip experiment of HSFG bolted joints that were damaged by earthquake. As results, the change of bolt tension, slip coefficient and slip load carrying capacity by cyclic slip tests are showed and the effect of energy absorption of HSFG bolted joints in big earthquake is discussed.