

論文 スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の力学特性

大西 弘志*1・西川 和一*2・下田 幸義*3・松井 繁之*4

要旨: 鉄筋コンクリート構造物改修工事の急速施工を対象として、スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手が新たに開発された。本研究ではこの溶接継手と従来の溶接継手であるガス圧接継手、エンクローズ溶接継手について、同一ロットの D16 異形鉄筋を用いて供試体を作成し、各種力学特性を調査、比較を行い、スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の実構造物への適用性が十分であることを確認した。

キーワード: 鉄筋溶接継手, スタッド溶接, 補修, 力学特性, 疲労耐久性

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の維持管理においては、部材に著しい損傷が確認された場合、損傷箇所を交換する手法がとられる。この場合、損傷箇所の鉄筋は切断され、既存の鉄筋と新しい鉄筋を、継手を介して接合しなければならない。鉄筋継手として最も一般的な重ね継手を採用した場合、継手を形成するために既設のコンクリートを大量にハツリ除去する必要がある、時間的、空間的に制約が大きい場合では大きな障害となる。特に、人口密集した都市内では、作業時の制約が厳しく、維持管理工事を円滑に実施するためには、短時間に狭い空間でも施工できる鉄筋継手の開発・適用が必要とされてきた。

以上のような状況に対処するための工法として、スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手（以下、「スタッド溶接継手」と呼ぶ）が開発された。この継手は従来のスタッド施工技術を踏襲しつつ、フェール等々に改良を加えることにより、鉄筋を対象とした溶接を可能にしたものであり、施工に必要なシステムは基本的に通常のスタッドと同じである。この溶接継手の施工に必要とされる溶接の時間は約 1 秒（/個）であり、従来の溶接継手が 20 秒（/個）程度必要とするのに対して格段に短い。また、従来の溶接継手で

は施工治具の大きさ等から既設の鉄筋を 300mm 程度露出させる必要があったが、本工法ではアースとフェール等の設置に必要な 30mm 程度の露出で十分であり、施工空間の縮小と鉄筋のはつり出し作業の大幅な低減が見込まれる。

以上のように、スタッド溶接継手は今後の適用に大きな期待がもたれる工法であるが、開発されてからの期間が短いために、その力学的特性、特に疲労に関する特性に関して不明な点が多い。そこで、本研究では橋梁の中でも損傷事例が多い床版を想定し、D16 鉄筋で溶接継手を作成し、各種試験を実施し、従来の溶接継手との比較・検討を行うことにした。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

(1) 検討対象とした溶接継手

本研究では新たに開発されたスタッド溶接継手の力学特性を既往の溶接継手と比較するために、以下の溶接継手を有する供試体を作成した。

①スタッド溶接継手

(スタッドベース (SB) 加工あり・なし)

②ガス圧接継手

③エンクローズ溶接継手

ここで、①の「スタッド溶接継手」のうち、今

*1 大阪大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 ダイヘンスタッド(株) 技術部

*3 松尾エンジニアリング(株) 構造保全部

*4 大阪大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

回の主な評価対象とした継手では、スタッド溶接を正確に行うために、新設側鉄筋の先端の形状を切削・調整している（以下、スタッドベース（SB）加工と呼ぶ）が、この加工が強度低下を招く恐れがあるので、これとは別に SB 加工による調整を行わなかった継手も作成し試験を行った。また、本研究ではスタッド溶接継手と比較するために、施工実績が溶接継手の中で最も多いと見られるガス圧接継手とアーク溶接を用いた溶接継手で一般的なものとしてエンクローズ溶接継手を有する供試体も作成し、試験を行った。これらの溶接継手の形状を図-1に示す。また、鉄筋継手付近の部位の名称を図-2のように定義する。

(2) 使用材料

本研究では、供試体を作製するにあたり、表-1に示す材料を使用した。また、製作にあたっては、各溶接継手の溶接上の観点から以下の組み合わせで供試体を作製した。

スタッド溶接継手：

SD345（既存側） - KDS490D（新設側）

ガス圧接継手・エンクローズ溶接継手：

SD345（既存側） - SD345（新設側）

ここで、スタッド溶接継手で新設側材料の素材を KDS490D としたのは、スタッド溶接を行う際に、新設側鉄筋に溶接性の良い金属を使用しなければ所要の性能を有する継手を作製できないからである。また、逆にガス圧接継手では鉄筋の種類を変えると良好な接合が得られないことから、既存側と新設側の材質を同じ SD345 に統一することにした。

