

山形鋼各種接合部及びスプリットティ接合部の 高速引張載荷時の挙動について

金多 潔・甲津 功夫・木上 貴夫
藤井 彰人

DYNAMIC BEHAVIOR OF SEVERAL STEEL STRUCTURAL JOINTS UNDER HIGH SPEED TENSILE LOADING

By

Kiyoshi KANETA, Isao KOHZU, Takao KIGAMI and Akihito FUJII

Synopsis

Stress (or strain) rate effect in several steel structural joints is examined to assess the structural safety of the joints against earthquakes or gusts. High speed tensile loading test was carried out with several range of loading speed, by using high tension bolted joints of equal leg angles and split tee joints as well as galvanized normal steel bolted joints.

From the experiment, mechanical properties of the joints under high speed loadings was calculated and was compared with the properties of the base metals under statically loading condition. From the comparison, it has been observed that the high tension bolted joints designed by applying with friction mechanism are inferior in strength ratio to the angles which are applied to the structural members under high speed loading conditions, and it can be followed that careful attention should be paid to safety of the structure composed of the joints against excitations with comparatively large velocities.

1. 序

鋼構造物が地震力や風圧力などの動的な外力を受ける場合、外力の周波数と構造物の固有振動数との関係を考慮すると、構成部材や接合部に衝撃的な応力や変形を与える事も充分予測される。特に、筋違材によってこのような水平力の大部分に抵抗させる場合には、構造物の固有周期が比較的短くなり、地動や強風など外乱の卓越周期に近くなる場合もあって、構造安全上充分注意する必要がある。

一般に、鋼材の履歴復元力特性は、材に作用する外力の速度によって影響を受けることはよく知られている¹⁾²⁾。即ち、素材の応力-ひずみ関係はひずみ速度に依存して変化すると同時にその力学的性質も変化することになる。しかしながら、鋼構造物の耐震安全性を論じる上で重要な点の一つは、応力やひずみの値が大きい、あるいは応力集中またはひずみ集中を呈する接合部が、瞬間的な外力の作用で、必要な耐力や変形能力を確保しうるか否かを判定することであると考えられる。この点に着目して、既に筆者らは比較的薄い鋼板を母材とする突合せ溶接継手、高力ボルト摩擦接合継手、亜鉛めっきされたボルト接合部の高速引張載荷実験を行い、各種継手の高速引張載荷時の力学的挙動が素材のそれと異なって、接合形式や構成ファスナー材の組合せに応じて変化することを示した³⁾。ここでは更に、既往の研究成果のより一般的な接合部に対する適用性を明らかにする目的で、筋違材として多用される山形鋼の各種継手並びに端部接合部、柱梁接合

部や鋼管トラス構造物のフランジ継手で使用されるスプリットティ接合部を対象とした高速引張載荷実験を行い、その力学的挙動の特徴について報告している。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で使用された被接合材は筋違材を念頭に置いた山形鋼 (L-60×60×4) と、高力ボルトまたはめっきボルト引張接合用の T 形鋼 (H-350×175×7×11 の片フランジを切断したもの) の 2 種類である。2 種類の形鋼とその各種接合部の試験体の概略並びに設計条件を以下に示す。

(1) 山形鋼母材試験体 (試験体記号: AK) 及び山形鋼母材めっき試験体 (AM)

山形鋼 (L-60×60×4) の母材引張試験体で、断面の主軸の一つが載荷軸芯に一致するように、試験体両端部に加工が施されている。試験体の形状、寸法は、**Fig. 1** に示す通りである。尚、試験体 AM は、母材試験体 AK に溶融亜鉛めっきを施したものであり、形状、寸法は AK と同じである。

(2) 山形鋼高力ボルト摩擦接合試験体 (BK)

山形鋼を被接合材とする高力ボルト 2 面摩擦接合継手試験体であり、**Fig. 2** に示すように 2.3 mm のスプライスプレートと山形鋼を F10T M16 の高力ボルトで接合し、接合部の摩擦限界荷重以下でスプライスプレートが引張破断するよう設計されている。また接合部詳細は、日本建築学会「鋼構造設計規準」の該当規定を満たしている。

(3) 山形鋼ボルト接合試験体 (BM)

試験体の形状、寸法は **Fig. 3** に示すように、BK とほぼ同様であるが、試験体の各ピースをめっき処理した後、めっきボルト及びナットを用いて接合したものである。ボルト穴径は BK と異なり、めっき被覆を考慮して 17.5 mm 径とした。この試験体においても、スプライスプレートの引張破断が先行するように設計されている。

(4) 山形鋼ボルト接合重ね継手試験体 (WM)

メッキ処理された山形鋼及びボルト、ナットを用いて、**Fig. 4** のように接合された試験体であるが、重ね継手形式であることから、被接合材の重心軸が一致しないために、本試験体では載荷軸芯がせん断面の重心軸に一致するよう両端のガセットプレートの取付位置を調整してある。本試験体の設計上の破断位置は被接合材ボルト穴を通して材軸に直交する断面である。

(5) 山形鋼ガセットプレート型試験体 (GK)

耐震あるいは耐風要素としての筋違に山形鋼を使用した場合の筋違端部接合部をモデル化した試験体である。試験体の形状、寸法は **Fig. 5** に示す通りであるが、端部接合部の設計においては新耐震設計法の該当規定に従って、筋違母材の降伏以前に接合部が先行破壊しないよう留意した。即ち、本試験体では破壊が母材ボルト穴部分の引張破断で決るように設計されている。

(6) 山形鋼ガセットプレート型めっき試験体 (GM)

本試験体の形状、寸法は、ボルト穴径 (17.5 mm) 以外、**Fig. 5** に示された GK と同一である。本試験体は立体トラス架構塔状鋼構造物のめっき処理された斜材端部接合部を想定しているが、実験結果の比較の容易さを考慮して、GK 試験体と同一形状とした。本試験体においても、設計上、破壊が母材ボルト穴部分の引張破断で決っている。

(7) スプリットティ型高力ボルト引張接合試験体 (SK)

Fig. 6 に示すように、引張力を受けるスプリットティ型高力ボルト引張接合部をモデル化した試験体である。本試験体の設計最大耐力を日本建築学会「高力ボルト接合設計施工指針」に従って求めると、破壊はティフランジ部の曲げ引張破断で決ることになる。

(8) スプリットティ型ボルト引張接合試験体 (SM)

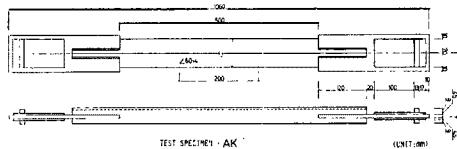


Fig. 1. Test specimen (AK).
(Test Specimen AM is same as AK in the shape and the size.)

