

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560476
 研究課題名（和文） 超高速衝撃荷重を受ける高力ボルト摩擦接合の保有性能評価に関する基礎的研究
 研究課題名（英文） Fundamental Study on Performance-Based Evaluation of HSFG Bolted Joint under Super-High-Speed Impact Load
 研究代表者
 亀井 義典（KAMEI YOSHINORI）
 大阪大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：80224690

研究成果の概要：地震による構造物の被害は最大加速度よりも最大速度と良い相関があることが従来から言われており、最大速度 100cm/s 以上が大被害地震の目安との報告もある。しかし、この領域の載荷速度は従来の構造実験では再現することが困難だとされていた。本課題では、最高載荷速度 120cm/s、最大荷重 2000kN の超高速衝撃構造性能評価システムを用いて高力ボルト摩擦接合の引張試験を実施した。その結果、載荷速度が摩擦接合の各種限界状態や変形性能に及ぼす影響について明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学，超高速引張試験，高力ボルト，摩擦接合，保有性能，限界状態設計

1. 研究開始当初の背景

阪神大震災や新潟県中越地震に代表される直下型地震や地震時の桁間衝突などのように、構造物を崩壊に至らしめる外力のほとんどが動的外力である。しかしながらこれまでの構造物の安全性評価は、静的外力による実験結果を基本に組み立てられており、動的外力の影響はほとんど考慮されていない。

鋼構造物が動的外力を受けた場合、力学的に最も厳しい部分は接合部である。よって、接合部の動的外力下での破壊挙動を把握することは、鋼構造物全体の安全性を評価することになるといっても過言ではない。

動的外力が接合部の破壊挙動に与える影

響については、溶接接合部を対象に研究分担者がパラメトリックな実験を行っているが、溶接と並び代表的な接合形式であるボルト接合においては全く検討がなされていない。しかし、阪神大震災時にはボルト摩擦接合部において、動的外力による母材-連結板間のすべり現象や純断面における破断が確認されている。さらに、現在の設計ではすべり現象を終局限界状態と考えており、すべりが生じた継手の挙動および保有性能が明確ではない。継手耐力を決定付ける主要要因であるボルト軸力やすべり係数についても地震による繰返しすべり発生後には変化していることも考えられ、また母材や連結板について

は過大な外力により繰返し塑性履歴を被っていることも考えられる。このように、接合部は部材を繋げ構造物を形成するためには不可欠であり、非常に重要な部位であるにも拘らず地震被害を被る摩擦接合部については、継手を構成する高力ボルトやボルト孔、摩擦面の存在など複雑な構造詳細を有していることもあり、動的外力の影響に関する既往の研究成果は殆ど報告されていない。また、衝撃的動的外力を扱った研究にいたっては皆無である。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、これまで実施が困難であったボルト接合部の超高速衝撃引張り試験をパラメトリックに行い、载荷速度がボルト接合部のすべり係数および破壊特性に与える影響を明らかにすることにある。これらの関係を定量的に把握することにより、衝撃的外力を受けるボルト接合部の保有性能を明らかにし、安全性評価のための基礎資料を提供する。

3. 研究の方法

パラメトリックな実験を行うためには、試験体が小型で安価なモデル実験を行うことが考えられる。小型モデル試験体であれば、最大荷重 10kN 程度の汎用高速引張り試験機（例えば島津製ハイドロショット HITS-T10）にかければ評価が可能である。しかしボルト接合部は、ボルト孔配置、締付けトルク、支圧機構等から単純にスケールダウンした小型試験体では評価することができない。よって、1,000kN 以上の能力を持つ高速引張り試験機が必要となる。また、新潟県中越地震で 1,000gal 以上の加速度が観測されたように、数 10%/sec を上回る超高歪速度が地震により構造物に作用しても何らおかしくはない。このように、ボルト接合部の超高歪速度下での挙動をパラメトリックに実験するには、超高速と高荷重を併せ持つ、特殊な超高速引張り試験機が必要となる。そこで、本研究では超高速と高荷重を併せ持った“超高速衝撃構造的評価システム”を実験に用いる。本システムの超高速アクチュエータは、最大速度 120cm/sec、最大荷重 2,000kN の世界最高レベルの性能を有しており、実際のボルト継手を 350,000kN/sec 以上の衝撃引張力で载荷することができる数少ない試験機である。