2.2 基本性能試験概要

本研究では各鉄筋溶接継手の基本性能を把握するために引張試験、曲げ試験、シャルピー衝撃試験を実施することにした。以下に各試験の概要を示す。

(1) 引張試験

引張試験は「引張試験方法（JIS Z 2241）」に準拠して行った。試験は 2 号試験片（JIS Z 2201）を用いて実施した。試験片の全長は 400mm と

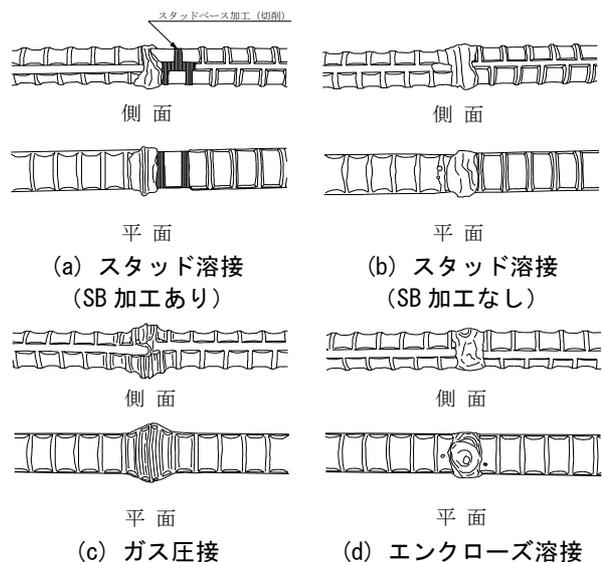


図-1 検討対象とした鉄筋溶接継手

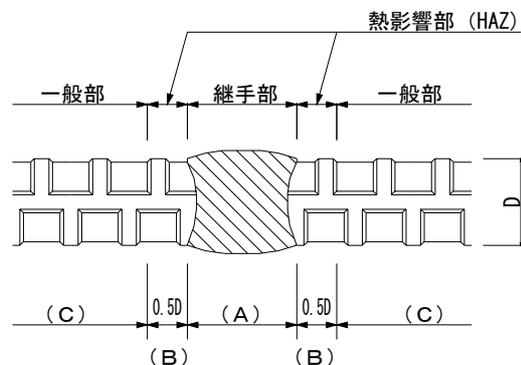


図-2 供試体部位に関する名称の定義

表-1 使用材料

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
SD345	411	588
(JIS規格)	345~440	490≦
KDS490D	428	554
(規格値)	345~440	490≦

し、継手部が供試体中央付近に位置するように供試体の製作を行なった。今回の試験では引張強度と降伏強度を確認し、JIS 規格値との比較を行い、十分な性能を保持しているか確認すると共に、また全ての供試体について、破断位置が鉄筋母材部か溶接継手部かを確認した。

(2) 曲げ試験

曲げ試験は「金属材料の曲げ試験方法（JIS Z 2248）」に準拠して行った。試験片の形状は JIS Z 2204-2 に準拠した、全長 400mm のものを用意した。今回の曲げ試験では試験片の溶接継手部を 90 度曲げ、溶接部に亀裂が生じないかどうかを観察した。

(3) シャルピー衝撃試験

通常、JIS に衝撃吸収エネルギーの規定が無い異形鉄筋に対しては、衝撃試験を実施しないのが普通であるが、本研究では疲労耐久性の簡易評価の指標として、衝撃吸収エネルギーが採用できるかどうかの可否を確認するためにシャルピー衝撃試験を実施した。試験は「金属材料の衝撃試験方法 (JIS Z 2242)」に準拠して行い、試験片は JIS Z 2202 に規定されている 4 号試験片を使用し、試験時の試験片温度を 0°C となるように管理して実験を行なった。今回の試験では試験片のノッチの位置はできるだけ溶接の継手部になるように調整を行なった。また、今回の実験では D16 を使用しているため、試験片の採取が困難な場合もあったので、サブサイズ試験片 (試験片断面 7.5mm×7.5mm) についても試験を行い、試験片寸法に関する検討も行なった。

2.3 疲労試験概要

本研究では、スタッド溶接継手の力学特性の中でも不明な点が多い、繰り返し荷重作用下での挙動を確認するために疲労試験を行った。以下に、今回実施した疲労試験の概要を示す。