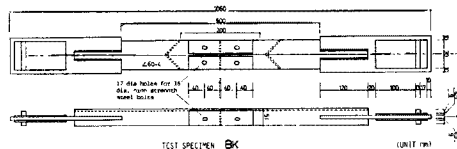


Fig. 2. Test specimen (BK).

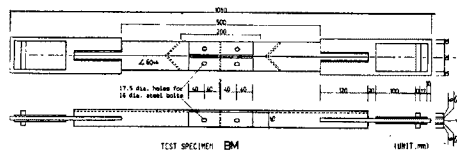


Fig. 3. Test specimen (BM).

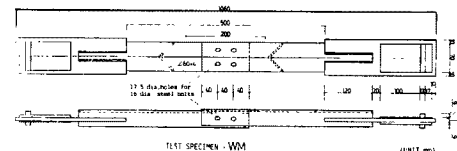


Fig. 4. Test specimen (WM).

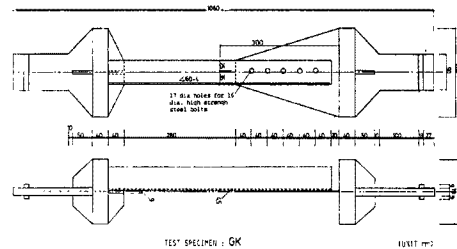


Fig. 5. Test specimen (GK).
(Overall shape of Test Specimen GM is like as that of GK, except galvanize treating and bolt clearance of GM.)

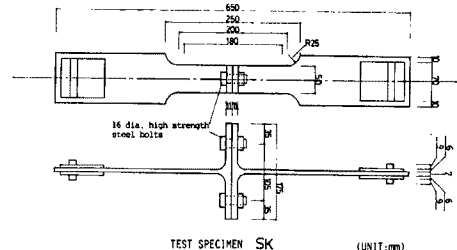


Fig. 6. Test specimen (SK).
(Overall shape of Test Specimen SM is like as that of SK, except galvanize treating of SM.)

本試験体は SK と同様の形状、寸法を有しているが、被接合材をめっき処理していることと、めっきボルト及びナットで接合している点が SK と異なっている。本試験体の最大耐力を、前述の SK と同様の方法で計算すると、ボルトの引張破断で決定されることになる。

以上のように、本研究で用いた 9 種類の試験体の特徴及び設計条件について述べたが、いずれも使用鋼材は SS41、高力ボルト F10T、めっきボルト及びナットは SS41 相当品である。使用鋼材の化学成分並びに力学的性質を **Table 1** に示す。

2.2 高速載荷実験方法

(1) 載荷装置

高速載荷実験に用いた載荷装置は、**Fig. 7** に示すようなフライホイール、載荷アーム、試験体取付け部

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of the materials.

	CHEMICAL COMPOSITION (%)					MECHANICAL PROPERTY		
	× 100			× 1000		(kgf/mm ²)	(%)	
	C	Si	Mn	P	S	Y.P.	T.S.	EL.
PL-2.3			49	19	16	32	44	35
L-60×60×4	11	17	50	18	35	35	46	40
H-350×175×7×11	14	26	52	15	16	33	47	30

からなっている。本装置は既に文献(3)の実験で使用したものと同一であり、ここでは改めて詳しく述べないが、フライホイールの回転数を一定に保った状態でクラッチを繋ぎ、载荷アームを経て、引張力を Fig. 8 に示す試験体下端に加えるような機構となっている。

(2) 载荷制御方法

鋼材の高速引張载荷実験では、通常、材のひずみ速度を一定に保って载荷を行う場合が多い¹⁾。しかし、本研究の载荷装置を用いた場合、鋼材や接合部のひずみ速度を材の弾塑性域全般に亘って一定に制御することはできない。従って、ここではひずみ速度制御法とは異なる载荷制御方法を採用する必要がある。この点

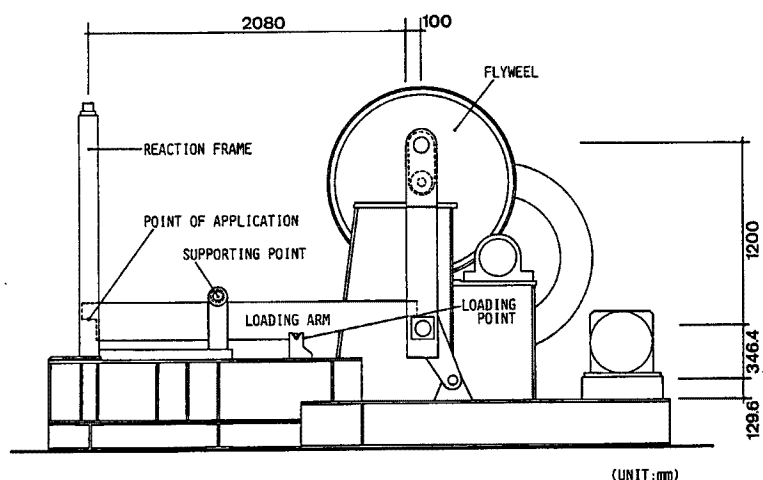


Fig. 7. Loading apparatus used for high speed monotonic tensile loading test.

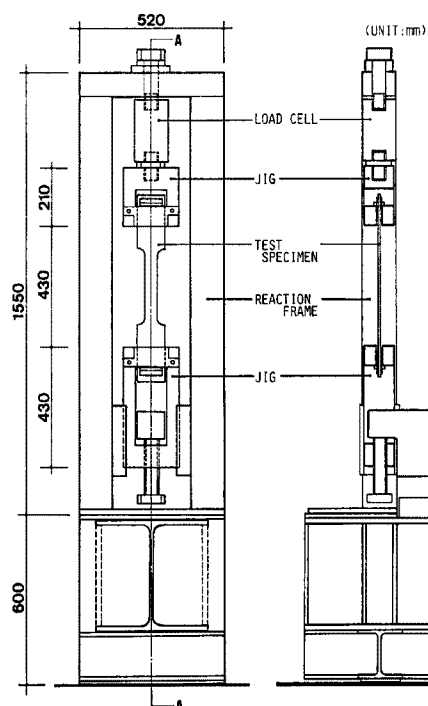


Fig. 8. Test setup of the specimen.