図-1 に供試体の概要を示す。供試体の設計にはすべり強度・母材純断面降伏強度比 β 、連結板・母材降伏強度比 γ を設計パラメータとする。基準モデル typeA の諸元を土木学会「高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」の標準試験体に準拠し、板厚を変化させることにより β 値を typeA : 0.7, typeB : 0.8 に設定したすべり先行型、お

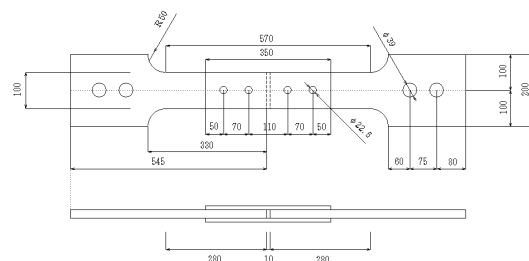


図-1 供試体概要

よび typeC : 1.1, typeD : 1.2 に設定した降伏先行型継手の計 4 タイプについて実験を行った。 γ 値は 1.1 に統一している。鋼種 SS400, 高力ボルト F10TM20 とし、ボルト孔や摩擦面の処理状態などは道路橋示方書の制作規定に準拠した。

载荷ケースについては、case1 : 0.001 cm/s, case2 : 10 cm/s, case3 : 120 cm/s とし、type との組み合わせにより供試体を A-1 のように表記する。実験は各ケース 3 体の計 36 体について実施した。

予備試験として材料試験および高力ボルトの引張り試験を実施し、各供試体の限界状態を予め予測した。

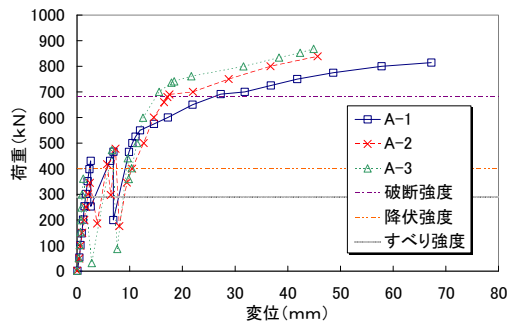
本実験は、超高速アクチュエータを変位制御で動作させることにより一定载荷速度で実施し、継手システム全体の耐力の低下または母材、連結板、高力ボルトのいずれかが破断するまで载荷を継続する。なお、測定項目は以下の通りである。

- ①荷重
- ②高力ボルトの軸力
- ③母材および連結板のひずみ
- ④継手供試体の変位
- ⑤母材と連結板の相対変位量（ずれ量）
- ⑥すべり耐力および最大耐力

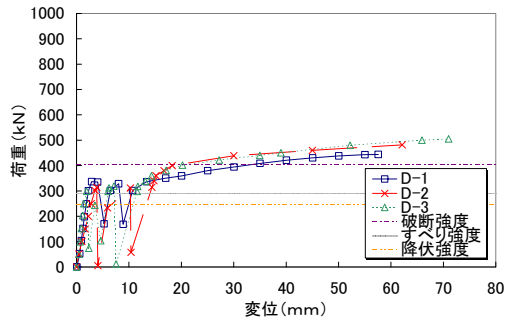
4. 研究成果

(1) 実験結果

図-2 に typeA および D の荷重－変位関係を示す。縦軸は荷重、横軸は変位を表す。図中には各供試体のすべり強度、降伏強度、破断強度の設計値を図示している。载荷速度 0.001cm/s の静的载荷において、すべり先行型（type A）は母材や連結板などの鋼板が健全な状態（弾性状態）のまま 420～440kN あたりで主すべりにより線形限界に達する。一方、降伏先行型（type D）では、350～360kN あたりで母材降伏の影響で荷重－変位関係の線形性がくずれ始め、その後主すべりが発生する。超高速で载荷した場合、すべり先行型（type A）では 350～420kN の範囲で、降伏先行型（type D）では 300～340kN の範囲で主すべりが発生している。なお、降伏先行型（type D）の超高速载荷時においてはいずれの供試体も線形限界に降伏現象が関与することはない。主すべり発生後は高力ボルトとボルト孔が支圧状態に達し、母材および連結板の塑性化にともない変位が著しく増加し、その後