(1) 载荷条件

今回の疲労試験では、得られた試験の結果を既往の研究の結果と比較しやすくするため、参考文献 1) - 3) に記載されている情報等を基にして以下のように決定した。

- 载荷形式 : 軸引張繰返し载荷
- 载荷方法 : 部分片振り
(下限応力 29.4N/mm²、最小振幅 98N/mm²)
- 载荷波形 : 正弦波
- 载荷速度 : 3~10Hz
- 上限繰返し回数 : 5,000,000
- 負荷制御 : 荷重制御

(2) 計測項目

これまでに制定されてきた鉄筋継手指針では、活荷重等の繰返し荷重作用下において、鉄筋の継手部に大きな塑性変形が生じないように規定している。これは、実構造物で繰返し荷重によって溶接継手部に塑性変形が生じると、周辺の

表-2 引張試験結果

	No.	強度 (N/mm ²)			破断位置
		降伏強度	平均	引張強度	
ガス圧接	1	386	389.0	588	(C)
	2	392		590	
	3	389		588	
エンクローズ溶接	1	389	386.7	590	
	2	386		587	
	3	385		587	
スタッド溶接 (SB加工あり)	1	401	394.7	532	KDS490D側 (B)
	2	387		545	
	3	396		541	
スタッド溶接 (SB加工なし)	1	415	398.7	545	KDS490D側 (C)
	2	391		547	
	3	390		547	

表-3 曲げ試験結果

	90° 曲げ試験結果		
	No. 1	No. 2	No. 3
ガス圧接	○	○	○
エンクローズ溶接	○	○	○
スタッド溶接 (SB加工あり)	○	○	○
スタッド溶接 (SB加工なし)	○	○	○

○: 割れの発生なし, ×: われの発生あり

コンクリートに影響を与え、構造物にとって重大な損傷となるためである。そこで、今回の試験では荷重載荷 5,000,000 回を経過しても破断しなかった供試体について、溶接継手部を含む区間の残留変形量を測定した。また、継手部を含む区間の鉄筋の弾性挙動が極端に変化することも望ましくないと考えられることから、継手部を挟む一定区間(区間長約 20mm)にクリップゲージを設置し、試験中の継手部付近の弾性挙動について調査を行なった。

3. 試験結果と考察

3.1 基本性能試験

(1) 引張試験

今回の引張試験で得られた結果を表-2に示す。破断した位置を考慮して、材料試験から得られている強度からの公称強度の低下率は

継手種類	降伏強度	引張強度
ガス圧接	5.4%	0.0%
エンクローズ溶接	5.9%	0.0%
スタッド溶接 (SBあり)	7.8%	2.6%
(SBなし)	6.9%	1.4%

となっており、スタッド溶接継手は他の継手より強度低下が大きいことがわかる。破断位置を確認すると、スタッド溶接継手 (SB加工なし) の試験では KDS490D の一般部 (C) で破断して

おり、その材料の降伏強度・引張強度が共にSD345のものとは異なることを勘案しなければならない。このことから、スタッド溶接継手と他の溶接継手の間の差のうち1.0～1.5%は鉄筋種の違いによる差であると判断される。またSB加工の有無による低下率の差(0.9～1.2%)は破断位置の変化と合わせて考えると、SB加工により生じる断面欠損の影響があると考えられる。以上のことから、スタッド溶接継手を有する鉄筋の公称強度は他の溶接継手よりも強度低下率が1.0%程度大きいものの、鉄筋の性能として問題となるほどの低下ではなく、強度の低下を最小限に抑制するにはSB加工を施さないことが望ましいことがわかる。

(2) 曲げ試験

曲げ試験の結果を表-3に示す。この表にも明らかなように、本研究で試験対象とした溶接継手はいずれも曲げによるわれを発生せず、十分な変形性能を有していることがわかった。

(3) シャルピー衝撃試験

本研究で実施したシャルピー衝撃試験の結果を表-4に示す。全体の傾向を確認すると、JIS試験片とサブサイズ試験片では試験対象面積の比がおよそ2:1となるが、試験結果の傾向は似たようなものとなっている。このことから、おおよその傾向を把握するのにサブサイズ試験片を使用しても支障は無い可能性が高い。しかし、吸収エネルギーの値を比較した場合、サブサイズ試験片から得られる値はJIS試験片より小さくなる傾向にあるので注意が必要である。