について既に筆者らの既往の研究³⁾で述べたように、フライホイールの設定回転数と各試験体の弾性限度内応力度速度との間に明瞭な線形関係が存在するという実験結果に基づき、载荷速度の制御を以下に述べる6段階の設定フライホイール回転数を与えることによって行い、実験結果を各試験体の弾性限度内応力度速度（以下応力度速度と呼ぶ）で整理する方法を採用した。設定したフライホイール回転数は、200, 350, 500, 750, 1000, 1500 r.p.m. であり、試験体の破断に至るまで同一の回転数で繰返し载荷することとした。

(3) 計測方法

実験時における主たる計測項目は、Fig. 8 に示す試験体上部取付け治具直上に設置されたロードセルから出力される荷重値と、Fig. 9 にその取付け方法を示している1対のインダクタンス式変位計によって検出される標点間変位である。AK～WM の5種類の試験体では、Fig. 1～4 に示されているように、標点間距離を 200 mm に設定し、Fig. 9 の取付け治具にねじ込まれた径 8 mm の高力ボルト（ボルト先端を突起状に加工してある）を試験体に噛み込ませることによって治具を固定した。従って、変位計及び取付け治具は、この合計 8 本の高力ボルトのみによって支持されているが、文献(3)の実験時においても確認したように、本実験においても支持点のすべりやボルト先端試験体断面位置での破断は観察されず、接合部の引張変形量を良好に計測できた。また、GK, GM 試験体では、変位計取付け治具の高力ボルト先端位置をカセットプレート先端から 40 mm 離れた山形鋼断面に定め、変位計針先端を Fig. 5 のガセットプレート他端に溶接接合された剛な鋼板に強力な磁石を介して突き当てる方法とした。SK, SM 試験体では、標点間距離を 180 mm として、既往の平板型試験体³⁾に使用された、Fig. 9 と同じ機構の治具を用いて変位計を取付けた。

なお、試験体局所のひずみ量を検出する目的で、山形鋼母材部分あるいはスプライスプレート、ガセットプレートの一部に塑性ひずみゲージを貼付し、荷重、変位と共に局所の歪値をも計測した。

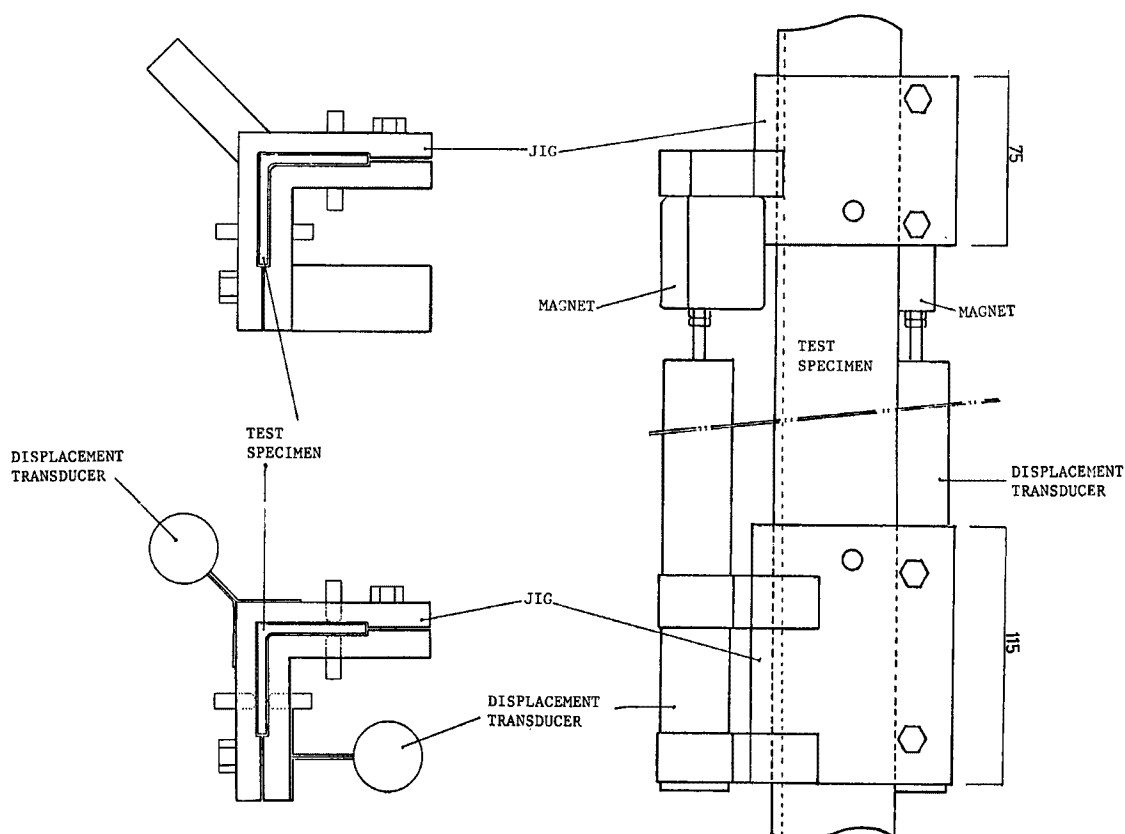


Fig. 9. Setup of a pair of displacement transducers.

以上の各出力を動歪計を介してデータレコーダーに収録し、実験終了後に AD 変換を行ってマイクロコンピュータを用いてデータ整理をした。

2.3 静的実験方法

各種試験体の高速引張载荷時の力学的挙動の特徴を、静的载荷時の挙動との比較の上で論じる目的で、Fig. 1~6 に示したのと同形状の試験体（試験体両端部の加工のみが異なる）を用いて、静的载荷実験を行った。

3. 実験結果の概要

高速引張载荷実験で得られた荷重及び変位出力値を試験体ごとに整理し、荷重—変位曲線を求めた。試験体によっては、山形鋼母材試験体のように数回以上の繰返し载荷後に引張破断したものもあり、この場合の荷重—変位曲線は、各ステップの荷重—変位曲線の包絡線の形で整理した。以下に、各試験体の荷重—変位曲線の結果の一例と、破断性状など実験時に観察された様々な力学的挙動の特徴を述べるが、荷重—変位曲線図中に示された試験体記号の意味について記すと、たとえば AKS の S は静引張試験を表わし、また AKO~AK5 の 0~5 は前述の 6 段階のフライホイール設定回転数を表わしている。従って、0 は 200 r.p.m., 5 は 1500 r.p.m. の一定回転数で载荷されたことを意味している。

3.1 山形鋼母材試験体 (AK)

