

高速繰返し載荷を受ける鋼構造各種接合部の 履歴特性に関する実験的研究

吹田啓一郎・金彗 潔・甲津 功夫

THE EFFECT OF STRAIN RATE IN STEEL STRUCTURAL JOINTS DUE TO HIGH SPEED CYCLIC REVERSED LOADINGS

By Keiichiro SUITA, Kiyoshi KANETA and Isao KHOZU

Synopsis

This paper deals with the effects of strain rate on the mechanical properties of base metals, butt-welded joints, high-strength bolted joints and regular bolted joints due to cyclic reversed loadings. The increase of the yield strength and the ultimate strength of the base metals was significantly observed under the monotonic loading conditions. However, under cyclic loading conditions, the effect of strain rate on the mechanical properties were various in different joint types. From the results, it can be seen that the particular attention should be paid on the design of bolted joints, especially, in steel structures with short natural periods.

1. 序

鋼素材の力学的性質に対するひずみ速度の影響に関する研究がこれまでに多く行われており、降伏点・強度などがひずみ速度の増加に伴って上昇することなどが渡辺¹⁾、若林・中村ら²⁾、梶本ら³⁾などの研究で報告されている。このようなひずみ速度効果は、鋼構造物が地震などにより大きな載荷速度を受けたときの挙動を予測する上で重要な問題である。

しかし、地震時における鋼構造物の動的挙動は部材だけではなく接合部の力学的性能に支配されることが多く、接合部の力学的性質に及ぼすひずみ速度の影響を知ることが重要である。鋼構造物においては部材間の接合方法として溶接およびボルト接合が一般的であるが、高速度で外力を受ける場合の接合部の挙動を鋼素材の実験結果から予測するのは困難である。このような観点から、金彗・甲津ら^{4),5)}により高速引張力を受ける各種鋼構造接合部の力学的性質の変化を調べた実験的研究が報告されており、各種継手の高速引張載荷時の力学的挙動が鋼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が指摘されている。

また現在の耐震設計では、稀に発生する大地震に対しては構造物の一定レベルの塑性変形を許容しており、塑性域内での挙動によるエネルギー消散によって鋼造物が地震エネルギーを吸収することを意図した設計がなされている。従って、ひずみ速度の影響を受けやすい塑性域での素材あるいは接合部の力学的挙動を知る上で、繰返し荷重下における影響を把握することも重要となってくる。

渡辺¹⁾は、一定応力振幅での正弦波両振り載荷実験を行い、動的繰返し下での鋼素材の復元力特性について調べている。また、沼田^{6),7)}は高力ボルト摩擦接合部に着目し、荷重制御による正弦波両振り載荷実験を

行い、繰返し載荷によるボルト軸力の低下特性および摩擦係数の変動特性について調べている。いずれも正弦波振動数をパラメータとして最大載荷速度を変えた場合の影響についても言及しているが、定速度下での挙動についてはふれられていない。

本研究では、一定ひずみ速度・一定変位振幅下で高速繰返し力を受ける鋼素材および突合せ溶接接合部、高力ボルト摩擦接合部、中ボルトせん断型接合部の各種鋼構造接合部の力学的性質の変化を実験的に調べ、ひずみ速度の影響、単調引張と繰返し載荷との相違点に着目して各々の履歴特性を調べた。

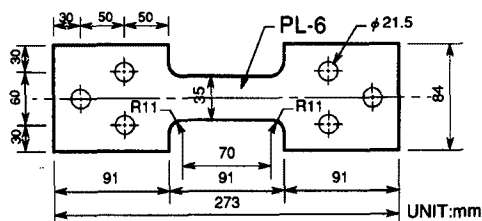


Fig. 1. Test specimen (TYPE-A).

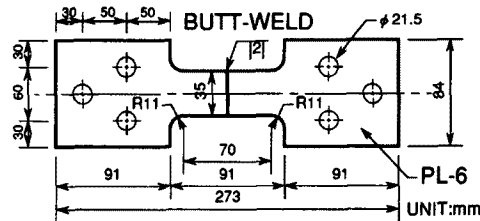


Fig. 2. Test specimen (TYPE-B).