(a) typeA



(b) typeD

図-2 荷重-変位関係

typeA は高力ボルトの破断, typeD は外側ボルト列における母材破断で終局限界に達する。終局時の変位を各々のタイプおよび载荷速度で比較すると, すべり先行型 (type A) では高速载荷になるほど破断時の変位は減少するが, 降伏先行型 (type D) では高速になるにつれて破断時の変位が増加する傾向が認められる。

図-3 にすべり先行型 (type A) および降伏先行型 (type C) の荷重-ボルト軸力関係を示す。縦軸は荷重, 横軸はボルト軸力を表している。凡例の B1, B4 が外側列, B2, B3 が内側ボルト列を表す。高力ボルトは全载荷ケースで主すべり発生後は支圧状態に至る。すべり先行型 (type A) では, 载荷開始時の初期ボルト軸力に対して主すべり発生時のボルト軸力は, 静的载荷で 10%程度, 超高速载荷で 5%程度低下しており, 载荷速度が大きくなるにつれてボルト軸力の減少量は小さくなる事が判る。また, すべり先行型 (type A) では各ボルト列間でボルト軸力の減少量に大きなばらつきは確認されなかった。一方, 降伏先行型 (type C) では, 初期ボルト軸力に対するすべり発生時のボルト軸力は, 静的载荷の外側ボルト列で 40~50%程度, 10cm/s の高速载荷では 20~30%程度, 120cm/s の超高速载荷では 10~15%程度の軸力減少が生じており, 降伏先行型 (type C) においても载荷速度が大きくなるにつれてボルト軸力の減少量は小さくなる傾向が認められる。各供試体における各ボルト列間の

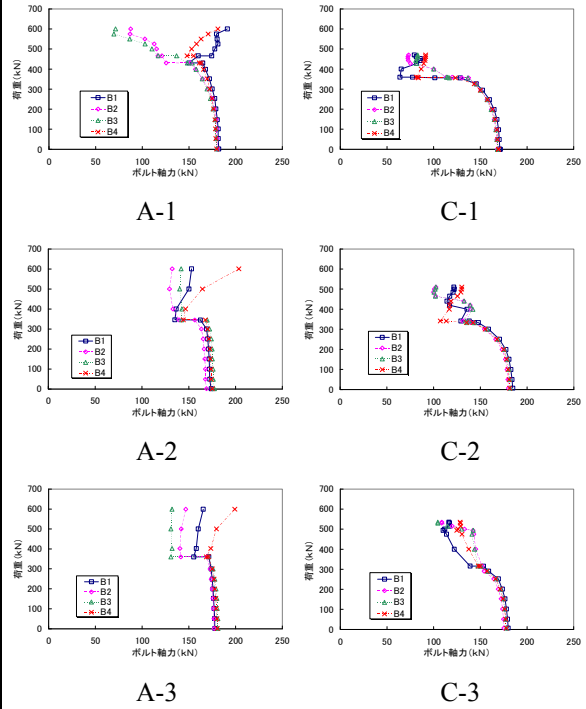


図-3 荷重-ボルト軸力関係

軸力減少量のばらつきについては载荷速度が大きくなるほど小さくなる。主すべり発生時までのボルト軸力の減少は鋼板のポアソン効果による板厚減少に起因するところが多いが, 降伏先行型 (type C) を例にとると, 静的载荷時 (C-1) よりも超高速载荷時 (C-3) で速度効果による降伏点の上昇が認められるため, 主すべり発生時の荷重レベルにおいて塑性化の影響が緩和され, 軸力減少量が小さくなったものと考えられる。

図-4 にすべり先行型 (type A) および降伏先行型 (type C) の荷重-母材ひずみ関係を示す。荷重-母材ひずみ関係の縦軸は荷重, 横軸は母材ひずみを表している。凡例の F1, F4 は外側ボルト列, F2, F3 は内側列の母材コバ面のひずみを表す。ひずみが弾性状態の範囲では母材外側列および内側列のひずみは同程度で線形的に変化するが, 荷重が降伏点付近に達すると荷重分担の大きい外側ボルト列 (F1, F4) 母材純断面の降伏が先行し, 塑性ひずみが進展する。継手中心に近い内側ボルト列では連結板による荷重分担が大きい母材 (F2, F3) のひずみは小さい。