山形鋼母材の引張試験結果を Fig. 10 に示すが、降伏点並びに引張強さが载荷速度の上昇に伴って増大

Table 2. Test results of specimen AK.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.Y.P.	L.Y.P.	T.S.	ϵ_{ST}	EL.
			(tf/cm ²)			(%)	
AKS			3.62	3.61	4.80	2.48	24.3
AK1	1	22.01	4.29	3.94	5.10	3.68	26.7
	2	21.87	4.27	3.85	5.02	3.48	28.3
	3	21.28	4.32	3.93	5.08	4.98	28.2
AK2	1	29.46	4.27	3.90	4.82	4.79	17.9
	2	32.65	4.53	4.08	5.13	4.17	20.2
	3	32.91	4.48	4.14	5.08	4.78	20.7
AK3	1	44.99	4.48	4.02	5.18	4.17	24.1
	2	45.01	4.38	3.98	5.05	4.96	22.0
	3	50.82	4.57	4.17	5.20	4.55	25.2
AK4	1	62.78	4.41	4.12	5.06	5.67	19.8
	2	58.22	4.51	4.17	5.18	4.94	26.4
	3	70.33	4.51	4.12	5.10	4.87	27.5
AK5	1	94.12	4.58	4.31	5.18	5.51	31.5
	2	100.59	4.50	4.07	5.06	3.94	32.6

U.Y.P.: Upper Yield Point,

L.Y.P.: Lower Yield Point,

T.S.: Tensile Strength,

ϵ_{ST} : Strain at the Beginning of Strain Hardening,

EL.: Elongation at the Fracture.

する傾向が観察される。この現象は既に鋼素材に関する同様の研究²⁾や筆者らの鋼板を用いた既往の研究³⁾においても観察されていて、断面形状の違いに依存しない鋼材特有の性質であることがわかる。実験結果から求められた山形鋼の力学的性質を **Table 2** に示す。表より、引張強さは載荷速度の影響を受けるものの、降伏応力度に比べて顕著ではないことがわかる。また、ひずみ硬化開始時のひずみは、ばらつきはあるけれども載荷速度の影響を受けて、静的載荷時の値に較べて大きくなることがわかる。破断伸びについては、載荷速度の影響を殆ど受けず、むしろ試験体それぞれのばらつきの度合いが大きいものと考えられる。

3.2 山形鋼母材めっき試験体 (AM)

荷重-変位曲線一例を、**Fig. 11** に、また実験結果のまとめを **Table 3** に示す。本試験体の高速引張載荷時の力学的挙動は、AK 試験体とはほぼ同様であるが、鋼板を用いた既往の研究³⁾によると、めっき処理されることによって鋼材表面が硬化して材料の力学的性質に変化を及ぼすという結果が得られている。しかし、本実験結果によると、この一種の熱処理の影響が観察されておらず、母材の形状、寸法やめっき処理

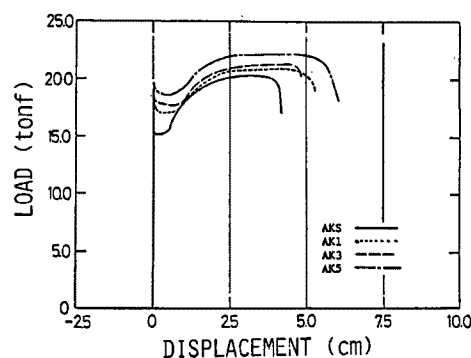


Fig. 10. Load-displacement diagrams (AK).

Table 3. Test results of specimen AM.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.Y.P.	L.Y.P.	T.S.	ϵ_{ST}	EL.
			(tf/cm ²)			(%)	
AMS			3.51	3.44	4.71	1.77	28.0
AM1	1	22.49	4.28	3.85	5.01	2.73	32.5
	2	23.25	4.21	3.88	5.01	3.75	27.8
	3	22.23	4.30	3.93	5.08	3.69	25.1
AM2	1	30.67	4.24	3.87	5.03	2.98	26.8
	2	31.29	4.36	3.98	5.09	3.64	24.4
	3	32.60	4.43	4.03	5.02	4.03	24.2
AM3	1	48.05	4.37	4.07	5.00	4.93	23.0
	2	47.65	4.35	4.01	4.99	3.64	26.4
	3	52.97	4.29	3.99	5.06	4.93	24.5
AM4	1	62.93	4.37	4.11	5.08	3.57	27.8
	2	65.34	4.38	4.03	5.05	3.71	27.5
	3	76.22	4.50	4.10	5.11	5.46	23.9
AM5	1	107.01	4.50	4.06	5.20	3.32	27.6
	2	106.13	4.48	3.97	5.20	4.37	27.4
	3	121.30	4.62	4.18	5.29	4.79	23.3

U.Y.P.: Upper Yield Point,

L.Y.P.: Lower Yield Point,

T.S.: Tensile Strength,

ϵ_{ST} : Strain at the Beginning of Strain Hardening,

EL.: Elongation at the Fracture.

条件のわずかな差異が、実験結果に反映されるものと考えられ、今後更に研究する必要があるものと思われる。

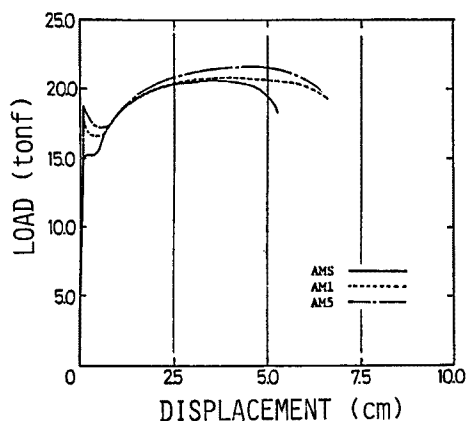


Fig. 11. Load-displacement diagrams (AM).

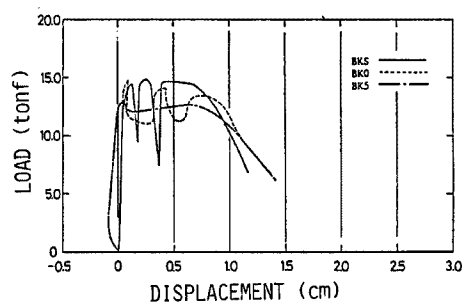


Fig. 12. Load-displacement diagrams (BK).