各溶接継手の吸収エネルギーの値を比較すると、大小の順序は

(ガス圧接継手)

< (スタッド溶接継手 (SB加工あり))

< (スタッド溶接継手 (SB加工なし))

< (エンクローズ溶接継手)

となっている。ガス圧接継手のエネルギー値が低いのは溶接金属等の吸収エネルギー値を改善するための材料を一切使用していないためであり、エンクローズ溶接のエネルギー値が

表-4 シャルピー衝撃試験結果

供試体	No.	エネルギー(J)		試験温度(°C)	試験片サイズ
		試験結果	平均		
スタッド溶接 (SB加工あり)	1	28.77	24.25	0	JIS試験片 10mm×10mm
	2	24.82			
	3	19.17			
スタッド溶接 (SB加工なし)	1	30.79	43.22		
	2	57.48			
	3	41.40			
エンクローズ溶接	1	64.77	65.59		
	2	64.77			
	3	67.24			
ガス圧接	1	15.58	18.08		
	2	24.82			
	3	13.85			
KDS490D	1	162.06	135.16		
	2	123.10			
	3	120.33			
SD345	1	24.82	23.06		
	2	15.58			
	3	28.77			
スタッド溶接 (SB加工あり)	1	22.90	18.07	サブサイズ 7.5mm×7.5mm	
	2	12.15			
	3	19.17			
スタッド溶接 (SB加工なし)	1	37.06	40.20		
	2	52.75			
	3	30.79			
エンクローズ溶接	1	55.10	56.72		
	2	62.31			
	3	52.75			
ガス圧接	1	17.36	16.17		
	2	15.58			
	3	15.58			
KDS490D	1	117.57	112.98		
	2	109.31			
	3	112.06			
SD345	1	22.90	22.90		
	2	22.90			
	3	22.90			

KDS490Dの半分程度に達しているのは溶接金属部の吸収エネルギー値を計測する結果になったためである。スタッド溶接継手ではSB加工の有無にかかわらず、吸収エネルギー値のばらつきが他の継手よりも大きい。これはスタッド溶接継手ではSD345とKDS490Dという吸収エネルギー値が全く異なる鉄筋を接合していることが原因である。今回の試験でスタッド溶接継手の試験片から得られたデータのうち、少なくともガス圧接継手の値と同等、もしくはそれ以下の値を示したもの(スタッド溶接継手(SB加工あり)のサブサイズ試験片No.2など)についてはノッチの位置が継手の継手部ではなく、SD345側の熱影響部になっていたと推定される。このことを考慮してスタッド溶接継手の継手部の吸収エネルギーを再度確認するとスタッド溶接継手の継手部の吸収エネルギー値はおおよそ30～60Jの範囲に分布すると推定される。以上のことから、スタッド溶接継手の継手部に関しては十分な吸収エネルギー値が確保できている可能性が高いと思われるが、SD345側の熱影響

部で吸収エネルギーが小さい値を取る可能性がある
るので注意が必要である。

3.3 疲労試験

本研究ではこれまでに合計 25 体の供試体について疲労試験を終了している。表 - 5 にこれまでに得られた疲労試験結果の概要を示し、これより得られる S-N 関係を図 - 3 に示す。

通常、鉄筋継手の疲労試験では S-N 図の縦軸に全振幅応力 (σ_{2a}) を用いることが多いが、今回の試験ではスタッド溶接継手で 2 種類の鉄筋を接合して使用していることから、縦軸に上限応力比 (σ_{max}/σ_{sy}) を用いて試験の結果を表示することにした。ここで、上限応力比の算出に用いた σ_{sy} は次のとおりである。エンクローズ溶接継手とガス圧接継手では引張試験時に得られた降伏荷重から算出した値を使用した。スタッド溶接継手では破断位置が SD345 側であるものに関しては、SD345 の降伏荷重を用い、破断位置が KDS490D 側にあるときには引張試験で得られた降伏荷重から算出した値を用いた。これはスタッド溶接継手を有する供試体の引張試験時の破断位置が常に KDS490D 側にきているのに対し、疲労試験では SD345 側で破断した供試体数と KDS490D 側で破断した供試体数の比が SB なしで 2 : 1、SB ありでは 4 : 1 となっているため、全てのデータを片側の材料強度で無次元化して整理することには無理があると判断したためである。