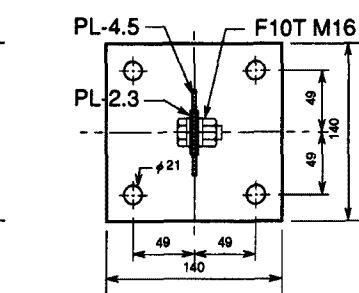
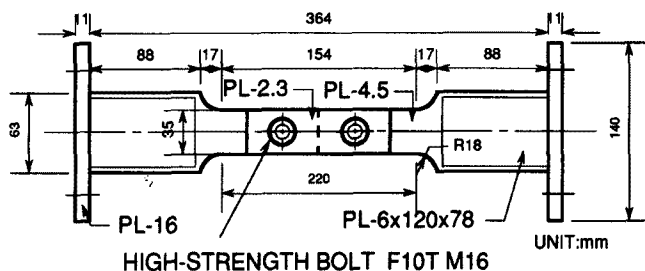


Fig. 3. Test specimen (TYPE-C).

2. 実験概要

2.1 試験片

本研究では鋼素材ならびに鋼構造接合部として一般的な、突合せ溶接接合部、高力ボルト摩擦接合部、および溶融亜鉛メッキされた中ボルト接合部を取り上げ、4種の試験体を用意した。

鋼素材の特性を知るための母材試験体 (TYPE-A) は Fig. 1 に示すように、JIS 規格の標準引張試験片を基に両端の握み部を載荷装置に合わせた形状とし、板厚 6 mm、幅 50 mm、平行部長さ 100 mm の JIS 規格 SS 400 鋼製である。静的引張試験により得た母材の機械的性質は以下の通りである。

上降伏点	358.1 MPa	(3.651 tonf/cm ²)
下降伏点	346.4 MPa	(3.532 tonf/cm ²)
引張強度	458.8 MPa	(4.678 tonf/cm ²)
破断伸び	34.18%	

突合せ溶接接合部試験体 (TYPE-B) は Fig. 2 に示すように、母材試験体と同じ形状・寸法・鋼材であり、試験体中央部を切断した後、ルートギャップ 2 mm の I 型開先による突合せ溶接により接合されている。

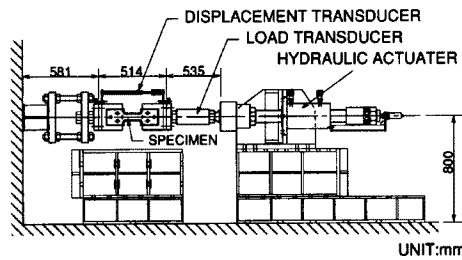


Fig. 4. Loading apparatus used for high speed cyclic loading test.

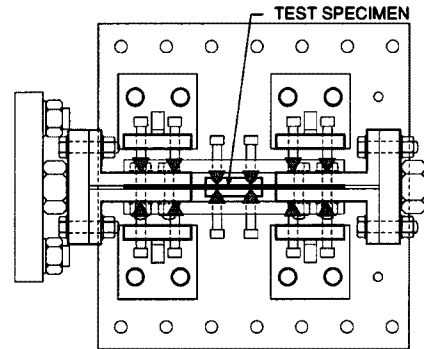
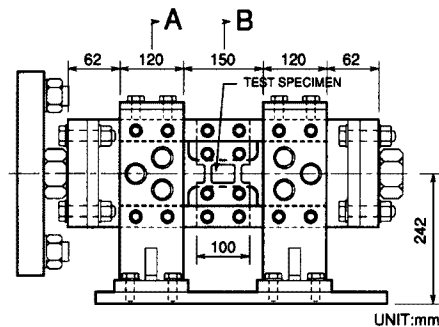
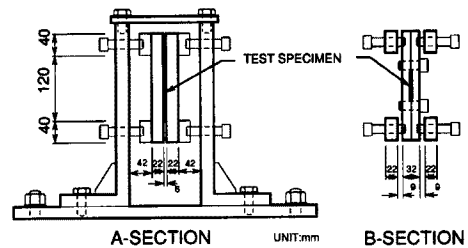


Fig. 5. Plan of test setup of the specimen.



(a) Side view



(b) Sectional view

Fig. 6. Test setup of the specimen.

TYPE-A, B 試験体は、いずれも両端部でそれぞれ3ヶ所、F10T M20 高力ボルトを用いて載荷装置に摩擦接合される。

高力ボルト摩擦接合部試験体 (TYPE-C) は Fig. 3 に示す形状・寸法である。被接合材は板厚 4.5 mm, 幅 50 mm の SS 400 鋼材で、板厚 2.3 mm の 2 枚のスプライスプレートで挟み、F10T M16 ボルトで接合した 2 面せん断型接合部である。

中ボルトせん断型接合部試験体 (TYPE-D) は TYPE-C と同形状・同寸法の 2 面せん断接合部である。ボルトは SS 400 鋼級の M16 中ボルトで、ボルト、被接合材、スプライスプレートいずれも溶融亜鉛めっき処理を施してある。