Table 4. Test results of specimen BK.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	F.L.S.	B.S.	U.S.
			(tf/cm ²)		
BKS			5.02	4.97	5.13
BK0	1	17.77	4.80	4.31	4.80
	2	16.25	5.09	4.58	5.79
	3	16.47	5.02	4.64	5.02
BK1	1	32.27	4.99	4.60	4.99
	2	31.50	4.50	4.27	4.50
	3	28.83	4.28	4.36	4.36
BK2	1	53.65	4.74	4.66	4.74
	2	47.09	5.46	4.94	5.46
	3	49.81	5.11	4.62	5.11
BK3	1	72.66	4.29	4.46	4.46
	2	80.39	4.97	4.55	4.97
	3	76.07	4.92	4.52	4.92
BK4	1	110.69	4.98	4.56	4.98
	2	91.88	4.89	4.37	4.89
	3	104.45	5.26	4.69	5.26
BK5	1	136.84	4.49	4.39	4.49
	2	144.67	4.43	4.33	4.43
	3	142.22	4.51	4.55	4.55

F.L.S.: Friction Limit Stress,
B.S.: Maximum Bearing Stress,
U.S.: Ultimate Strength.

3.3 山形鋼高力ボルト摩擦接合試験体（BK）

BK 試験体の高速載荷実験では、各設定載荷速度で1回の載荷で破断に至った。破断位置は、殆どの試験体でスプライスプレートのボルト穴欠損部付近であったが、一部の試験体では載荷速度の大きさに問わず、母材ボルト穴欠損部付近であった。この理由は、スプライスプレート（2枚）の有効断面積（設計値）と母材有効断面積（設計値）とを比較するとわずかに母材有効断面積が上廻っているものの、供試用受入れ鋼材の力学的性質が設計基準値と異なっていることや、実断面積と公称断面積との差異などにより、実験結果の破断位置にばらつきが生じたものと考えられる。荷重－変位曲線の一例を Fig. 12 に、結果のまとめを Table 4 にそれぞれ示す。静的載荷時では、摩擦限界荷重に達した後に個々のボルト接合部ですべりが生じ、徐々に支圧接合型に移行して行く様子が観察される。しかし載荷速度が大きくなるに従ってこの傾向は明瞭ではなくなり、接合部があたかも一体の母材として挙動するようになって破断に至っている。なお、Table 4 に示す摩擦限界応力度とはすべてのボルトがすべりを生じない状態での最大応力度を、支圧応力度とは全てのボルトがすべりを生じて支圧接合状態に達した時の応力度を、最大応力度とは以上の耐力機構の違いに関係なく荷重－変位曲線上で読み取れる最大荷重に対応する応力度をそれぞれ表わしている。また応力度を計算する場合に適用した断面積は、破断位置の違いに関らずにスプライスプレートのボルト穴欠損を考慮した有効断面積の実測値である。

3.4 山形鋼ボルト接合試験体（BM）

本試験体の破断位置は、載荷速度の大きさに問わず、スプライスプレートボルト穴欠損部または母材ボルト穴欠損部付近であった。設計上予測された破断位置と実破断位置とが異なる場合の理由は、前述の BK 試験体の場合と同様である。荷重－変位関係の一例を Fig. 13 に、実験結果のまとめを Table 5 にそれぞれ示す。めっきボルト接合部では、載荷初期にボルト径と穴のクリアランス分だけのすべりが生じ、完全に支圧接合型に移行した後にボルト穴付近のスプライスプレートまたは母材断面部で降伏し、最大耐力に達した後に破断する。なお、表中の最大応力度は、スプライスプレートボルト穴欠損断面を考慮した有効断面積に基づいて求めている。

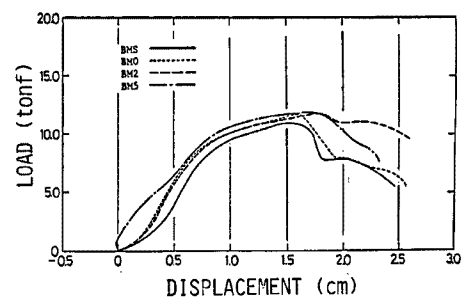


Fig. 13. Load-displacement diagrams (BM).

3.5 山形鋼ボルト接合重ね継手試験体（WM）

WM 試験体の荷重－変位曲線の一例を Fig. 14 に、結果のまとめを Table 6 に示す。本試験体の破断位置は、静的、高速載荷に関らず、母材ボルト穴欠損部付近であった。BM と WM 試験体の荷重－変位曲線を比較すると、BM の実験結果の方が最大荷重や見かけ上の剛性は低く、破断に至るまでの変形が大きいことがわかる。この理由として、BM 試験体の場合は接合部を構成する2枚のスプライスプレートが載荷中に終始一体としては働かず、材料のわずかな力学的不均一性や幾何学的非対称性などによって、見かけ上の荷重－変位曲線性状はWM試験体の場合に較べて剛性や耐力の点で劣り、また、接合部の全体的な伸び変形についても、接合部局部的降伏、ひずみ硬化の時間的なずれに伴って、破断が段階的に生じて見かけ上の破断伸びが増大することが考えられる。

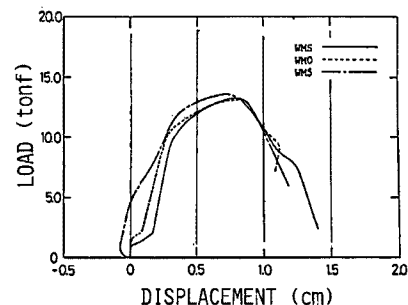
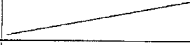


Fig. 14. Load-displacement diagrams (WM).

3.6 山形鋼ガセットプレート型試験体（GK）

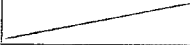
既に述べたように、本試験体は山形鋼軸部の降伏以前に端部接合部が破断しないように設計されている。

Table 5. Test results of specimen BM.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)
BMS			3.44
BM0	1	9.01	3.63
	2	7.37	3.57
	3	7.57	3.42
BM1	1	15.67	3.75
	2	14.18	3.52
	3	14.67	3.44
BM2	1	22.72	3.99
	2	23.06	3.59
	3	21.76	3.64
BM3	1	34.45	3.89
	2	33.58	3.54
	3	34.03	3.60
BM4	1	47.07	3.65
	2	46.44	3.64
	3	46.90	3.64
BM5	1	76.22	3.98
	2	55.34	3.67
	3	72.27	3.72

U.S.: Ultimate Strength.

Table 6. Test results of specimen WM.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)
WMS			4.25
WM0	1	12.41	4.28
	2	11.33	4.11
	3	13.16	4.19
WM1	1	22.07	4.25
	2	22.28	4.17
	3	23.72	4.42
WM2	1	35.54	4.51
	2	34.14	4.43
	3	31.37	4.33
WM3	1	55.71	4.40
	2	54.49	4.30
	3	52.93	4.42
WM4	1	72.29	4.40
	2	77.57	4.49
	3	73.48	4.36
WM5	1	112.28	4.40
	2	140.96	5.59
	3	96.70	4.48

U.S.: Ultimate Strength.