载荷速度が与える影響について考察すると, 両タイプとも载荷速度が大きくなるにつれて降伏点が増していることが判る。そのため降伏先行型 (type C) では, 高速载荷において線形限界がすべり先行型へと移行する。なお, すべり先行型 (type A) では载荷速度によって線形限界状態が移行することはなく, 主すべり発生時において全ての計測箇所

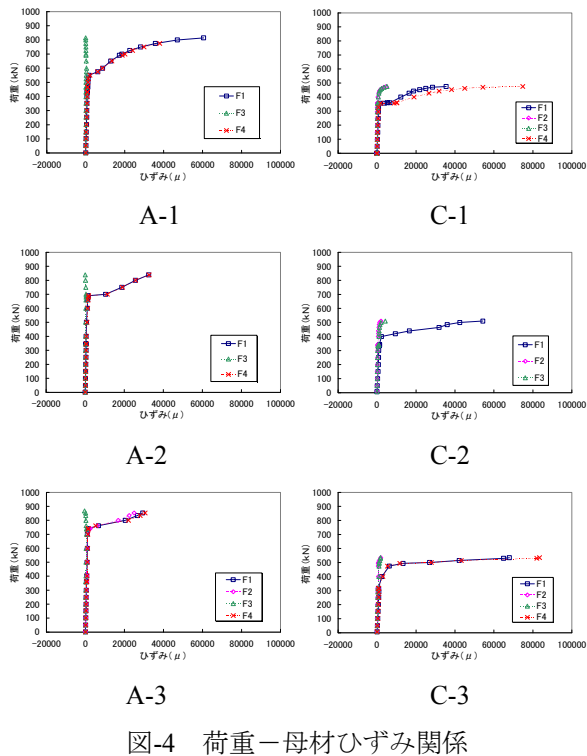


図-4 荷重-母材ひずみ関係

ひずみの進展は荷重速度が大きくなる程、すべり先行型 (typeA) で減少し、降伏先行型 (typeC) で大きくなる傾向が認められる。typeA では終局限界状態が高力ボルトの破断であったため、降伏点が上昇した高速荷重において終局時のひずみ量が小さくなる結果を得た。

(2) 荷重速度が継手限界状態に及ぼす影響

図-5 に荷重速度とすべり耐力の関係を示す。縦軸はすべり耐力、横軸は荷重速度を対数表記したもので表している。すべり耐力に関しては、typeB では著しい低下は認められなかったが、荷重速度が大きくなるほど減少する傾向にあり、各タイプで静的荷重 (0.001cm/s) と超高速荷重 (120cm/s) を比較するとすべり耐力の低下率は、すべり先行型の typeA で 20%、typeB で 1%、降伏先行型の typeC で 13%、typeD で 12%程である。すべり耐力を決定づける主な要因は、高力ボ

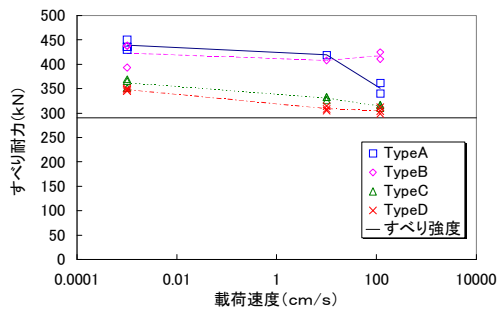


図-5 荷重速度-すべり耐力関係

供伏体	荷重速度 (cm/s)	すべり耐力 (kN)	すべり係数	供伏体	荷重速度 (cm/s)	すべり耐力 (kN)	すべり係数		
type A	0.001	A-1-1	430.6	0.59	type C	0.001	C-1-1	351.6	0.48
		A-1-2	435.7	0.60			C-1-2	369.2	0.51
		A-1-3	450.9	0.62			C-1-3	365.5	0.50
	10	A-2-1	419.1	0.58		10	C-2-1	326.9	0.45
		A-2-2					C-2-2	332.8	0.46
		A-2-3					C-2-3	333.1	0.46
	120	A-3-1	361.4	0.50		120	C-3-1	310.1	0.43
		A-3-2	340.3	0.47			C-3-2	315.7	0.43
		A-3-3					C-3-3	316.7	0.44
type B	0.001	B-1-1	438.1	0.60	type D	0.001	D-1-1	351.1	0.48
		B-1-2	437.5	0.60			D-1-2	348.2	0.48
		B-1-3	393.2	0.54			D-1-3	345.2	0.48
	10	B-2-1				10	D-2-1	308.2	0.42
		B-2-2	407.8	0.56			D-2-2	314.4	0.43
		B-2-3					D-2-3	304.8	0.42
	120	B-3-1	410.9	0.57		120	D-3-1	298.6	0.41
		B-3-2	424.7	0.59			D-3-2	304.2	0.42
		B-3-3					D-3-3	312.2	0.43