TYPE-C, D 試験体は試験体端部に板厚 16 mm のプレートに溶接し、4 本の F10T M20 高力ボルトにより載荷装置に引張接合される。また、試験体平行部以外には板厚 6 mm のプレートを溶接して板厚を増して補強されている。

2.2 実験方法

実験には Fig. 4 に示すような、載荷変位速度と繰返し変位振幅を一定値に制御できる油圧サーボ型アクチュエータを用いた。試験体の一端は反力壁に高力ボルトで取り付けられ、他端は荷重計を挟んでアクチュエータに取り付けられている。

繰返し載荷実験では、さらに圧縮載荷時の試験体座屈を防ぐため Fig. 5, Fig. 6 に示すような座屈を防止するための治具を取付けた。Fig. 5 平面図に▲で示すように、試験体平行部および試験体両端の掴み部を両側からプレートで挟み、面外変形をしないようにした。Fig. 6 はその側面図および断面図である。

各試験体は破断までの単調引張載荷実験と一定振幅の正負交播繰返し載荷実験の2種類をそれぞれ行っ

た。載荷速度はアクチュエータの移動速度で制御し、単調・繰返しそれぞれ5, 15, 25, 35 mm/sec の4段階の設定速度で載荷した。いずれも、同一条件での実験を2体の試験体で行って実験の正確さを期した。また、繰返し載荷における設定変位振幅は、母材および溶接接合部実験で4 mm、ボルト接合部実験で6 mmとし、いずれも正負5回の繰返し載荷を行った。

実験中の計測項目は、アクチュエータと試験体の間に取り付けた荷重計による載荷荷重、試験片つかみ部に取り付けた高周波差動トランス型変位計による載荷方向変位、試験体中央に取り付けたひずみゲージによる歪量であり、それぞれ載荷速度に応じて200~1000 Hzのサンプリング周波数で計測した。さらに計測後にデジタルフィルタにより高周波ノイズを除去したデータを用いて以下に結果を示す。

3. 実験結果・考察

3.1 載荷速度について

実験における実際の載荷速度を実験データから見る。一例として、Fig. 7に母材試験体を設定速度35 mm/secで単調引張載荷した結果を示す。横軸を時間(sec)にとり、上より載荷荷重(kN)、変位計により計測した試験体全体の伸び(mm)、ひずみゲージにより計測した試験体中央部の局所伸び(%)をそれぞれ縦軸にとったもので、各曲線の勾配が載荷速度を示す。なお、ひずみゲージは5%が計測の上限であり、それ以上の値は計測されていない。

Fig. 7の時間軸0.17 sec付近の荷重に1つのピークが見られるが、これは鋼材の上降伏点を示しており、また、時間軸0.30 sec付近の谷はひずみ硬化開始点を示している。変位計ならびにひずみゲージの計測値はいずれも降伏点の前後で勾配が変化しているのが観察され、弾性域と塑性域でひずみ速度が異なっているのが認められる。また、ひずみゲージの計測値ではひずみ硬化開始点前後でも勾配の変化が認められるが、

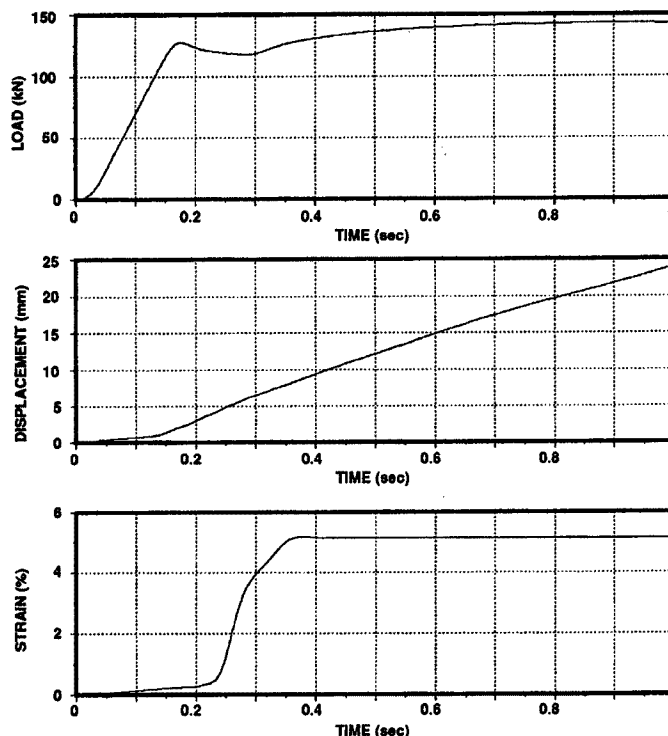


Fig. 7. Example of load, displacement and strain time history.
(TYPE-A specimen, monotonic loading, strain rate 35%/mm).