実験結果を **Fig. 15**, **Table 7** に示すが、静的、高速載荷時ともにプレースの軸部が降伏した後、端部接合部の第1番目の高力ボルト位置で母材が引張破断している。また単一山形鋼を引張材として使用する場合は設計上の留意点として既に指摘されているように、偏心の影響によって初載荷時の荷重-変形関係が線形にならないことも観察される。更に、**Table 7** の最右欄に、破断後に断面を突合せて計測した伸び変形量を標点距離で除した破断伸びを示すが、静的、高速載荷時ともに母材の伸びに較べて著しく小さくなることがわかり、単一山形鋼引張筋違架構の耐震安全性については、この点に充分配慮する必要があるものと考えら

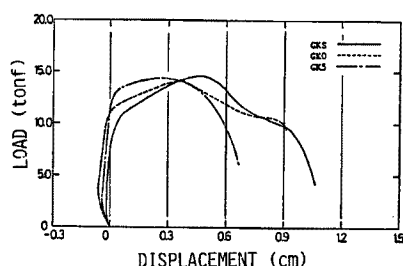


Fig. 15. Load-displacement diagrams (GK).

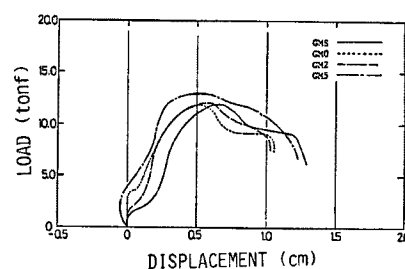


Fig. 16. Load-displacement diagrams (GM).

Table 7. Test results of specimen GK.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)	EL. (%)
GKS			5.87	3.7
GK0	1	21.63	5.64	4.2
GK1	1	35.28	5.63	4.3
	2	38.59	5.97	4.6
	3	39.86	5.80	4.3
GK2	1	52.02	5.89	4.6
	2	44.90	5.20	4.1
	3	52.36	5.73	4.5
GK3	1	72.85	5.65	4.2
	2	64.93	5.08	3.4
GK4	1	93.44	5.71	4.4
	2	94.38	5.06	4.1
	3	104.11	5.36	3.5
GK5	1	146.84	5.06	4.7
	2	174.10	5.40	4.1

U.S.: Ultimate Strength,
EL.: Elongation at the Fracture.

Table 8. Test results of specimen GM.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)	EL. (%)
GMS			4.42	4.9
GM0	1	15.69	4.20	4.1
	2	13.66	4.36	3.4
GM1	1	25.36	4.46	4.3
	2	28.40	4.74	4.2
	3	25.71	4.59	1.7
GM2	1	40.82	4.83	4.6
	2	38.67	4.59	4.1
	3	34.27	4.76	4.2
GM3	1	64.15	4.82	4.1
	2	65.28	4.92	4.3
GM4	1	73.60	4.30	4.8
	2	87.05	4.77	4.7
	3	74.93	4.81	4.3
GM5	1	132.30	4.94	5.0
	2	111.27	4.27	5.4

U.S.: Ultimate Strength,
EL.: Elongation at the Fracture.

れる。

3.7 山形鋼ガセットプレート型めっき試験体 (GM)

本試験体は、GK 試験体とはほぼ同様の形状寸法を有し、載荷時の全体的な挙動も Fig. 16, Table 8 に示すように GK 試験体の挙動に類似しているが、ただ GM 試験体では載荷初期にめっきボルト 接合部ですべりが発生し、支圧接合型に移行する様子が観察される。

3.8 スプリットティ型高力ボルト引張接合試験体(SK)

本試験体では、静的、高速載荷時ともにH形鋼フィレット部近傍のフランジ曲げ降伏後、てこ作用により高力ボルトが引張破断した。実験結果を Fig. 17, Table 9 に示すが、図中の高速載荷時の荷重-変位曲線は同一試験体の破断に至るまでの各回の載荷実験で得られた荷重-変位曲線の包絡線を表わしている。また、表中の最右欄は破断伸びを示しているが、これらの数値から本接合部が高速引張力を受けても、破断に至るまでの変形性能は静的載荷時に較べて劣ることなく良好であることがわかる。

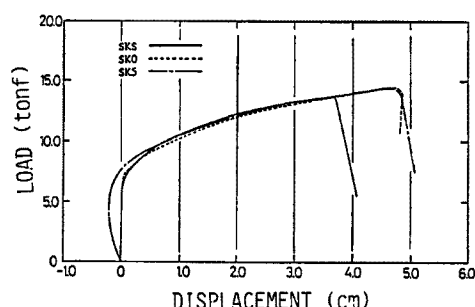


Fig. 17. Load-displacement diagrams (SK).

Table 9. Test results of specimen SK.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)	EL. (%)
SKS			4.09	23.2
SK0	1	22.18	4.27	31.6
	2	14.29	4.16	33.3
	3	15.29	4.16	34.1
SK1	1	29.82	4.11	27.2
	2	49.22	4.11	30.8
	3	23.33	4.11	35.5
SK2	1	49.54	4.19	35.5
	2	35.44	4.31	33.3
	3	35.34	4.35	32.2
SK3	1	63.75	4.06	27.7
	2	56.42	4.08	25.0
	3	55.98	4.45	37.2
SK4	1	90.39	4.14	31.1
	2	71.81	4.37	35.5
	3	78.73	4.14	33.3
SK5	1	125.91	4.03	29.4
	2	107.04	4.24	35.5
	3	110.65	4.28	30.5

U.S.: Ultimate Strength,

EL.: Elongation at the Fracture.

3.9 スプリットティ型ボルト引張接合試験体 (SM)

本試験体の引張載荷時の挙動は、SK 試験体とほぼ同様であり、めっきボルトの引張破断で実験を終了した。

実験結果を Fig. 18, Table 10 に示す。

3.10 応力度速度とひずみ速度の関係

本研究の高速引張載荷実験方法については、既に 2.2 で述べたように初載荷時の載荷速度を制御する形式であり、実験結果はこの載荷速度を各試験体の有効断面積で除した応力度速度を用いて整理している。

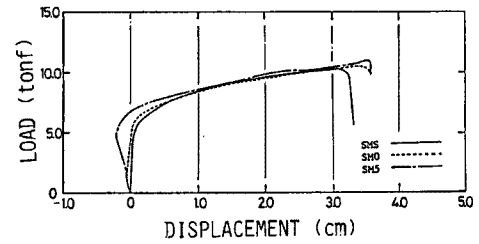


Fig. 18. Load-displacement diagrams (SM).

Table 10. Test results of specimen SM.