表-2 すべり係数

ルト軸力と摩擦面の状況であるが、図-3 より高速荷重において軸力抜けが抑制されることから判断すると、高歪速度により摩擦面での力の伝達が滞り有効摩擦面積が変化していることが考えられる。

表-2 に初期ボルト軸力とすべり耐力から算出したすべり係数を示す。高速荷重によりすべり耐力は減少するものの、全てのケースで道路橋示方書が規定するすべり係数の公称値を満足していることが判る。

図-6 に荷重速度と降伏耐力の関係を示す。なお、降伏耐力については高速荷重においてその挙動から明確に判断できない事が多いため、母材外側、連結板内側コバ面に貼付したひずみゲージから 0.2%耐力で評価した値を降伏耐力と定義する。荷重速度-降伏耐力関係の縦軸は降伏耐力、横軸は荷重速度を対数表記した値である。降伏耐力は荷重速度が大きくなると増加する傾向にある。各タイプで静的荷重 (0.001cm/s) と超高速荷重 (120cm/s) を比較すると、降伏耐力の増加率は、すべり先行型の type A で 45%、type B で 46%、降伏先行型の type C で 29%、type D で 26%程度である。高速荷重において耐力の上昇が期待できることから、静的な実験により規定した道路橋示方書の有効断面積の割り増し係数 1.1 は十分に満足している。材料的には SM490B を対象に、引張速度 120cm/s において静的荷重に比べて降伏応力が 50%程度上昇するという報告があるが、すべり先行型の type A および type B は、この上昇率に対

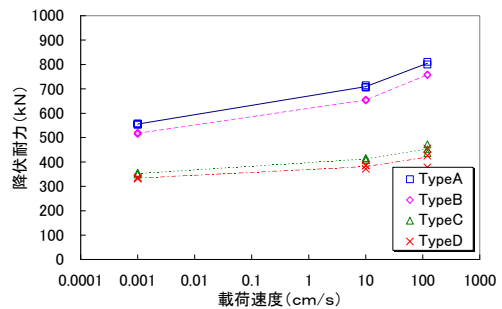


図-6 荷重速度-降伏耐力関係

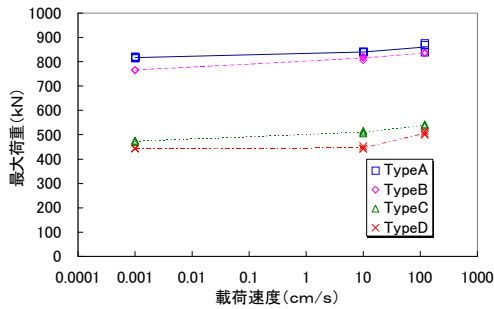


図-7 载荷速度－破断耐力関係

して近い値となっている。しかし、同報告においても超高速载荷時には明確な降伏点が判断できないものが多いとの指摘があり、降伏応力については確かなものではないとしている。

図-7 に载荷速度と破断耐力の関係を示す。縦軸は破断耐力、横軸は载荷速度を対数表記して表している。終局状態は、すべり先行型の typeA, B が高力ボルトの破断、降伏先行型の typeC, D が外側ボルト列における母材純断面の破断である。破断耐力は破壊形態によらず载荷速度が大きくなると増加する傾向にある。各タイプで静的载荷 (0.001cm/s) と超高速载荷 (120cm/s) を比較すると、破断耐力の増加率は、すべり先行型の type A で 5%, type B で 10%, 降伏先行型の type C および type D で 15%程度である。材料的には、静的载荷に対して引張速度 120cm/s の超高速载荷で引張強さが 15~20%程度上昇するとの報告があるが、母材破断により終局状態に達した type C および type D はそれに近い値となった。