供試体の破断位置はスタッド溶接継手とエンクローズ溶接継手では(B)の範囲内、特に溶接止端近傍で破断していることが多い。この部位は溶接継手の熱影響部にあたる場合が多く、溶接時の熱影響で鉄筋の材質が変化している影響であると考えられる。これに対し、ガス圧接継手では図 - 2 で示した(A)と(B)の境界付近、形状変化の始点付近 (図 - 4 参照) で破断が発生していることが多い。ガス圧接継手では継手付近を広範囲にわたって加熱するので、他の溶接継手と比較して(B)の範囲で溶接による加熱・冷却の速度が緩やかになり、他の部分と比較して明

表 - 5 疲労試験結果概要

継手	略称	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)	破断回数	備考
スタッド溶接 (SBなし)	S1-1	196.0	273500	
スタッド溶接 (SBなし)	S1-2	147.0	1768320	
スタッド溶接 (SBなし)	S1-3	171.5	951250	
スタッド溶接 (SBなし)	S1-4	122.5	2394270	
スタッド溶接 (SBなし)	S1-5	98.0	2816350	
スタッド溶接 (SBなし)	S1-6	98.0	1499220	
スタッド溶接 (SBあり)	S2-1	196.0	387650	
スタッド溶接 (SBあり)	S2-2	171.5	1021040	
スタッド溶接 (SBあり)	S2-3	147.0	405550	
スタッド溶接 (SBあり)	S2-4	122.5	5000000	未破壊
スタッド溶接 (SBあり)	S2-5	122.5	2804640	
スタッド溶接 (SBあり)	S2-6	147.0	531320	
エンクローズ溶接	S3-1	196.0	209250	
エンクローズ溶接	S3-2	171.5	313310	
エンクローズ溶接	S3-3	147.0	416320	
エンクローズ溶接	S3-4	122.5	1593990	
エンクローズ溶接	S3-5	98.0	1798200	
エンクローズ溶接	S3-6	98.0	5000000	未破壊
ガス圧接	S4-1	196.0	350160	
ガス圧接	S4-2	171.5	633980	
ガス圧接	S4-3	147.0	5000000	未破壊
ガス圧接	S4-4	220.5	560190	
ガス圧接	S4-5	98.0	5000000	未破壊
ガス圧接	S4-6	147.0	742100	
ガス圧接	S4-7	220.5	317190	

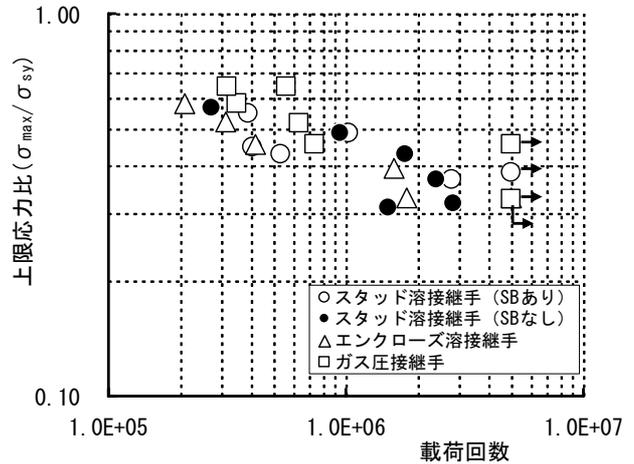


図 - 3 S - N 関係図

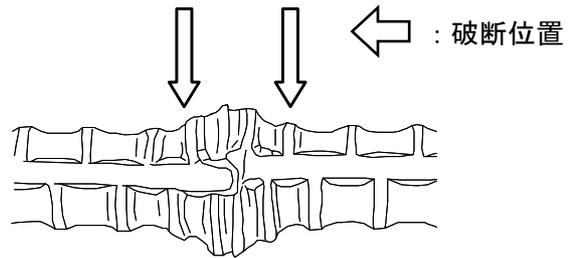


図 - 4 ガス圧接継手の破断位置

らかに硬化している部位が発生しにくいため、材質の変化による影響が小さくなり、形状変化による影響が卓越するためであると考えられる。また、残留変形を調査した結果では、発生した塑性変形はきわめて小さく、問題となるような塑性変形は確認されなかった。