変位計の計測値では認められない。これは試験体の中央部局所で塑性伸びの著しい降伏棚域に入り、その後、塑性領域が随時両端部へ進展することによるものと考えられる。

本研究では、ディテールの異なる各種接合部試験体を統一した手法で取り扱う必要があるため、ひずみ速度（载荷速度）の計測値としては、局所の挙動を除外して変位計による全体の伸び量で評価するのが適切であると判断される。

Fig. 8 には母材単調引張载荷実験における各試験体の载荷速度を示す。各実験の変位計出力を弾性域と塑性域に分けて最小2乗近似により速度を求め、縦軸に弾性域、横軸に塑性域でひずみ速度 (%/sec) をそれぞれ示したものである。Fig. 8 に示されるとおり、弾性域と塑性域でのひずみ速度の間には各試験体で線形な関係が成り立つと考えられる。そこで、次章以後では降伏点以後の塑性域での挙動に着目するため、変位計出力による塑性域でのひずみ速度をもって実験結果を比較検討することにする。

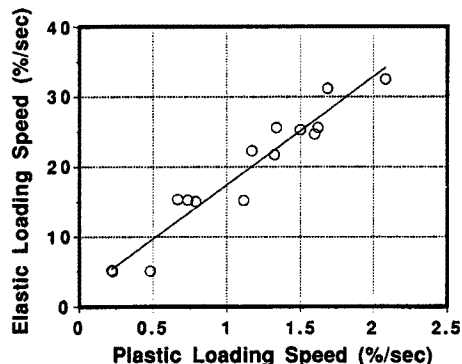
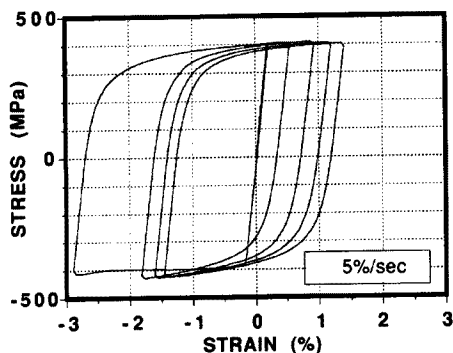


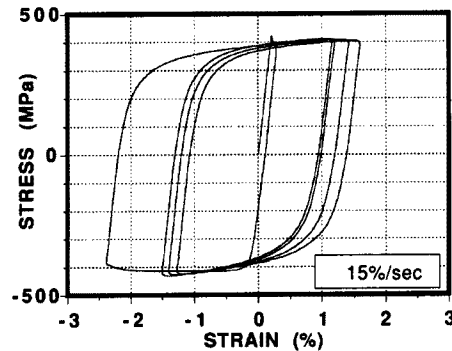
Fig. 8. Relations between loading speed in elastic range and loading speed in plastic range.

3.2 母材

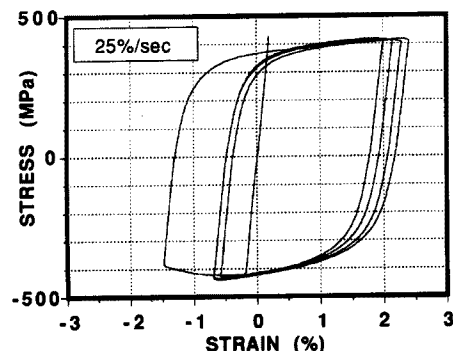
Fig. 9(a)~Fig. 9(d) に母材試験片の繰返し载荷実験から得た応力度歪度関係を示す。ひずみ振幅は約2%で、ひずみ硬化開始点近傍までの弾塑性域にわたる。いずれの载荷速度でも第1サイクルの圧縮側で明瞭な降伏点を示した。第2サイクルからは定常履歴ループを描き、ひずみ硬化による応力度の上昇が観察



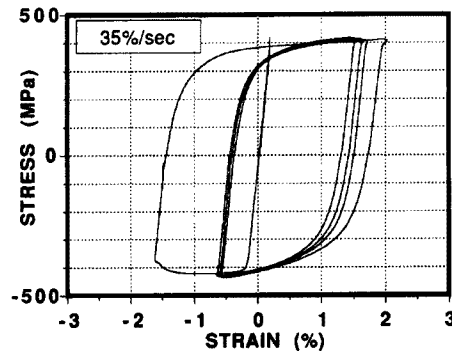
(a) Strain rate 5%/sec.