図-8 に载荷速度と変位の関係を、図-9 に载荷速度と吸収エネルギーの関係を示す。変位、吸収エネルギーともに最大耐力時で評価しており、吸収エネルギーについては各タイプ、载荷ケースごとに平均化した値で図示している。载荷速度－変位関係の縦軸は最大耐力時の変位、载荷速度－吸収エネルギー関係の縦軸は吸収エネルギーを表し、横軸は载荷速度を対数表記した値で表している。最大耐力時変位、吸収エネルギーともに载荷速度が大きくなるとすべり先行型 (typeA, B) で減少し、降伏先行型 (typeC, D) で増加する傾向が認められる。最大耐力時変位の変化率は、各タイプで静的载荷 (0.001cm/s) と超高速载荷 (120cm/s) を比較すると、すべり先行型の type A で 35%, type B で 25%減少し、降伏先行型の type C で 15%, type D で 20%増加した。材料的には、ひずみ速度の上昇により変形能は低下するとの報告があるが、本実験では母材破断が終局限界状態となった typeC, D がそれとは逆傾向にあり载荷速度が大きくなるほど最大耐力時変位が増加する結果となった。これは载荷速度が大きくなるほど終

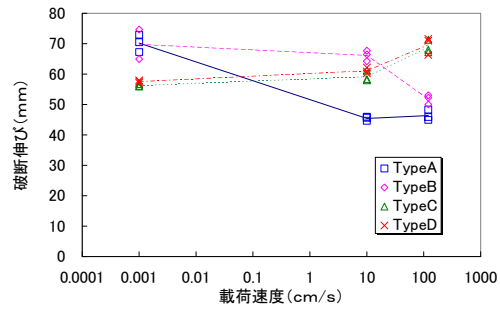


図-8 载荷速度－変位関係

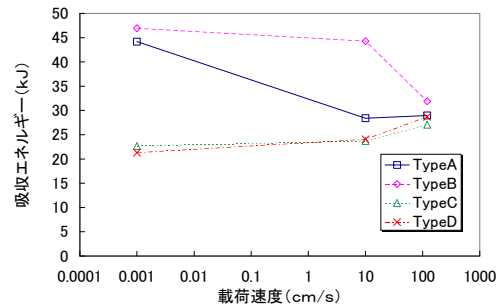


図-9 载荷速度－吸収エネルギー関係

局時における外側ボルト列連結板の応力状態が緩和され、補強効果が有効に機能したためであると考えられる。

载荷速度の増加によって、高力ボルトの破断で終局状態に達した typeA, B では、最大耐力の増加にともない最大耐力時変位が著しく低下した。そのため図-9 では、超高速载荷時 (120cm/s) の吸収エネルギーが静的载荷時に対して 40%程度減少している。結果的に全てのタイプにおいて超高速载荷時の吸収エネルギーは 25KJ 程度となった。

(3) 限界状態区分

図-10 に载荷速度－ P_{SL}/P_{FYn} 関係、図-11 に β 値－ P_{SL}/P_{FYn} 関係を示す。図-10 の横軸は载荷速度を対数表記したもの、図-11 の横軸は、すべり・降伏強度比 β を表す。縦軸はすべり耐力と母材降伏耐力の比 (P_{SL}/P_{FYn}) を表している。図-10 より、静的载荷では P_{SL}/P_{FYn} は設計段階で設定した β 値と同程度の値になって