各溶接継手の S - N 関係についてみてみると、

図 - 3 に示されるようにデータが混在しており、傾向の違いを把握することは困難であると思われるので、各溶接継手の疲労試験結果について回帰曲線を求め、比較を行うことにした。今回使用した曲線は以下に示すものである。

$$(\sigma_{\max} / \sigma_{sy}) = A \times N^B \quad (1)$$

ここで、 σ_{\max} : 最大応力 (N/mm²)

σ_{sy} : 降伏強度 (N/mm²)

N : 供試体疲労寿命 (回)

A, B : 係数

この結果得られた曲線を図 - 5 に示す。この図を見ると、スタッド溶接継手 (SB あり) の曲線の傾きが他の溶接継手と異なっているが、これは上限応力比 0.43、0.45 で試験した供試体の寿命が上限応力比 0.49 で試験した供試体の 50% 程度であったことによる影響であり、この 2 点を除いて計算を行うと、係数 B が -0.124 から -0.200 に変化し、他の溶接継手の曲線と同様の傾きになることを確認した。以下の考察ではこの修正された S - N 曲線を用いることにする。しかしながら、このデータの乱れの原因は現時点で不明であり今後検討を行う必要がある。

スタッド溶接継手とエンクローズ溶接継手を比較すると、スタッド溶接継手の曲線は SB 加工の有無にかかわらず、エンクローズ溶接の上方に位置している。このことからスタッド溶接継手は D16 のような細径鉄筋の接合においてはエンクローズ溶接継手よりも良好な疲労耐久性を示すことがわかる。ガス圧接継手との比較を行うと、上限応力比が 0.6 以上となる範囲ではガス圧接継手が相対的に良好な結果を残しているが、0.45~0.6 の範囲においてはガス圧接継手とスタッド溶接継手は同等の疲労寿命を保持している。以上のことから、スタッド溶接継手の疲労耐久性は既存の溶接継手と同等とみなしても良いことがわかる。

また、図 - 5 とシャルピー衝撃試験結果 (表 - 4) を比較した結果、応力比の大小により各継手の疲労寿命の大小が逆転することや、応力比が 0.3~0.6 の範囲では衝撃試験結果と疲労試

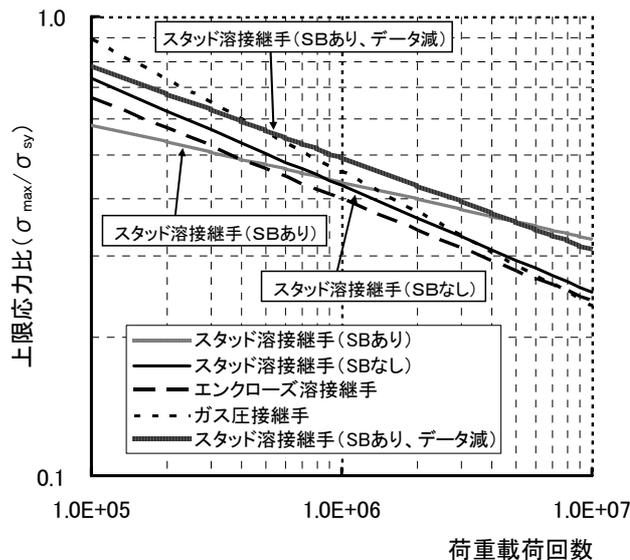


図 - 5 S - N 曲線

験結果の間に関係があるとは判断できないことから、現在の手法のまま簡易評価法として使用することは困難であることがわかった。

4. 結論

本研究において実施された一連の実験の結果から得られた結論を以下に示す。

- 1) 同一ロットの鉄筋を用いて鉄筋溶接継手の作製と各種性能試験を実施した結果、スタッド溶接継手は既往の溶接継手と同等の性能を持っていることがわかった。
- 2) 鉄筋溶接継手の継手部の衝撃吸収エネルギーを継手の疲労耐久性の簡易評価指標とすることは困難である。

謝辞

本研究で使用した供試体の製作にあたり、太陽圧接(株)に多大の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) 土木学会：鉄筋継手指針，コンクリートライブラリー 49，1982.2
- 2) 土木学会：鉄筋継手指針(その 2)，コンクリートライブラリー 55，1984.9
- 3) 土木学会：鉄筋の自動エンクローズ溶接継手設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー 89，1997.10