(b) Strain rate 15%/sec.



(c) Strain rate 25%/sec.



(d) Strain rate 35%/sec.

Fig. 9. Stress-Strain diagrams of base metal specimens (TYPE-A).

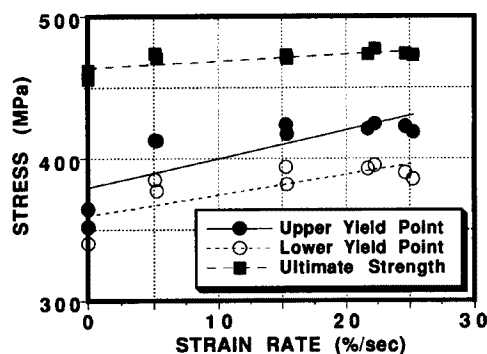


Fig. 10. Relations between strain rate and mechanical properties obtained from monotonic loading tests of base metal specimens.

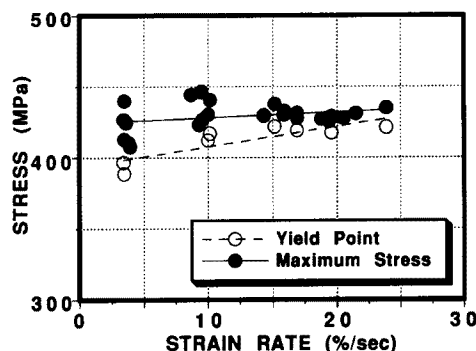


Fig. 11. Relations between strain rate and mechanical properties obtained from cyclic reversed loading tests of base metal specimens.

される。

Fig. 10 に単調引張試験から得た、上降伏点 (●)、下降伏点 (○)、破断強度 (■) とひずみ速度の関係を示す。既往の研究結果と同様に、いずれもひずみ速度に比例して上昇する傾向が観察される。本実験では特に上下降伏点の上昇が顕著であり、引張強度の上昇は比較的緩慢であった。

Fig. 11 には、繰返し載荷実験から得た第1サイクルにおける降伏点 (○) および第2サイクル以後の定常ループにおける最大応力度 (●) とひずみ速度との関係を示す。単調載荷実験の結果と同様に降伏点の上昇が顕著である。一方、定常ループにおける最大応力度はほとんどひずみ速度の影響を受けていない。

これらの結果から、初載荷時の降伏点はひずみ速度の影響を受けるが、 $\pm 2\%$ 程度のひずみ領域では、繰返し履歴による吸収エネルギーはひずみ速度の影響をほとんど受けないと考えられる。これは、降伏棚が、ひずみの変化に対して応力度の変化が比較的鈍感なひずみ領域であることも一因であると考えられる。

3.3 突合せ溶接接合部

Fig. 12(a)～Fig. 12(d) に溶接接合部試験片の繰返し載荷実験から得た応力度歪度関係を示す。ひずみ振幅は約1%で、ひずみ硬化開始前までの弾塑性域にわたる。母材実験と同様にいずれの載荷速度でも第1サイクルの圧縮側で降伏を示し、第2サイクルから後は定常履歴ループを描く。

Fig. 13 に単調引張試験から得た、上降伏点 (●)、下降伏点 (○)、破断強度 (■) とひずみ速度の関係を示す。Fig. 14 には、繰返し載荷実験から得た第1サイクルにおける降伏点 (○) および第2サイクル以後の定常ループにおける最大応力度 (●) とひずみ速度との関係を示す。

いずれも母材実験結果と同様の傾向を示している。これは、単調引張実験において、破断箇所が溶接部近傍の母材であったことから、溶接接合部の実験結果は母材の特性を示しているものと考えられる。本実験による限り、母材よりも強度の高い通常の突合せ接合部においては特に母材と異なる傾向は観察されなかった。

3.4 高力ボルト摩擦接合部

Fig. 15(a)～Fig. 15(d) に高力ボルト摩擦接合部の繰返し実験結果を示す。第1サイクルにおいて摩擦限界に達し、滑りが発生した後に摩擦型から支圧型の応力伝達が変わる。以後のサイクルにおいてはほぼ定常状態に入る。第1サイクルにおける滑り荷重と比較すれば第2サイクル以後の滑り荷重は顕著に低下するのが認められる。