SPEC.		STRESS RATE (tf/cm ² /s)	U.S. (tf/cm ²)	EL. (%)
SMS			2.98	18.6
SM0	1	15.74	2.94	28.0
	2	16.20	2.84	20.0
	3	17.05	3.14	20.8
SM1	1	24.89	3.17	28.3
	2	23.43	2.99	28.0
	3	23.46	2.98	28.0
SM2	1	32.81	3.02	28.3
	2	33.15	3.14	32.7
	3	33.29	2.96	28.8
SM3	1	50.46	3.05	28.8
	2	55.30	3.21	29.4
	3	52.94	3.10	28.3
SM4	1	68.52	3.23	28.8
	2	67.79	3.12	27.2
	3	74.20	3.22	26.1
SM5	1	90.03	3.13	29.4
	2	98.93	3.22	28.0
	3	98.30	3.21	25.5

U.S.: Ultimate Strength,

EL.: Elongation at the Fracture.

しかし、各試験体が見かけ上の降伏荷重に到達した後に全断面が塑性状態に達した後では、初載荷時の応力度速度のまままで載荷されることはなく、むしろ、接合部の全体的な伸び速度が一定のまま推移して破断に至るという傾向が観察される。ここでは、上述のように試験体断面が塑性化した後の全体的な伸び速度に基づいて計算される接合部のひずみ速度の実験結果を示し、本研究の載荷速度範囲を既往の研究成果との比較検討を行う上での一尺度とするための資料を提示する。本実験結果から得られた降伏後の標点間伸び速度を載荷前の標点距離で除した値をひずみ速度と定義して、試験体種別ごとに整理した結果を Table 11 に示す。

Table 11. Stress rate within the elastic range and strain rate in the plastic range

SPECIMEN TYPE	STRESS RATE (tf/cm ² /s)	STRAIN RATE (%/s)
AK	21 to 100	8 to 64
AM	22 to 120	10 to 80
BK	16 to 140	5 to 140
BM	7 to 80	10 to 140
WM	11 to 140	7 to 170
GK	22 to 170	8 to 90
GM	14 to 130	6 to 120
SK	14 to 130	10 to 120
SM	16 to 100	14 to 150

4. 各種試験体の最大荷重値に及ぼす載荷速度の影響について

4.1 母材試験体

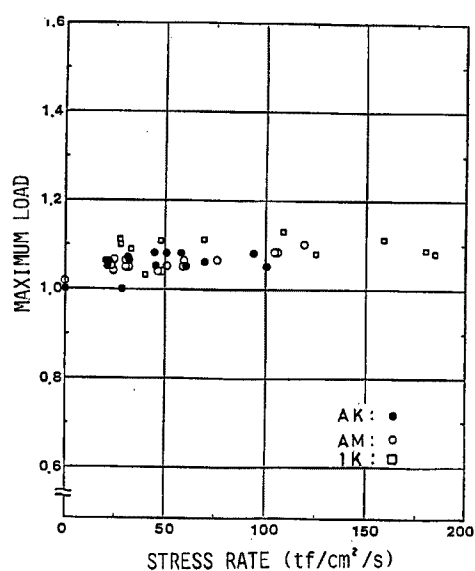


Fig. 19. Relations between stress rate and normalized maximum load of specimens AK and AM. (The ordinates of the data of AK and AM are normalized by the value of maximum load of the equal leg angle AK obtained from the monotonic tensile loading test. Test results of flat plate specimen IK are also shown to compare with the former results.)

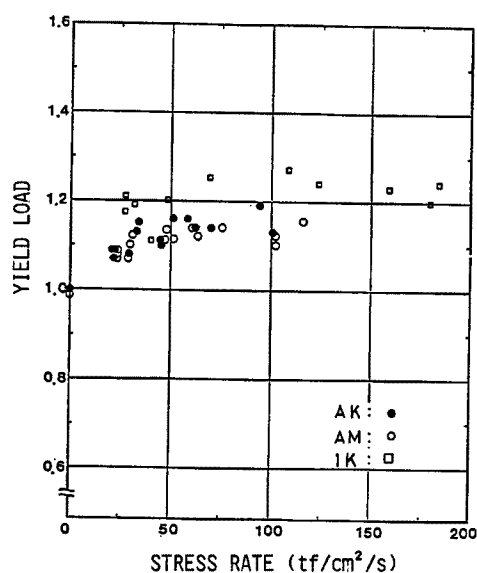


Fig. 20. Relations between stress rate and normalized yield load of specimens AK and AM.

山形鋼母材並びにめっき処理試験体の最大荷重値（引張強さ）に及ぼす載荷速度の影響を調べるために、**Fig. 19** に示すように、横軸に応力度速度をとり、縦軸に山形鋼母材試験体（AK）の静的最大荷重の平均値で無次元化した最大荷重値をとって実験結果を整理した。また、図中には比較のために既往の研究³⁾ で得られた鋼板の実験結果をも口印で示してある。図より、山形鋼母材の最大荷重は、応力度速度が約 20 ton/cm²/sec 以上で静的最大荷重値を上廻るが、その値は静的実験値のせいぜい 1.1 倍程度であること、また、本実験結果の範囲内では応力度速度が約 20 ton/cm²/sec 以上で、応力度速度の大きさには顕著には影響を受けないことがわかる。

また、母材試験体では実験結果の荷重—変形曲線図から、下降伏荷重を明瞭に読み取ることができるが、下降伏荷重値の載荷速度依存性を調べるために **Fig. 19** と同様の手法で実験結果を整理したのが、**Fig. 20** である。同図から、載荷速度の上昇に伴う降伏荷重の上昇傾向は観察されるが、図中に記された鋼板実験結果³⁾ との比較やめっき処理材（AM）との比較から、鋼素材の材質のばらつきや断面形状の違い及び表面処理条件の違い（既に述べたように本実験結果では、めっき処理材の耐力向上性が既往の結果³⁾ ほど顕著ではない）が、鋼材の力学的性質に及ぼす影響については十分に解明されず、今後更に研究する必要がある。

4.2 接合部試験体

本実験で使用された各種接合部の最大耐力（最大荷重）に及ぼす載荷速度の影響を調べるために、ここでは山形鋼母材（AK）の静的最大荷重値を基準にして実験結果を整理した山形鋼各種接合部の最大耐力の比較と、既往の鋼板試験体による静的最大荷重実験値³⁾ を基準にしたスプリットティ接合部最大耐力の比較結果を示す。**Fig. 21** は山形鋼高力ボルト接合部の実験結果をプロットしたものであるが、この図の縦軸は山形鋼母材の静的最大荷重を 1 とした場合の 2 種類の接合部それぞれの強度比を表わしている。即ち、実験結