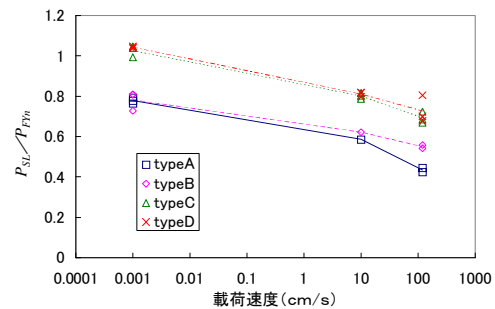


図-10 载荷速度－ P_{SL}/P_{FYn} 関係

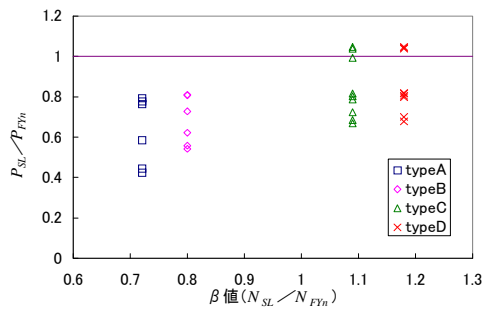


図-11 β 値— P_{SL}/P_{FYn} 関係

いるが、超高速荷重では P_{SL}/P_{FYn} は β 値に比べ 30~40%程度低い値となる。また図-11 より、type C および type D において、静的荷重では P_{SL}/P_{FYn} は 1 に近い値となり線形限界に母材純断面降伏が関与するが、高速荷重および超高速荷重では P_{SL}/P_{FYn} は 1 を下回り、線形限界においてすべりが先行する結果となった。

(4) まとめ

本研究課題では、高力ボルト摩擦接合を対象に超高速衝撃引張荷重実験を行った。本実験の範囲で得られた主な知見を以下にまとめる。

- ① 摩擦接合継手のすべり耐力は、すべり先行型、降伏先行型にかかわらず荷重速度が大きくなるほど減少する傾向が認められる。最もすべり耐力が小さくなった type D でも設計値を上回り、すべり係数は道路橋示方書の規定値 0.4 を満足する。
- ② 摩擦接合継手の降伏耐力は、荷重速度が大きくなるほど増加する傾向にある。超高速荷重時の増加率は静的荷重に対して、すべり先行型継手で 45%、降伏先行型継手で 25%程度は確保できる。また、耐力が増加傾向にあるため、道路橋示方書の有効断面の規定を十分に満足する。
- ③ 摩擦接合継手の終局耐力は、荷重速度が大きくなるほど僅かであるが増加する傾向にある。この増加傾向は、終局状態が高力ボルトの破断、母材純断面の破断の双方において認められる。
- ④ 摩擦接合継手の変形能は、荷重速度が大きくなるほど、終局状態が高力ボルト破断の継手で減少し、母材破断の継手で増加する傾向が認められる。
- ⑤ 荷重速度が大きくなるとすべり耐力に対して降伏耐力が相対的に大きくなる傾向にある。そのため設計段階の β 値で降伏先行型に区分された継手の限界状態がすべり先行型へと移行する。現在の設計で一般に用いられている β 値の範囲では、高速荷重 (10cm/sec) に対する使用限界状態は、殆どの場合すべり先行型になる

ものと考えられる。

本実験は、道路橋示方書で規定される最も一般的な摩擦面処理状態である黒皮除去後の粗面を対処に行っており、近年、防錆上の理由から多用されているジンクリッチペイントなどの処理状態についても今後検討の必要がある。また、本課題では地震被害と最大速度の相関性が良い事を理由に一定速度のもとで超高速衝撃引張荷重実験を行ったが、実際の地震外力は加速度の変化がともなう。従って過去の代表的な強震記録を参考に振幅調整した加速度波形を設定し、超高速繰返し荷重試験を実施する必要がある。さらには典型的な動的荷重履歴を被った継手供試体を対象に耐力実験をパラメトリックに実施することにより、残存保有性能や補修効果の評価手法の確立。そして将来的には、様々な補修・補強履歴を受けた接合部の保有性能変化予測に関する研究についても望まれるところである。これらの研究成果は全て、鋼構造の長寿命化、維持管理の低コスト化へと大きく貢献するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 谷口侑也, 亀井義典, 崎野良比呂: 超高速衝撃引張荷重を受けるすべり先行型摩擦接合の保有性能評価に関する実験, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, I-492, 2008.9.
- ② 吉田基次, 亀井義典, 崎野良比呂: 超高速衝撃引張荷重を受ける降伏先行型摩擦接合の保有性能評価に関する実験, 土木学会平成 21 年度関西支部年次学術講演会後援概要集, 印刷中.
- ③ 吉田基次, 亀井義典, 崎野良比呂: 超高速衝撃引張荷重を受ける高力ボルト摩擦接合の限界状態, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 印刷中.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀井 義典 (KAMEI YOSHINORI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 80224690

(2) 研究分担者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)
大阪大学・接合科学研究所・助教
研究者番号: 80273712

(3) 連携研究者

なし