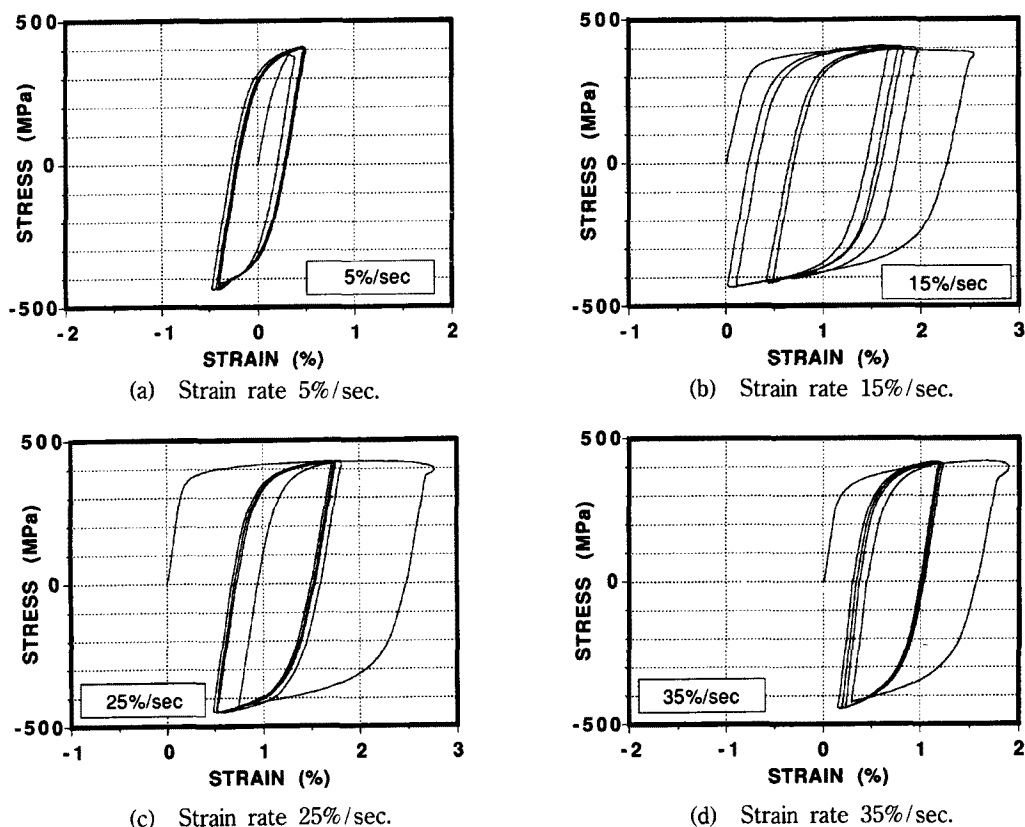


Fig. 12. Stress-Strain diagrams of butt-welded specimens (TYPE-B).

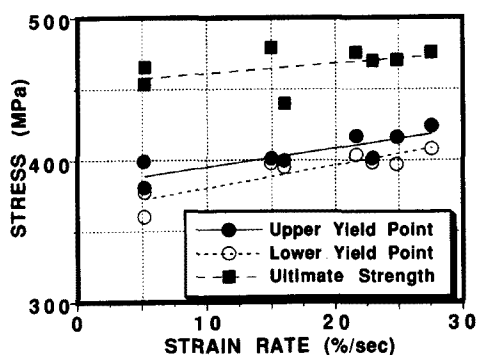


Fig. 13. Relations between strain rate and mechanical properties obtained from monotonic loading tests of butt-welded specimens.

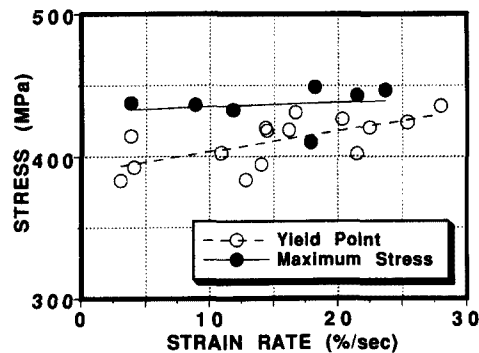


Fig. 14. Relations between strain rate and mechanical properties obtained from cyclic reversed loading tests of butt-welded specimens.