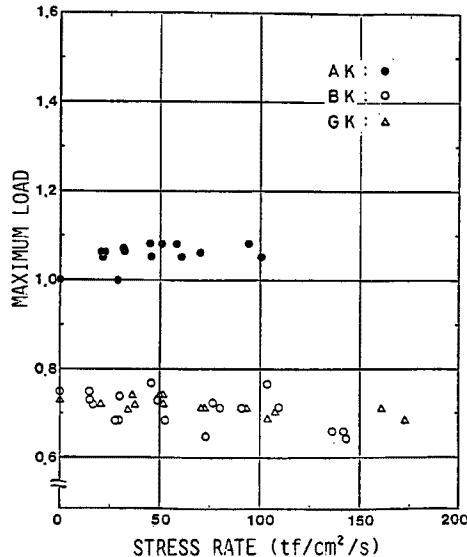


Fig. 21. Relations between stress rate and normalized maximum load of specimens BK and GK. (The ordinates of the data are normalized by the value of maximum load of the equal leg angle AK obtained from the monotonic tensile loading test.)

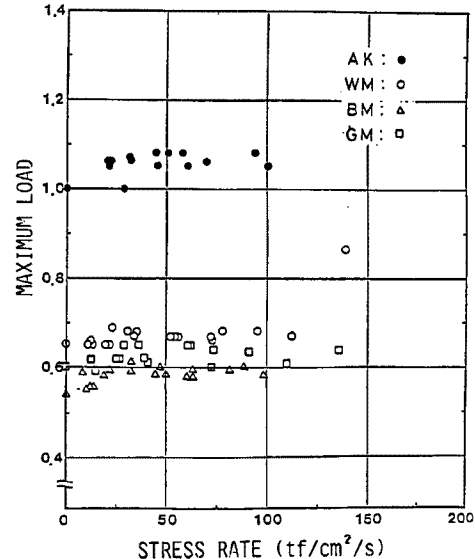


Fig. 22. Relations between stress rate and normalized maximum load of specimens WM, BM and GM.

果に依ると、2種類の接合部の母材（被接合材—山形鋼）に対する静的強度比は約0.7前後であり、応力度速度の増大に伴って、強度比は漸減する傾向にあることが伺える。このことは、応力度速度を一定とした場合に接合部の被接合材に対する強度比は静的載荷時に較べて更に低下することを意味しており、接合部の耐震安全性を考慮する場合に、載荷速度による影響を無視し得ないことを示唆しているものと考えられる。Fig. 22 は、山形鋼めっきボルト接合部の被接合材に対する強度比を示している。同図から、めっきボルト接合部では応力度速度の増大に伴う最大荷重の上昇が、被接合材と同程度に観察されることから、高速引張力を受けるめっきボルト接合部の最大耐力は、接合部の静的最大耐力と載荷速度に依存する被接合材の最大耐力に基づいて、大むね評価できるものと考えられる。

Fig. 23 は、スプリットティ接合部の最大耐力の実験結果を整理したものである。縦軸の無次元化基準量は既往の鋼板試験体1k(断面: 50 mm×4.5 mm)の静的最大荷重を、スプリットティ接合部試験体の平行部断面積に見合うように割増した最大荷重である。高力ボルト引張接合部、めっきボルト引張接合部ともに実験結果にばらつきはあり、確定的な結論は得られないが、めっきボルト引張接合部では静的最大耐力を下回る高速載荷時最大耐力を示す場合が多く、高速引張力を受けるめっきボルトの最大耐力について、更に詳しく研究する必要があるものと考えられる。

5. ま と め

鋼構造物の耐震、耐風要素として使用される筋違材山形鋼の各種接合部や、建築構造物の柱梁接合部や塔状鋼構造物の主柱フランジ接合部などに使用されるスプリットティ接合部が、突発的な外乱を受ける場合を想定して、特殊な載荷装置を用いた高速引張載荷実験を行い、接合部の力学的挙動の特徴について調べた。本研究で明らかにされた点を要約すると以下ようになる。

1) 山形鋼母材の静的引張強度を基準にした山形鋼各種接合部の強度比を求め、その載荷速度による影響を調べた結果、高力ボルト摩擦接合部や筋違材端部高力ボルト摩擦接合部では載荷速度（応力度速度）の上昇に伴い、被接合材に対する強度が低下する傾向が観察され、この種の接合部の耐震安全性の評価を行う場合には、外力の作用する速度の影響を無視できないことを明らかにした。

2) めっき処理された山形鋼母材並びにめっきボルト接合部が高速引張力を受ける場合の最大耐力は、接合部の静的最大耐力と載荷速度に依存する被接合材の最大耐力に基づいて、大むね評価することが可能である。

3) スプリットティ接合部最大耐力に及ぼす載荷速度の影響について、特にめっき処理接合部では載荷速度の上昇に伴う強度比の低下の傾向が観察されるが、本研究結果から明確な結論は得られないので、今後更に研究する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 若林實・中村武・吉田望・岩井哲：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響（その1），日本建築学会

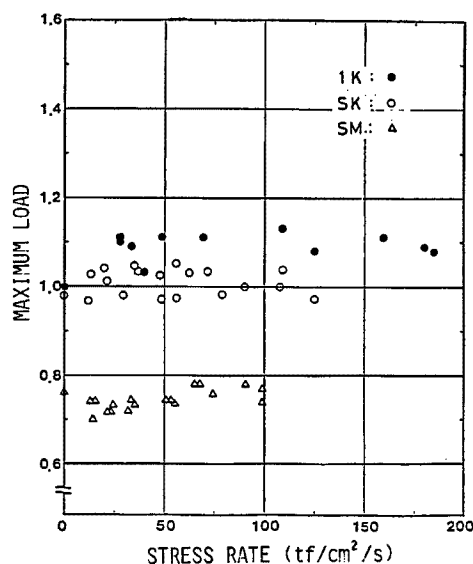


Fig. 23. Relations between stress rate and normalized maximum load of specimens SK and SM. (The ordinates of the data are normalized by the value of maximum load of flat plate in Reference 3.)

論文報告集，第314号，昭和57年4月，pp. 105-111.

- 2) 榊本勉・竹内守・加藤良一・土本凱士・宮下克彦：高压配管用炭素鋼管材の高速引張試験，第1回材料の衝撃問題シンポジウム，1983年12月，pp. 41-44.
- 3) 金多潔・甲津功夫・木上貴夫・奥田英貴：高速引張力を受ける鋼構造接合部の力学的挙動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第28号 B-1，昭和60年4月，pp. 193-207.