3.5 中ボルトせん断型接合部

Fig. 16(a)～Fig. 16(d) に中ボルトせん断型接合部の繰返し実験結果を示す。第1サイクルにおいてはわずかな滑り対する抵抗が観察されるが、第2サイクル以後はすべり荷重は極めて低く、ほぼ定常履歴ループに入る。

Fig. 17 に2種のボルト接合部の繰返し実験から得た高力ボルト摩擦接合部の摩擦限界荷重 (○)、高力

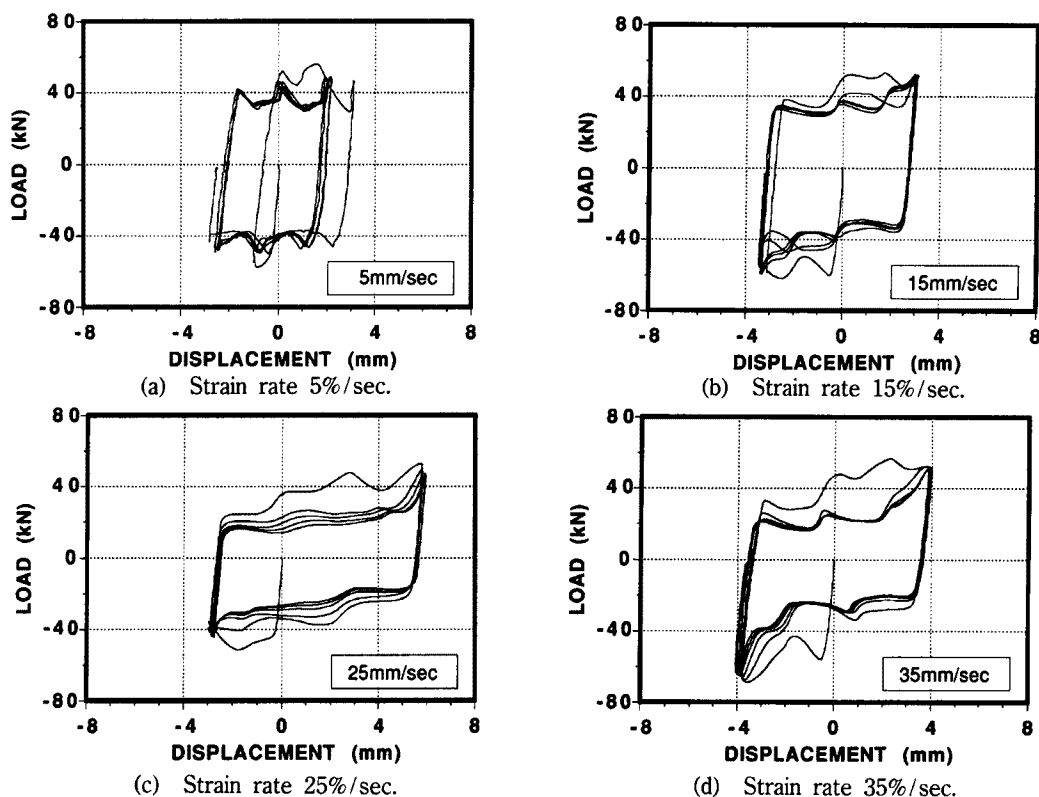


Fig. 15. Load-displacement diagrams of high-strength bolted specimens (TYPE-C).

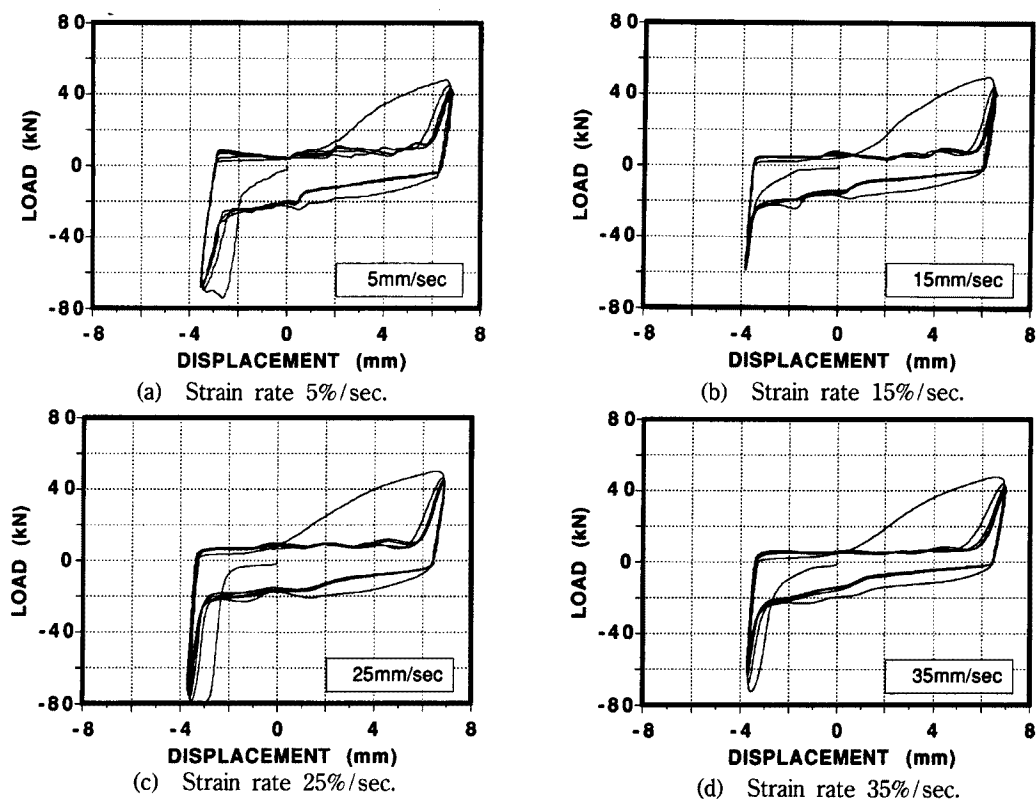


Fig. 16. Load-displacement diagrams of regular bolted specimens (TYPE-D).

ボルト摩擦接合部のすべり荷重 (●), 中ボルトせん断型接合部のすべり荷重 (□) と載荷速度の関係を示す。摩擦接合タイプでは、摩擦限界およびすべり荷重が載荷速度の影響を受けて顕著に低下するのが観察される。従って、この種の接合部が摩擦限界を超える繰返し荷重を受けた場合、載荷速度の増加に伴って履歴吸収エネルギーが顕著に低下することが明らかである。

また、中ボルトの滑り荷重はほとんど載荷速度の影響を受けず、極めて低いレベルであることが分かる。この種の接合部の履歴特性は支圧に達した後のボルト及び被接合材の塑性変形挙動が大きく影響する。

4. 結 論

鋼素材および各種鋼構造接合部の高速繰返し載荷実験を行い、約 5 %/sec～35%/sec の範囲でひずみ速度が履歴特性に及ぼす影響について調べた結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 鋼素材の降伏点・強度はひずみ速度に比例して上昇するが、約 2 %のひずみ振幅で描く定常履歴ループはひずみ速度の影響を受けなかった。従って、この程度のひずみ振幅では鋼材の塑性変形による履歴吸収エネルギーはひずみ速度の影響をあまり受けないと考えられる。また、ひずみ硬化域から最大耐力に至る範囲でのひずみ履歴を受けた場合には、ひずみ速度の影響を受けることも予想され、今後の研究が必要である。
- 2) 摩擦接合タイプのボルト接合部では、摩擦限界荷重、すべり荷重いずれも載荷速度に応じて顕著に低下し、また繰返しによるすべり荷重の低下も顕著である。このことから、高力ボルト摩擦接合による低層のブレーキ付きラーメン構造のように固有周期の短い鋼構造物は、摩擦限界を超える繰返し荷重下で、載荷速度の影響により構造物の履歴吸収エネルギーが著しく低下することが予想される。

参 考 文 献

- 1) 渡辺啓行：軟鋼の動的弾塑性復元力特性，第 3 回日本地震工学シンポジウム，1970，pp. 651-658.
- 2) 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 コンクリートと鋼材の応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響），日本建築学会論文報告集，第314号，1982年 4 月，pp. 102-111.
- 3) 榎本 勉・竹内 守・加藤良一・土本凱士・宮下克彦：高圧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.
- 4) 金冢 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-1，1985年 4 月，pp. 193-207.
- 5) 金冢 潔・甲津功夫・木上貴夫・藤井彰人：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，京都大学防災研究所年報，第30号 B-1，1987年 4 月，pp. 183-199.
- 6) 沼田明樹：すべり荷重を上回る動的繰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，1983年 2 月，pp. 63-72.
- 7) 沼田明樹：すべり荷重を上回る動的繰返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部の摩擦係数変動特性，日本建築学会論文報告集，第341号，1984年 7 月，pp. 37-44.

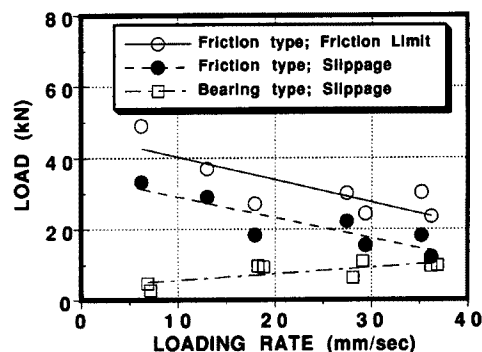


Fig. 17. Relations between loading rate and mechanical properties obtained from cyclic reversed loading tests of bolted specimens.