

# 論文 圧接鉄筋の疲労性状

山中 憲行<sup>\*1</sup>・林 貞夫<sup>\*2</sup>・岡村 雄樹<sup>\*3</sup>・舌間 孝一郎<sup>\*4</sup>

**要旨** : 2002年, 首都高速の鋼製橋脚が溶接部で疲労破壊したことが報告された。RC 構造物でも, 「ガス圧接」された鉄筋の熱影響部が疲労破壊する危険性がある。本研究では圧接鉄筋の疲労試験を行った。疲労寿命が200万回以上を確保できる, 圧接鉄筋の応力度は144MPa程度であった。疲労寿命が200万回以内であれば, 普通鉄筋の応力度に対する圧接鉄筋の応力度の比率(疲労応力比)は0.7で十分安全側の値となる。疲労寿命は, 空気より熱伝導率が大きい材料で被覆されると気中試験の結果より延びる。このことは, 破断時における温度上昇が気中試験のときより小さいことが関係していると思われる。

**キーワード** : 圧接鉄筋, 疲労, 応力履歴, 疲労応力比, 熱伝導率

## 1. はじめに

2002年, 首都高速の高架部を支える鋼製橋脚において, 溶接部が疲労破壊したことが報告された。熱影響部は, 鉄筋コンクリート構造(以下, RC)でも, 鉄筋がガス圧接された部分に存在し疲労破壊を検討する必要がある。ガス圧接した鉄筋は, 疲労寿命に関する研究はある<sup>1)</sup>がそれ以外の研究はほとんどなく, 定量的な評価が早急に必要である。

本研究では, 圧接鉄筋の疲労試験を行い疲労性状を考察する。パラメーターとして, 圧接の有無, 応力履歴, 荷重速度, 試験時の温度, 鉄筋に対する被覆の有無(熱伝導率)を考える。

ところで, コンクリートに被覆された鉄筋の疲労寿命は気中試験の結果より延びることがわかっている<sup>2)</sup>が, その理由についてはわかっていない。このことも併せて検討する。

## 2. 実験概要

試験体は, 鉄筋 D19(SD345)を使用し, 手動ガス圧接技量資格者(4種)がガス圧接した鉄筋(以下, 圧接鉄筋)と, ガス圧接をしていない鉄筋の直棒(以下, 普通鉄筋)を使用した。加力は油圧

サーボ試験機で行い, 鉄筋の両端部をつかみ刃によって固定し荷重を加えた。疲労試験は, 夏期(室温 36 ) ~ 冬期(室温 11 )の間に行った。

**表-1**に静的試験による材料特性を示す。材料特性は, 疲労試験は期間が長く温度変動があったため温度を考慮した。降伏強度, 引張強度の平均値は388MPa, 568MPaであった。降伏強度, 引張強度は温度による差が僅かにみられた。

**表-2**に試験体一覧を示す。パラメーターとして, 圧接の有無, 応力履歴, 荷重速度, 試験時の温度, 熱伝導率を考えた。試験体数は31体とした。応力波形は一定応力振幅の正弦波を用いた。応力は正の値を引張, 負の値を圧縮とした。応力履歴の上限応力および下限応力を降伏強度の約半分(180MPa)で除したものを「上限値」および「下限値」と呼び, 「上限値」から「下限値」を引いたものを「振幅値」と呼ぶ。なお, 上記の180MPaは疲労寿命200万回を基に規定した許

表-1 材料特性

室温 (度)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
11	396	578	$1.88 \times 10^5$
36	379	558	$1.84 \times 10^5$
平均	388	568	$1.86 \times 10^5$

- \*1 前橋工科大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)
- \*2 前橋工科大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
- \*3 前橋工科大学助教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)
- \*4 前橋工科大学助手 工学部建設工学科 工博 (正会員)

容応力度<sup>3)</sup>に相当する。

引張力および圧縮力が疲労寿命に与える影響を考察するため、応力履歴は、下限値がゼロ(以下, Dシリーズ), 上限値が1.0(以下, Uシリーズ), 振幅値が1.0(以下, Aシリーズ)を考えた。

周波数は10Hzを基本として, 荷重速度が疲労寿命に与える影響を考察するため, 周波数3Hzの試験も行った(以下, Sシリーズ)。

通常は室温下の試験であるが, 温度が疲労寿命に与える影響を考察するには一定温度下の試験が望ましい。しかし, 室温下の試験は気中試験であるため疲労試験中の温度変動を避けられない。そこで, 試験体の温度を, 一定温度に保持できる温度制御装置を作った。試験体の温度は5 と40 を考えた。装置の一部を図-1に示

す。装置は, ホースに温度制御した水を通し, このホースを鉄筋に巻き付けたものである。試験体温度を確認するため圧接部に熱電対を貼った(室温下の試験でも比較のため熱電対を貼った)。この装置は, 試験体が疲労亀裂により発熱してもホース内の水が空気より熱伝導率の大きい

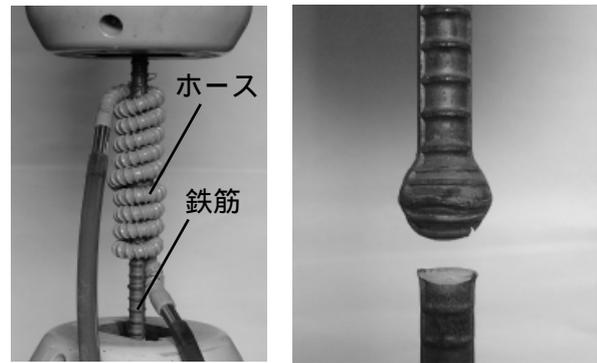


図-1 温度制御装置 図-2 圧接部の破断状況

表-2 試験体一覧

シリーズ名	パラメーター	圧接	応力履歴			荷重速度 (Hz)	温度	疲労寿命 (回)	破断箇所	
			上限値*	下限値*	振幅値**					
Dシリーズ	応力履歴	有り	下限値一定 (完全片振り)	0.0	1.5	10	室温	130, 190	圧接部	
					1.5			154, 109		
					1.2			320, 547		
					1.0			561, 084		
					1.0			839, 736		
					0.8			2,000, 000		
					0.7			3,500, 000		
		無し		1.5	2,000, 000	152, 523				
				1.5		219, 320				
				1.2		965, 602				
				1.2		1,045, 057				
				1.0		2,000, 000				
						つかみ部				
						破断せず				
Uシリーズ	応力履歴	有り	上限値一定	1.0	10	室温	147, 641	圧接部		
							-1.0		2.0	327, 749
							-0.8		1.8	214, 144
							-0.5		1.5	169, 654
							0.2		0.8	332, 800
										305, 051
										654, 535
Aシリーズ	振幅値一定	有り		1.5	10	室温	755, 997	つかみ部		
				0.5			2,000, 000			
				-0.2			1.0		2,000, 000	
Sシリーズ	荷重速度			1.0	3	室温	420, 429	圧接部		
				0.0			1.0		713, 043	
									2,000, 000	
Tシリーズ	試験時の温度 および 熱伝導率				10	5	858, 111	圧接部		
							1.5		1.5	173, 748
										290, 526
							0.0			352, 303
							1.0		1.0	2,000, 000
										2,000, 000

\* この値は, 鉄筋に作用している応力度を180MPaで割った値で, 正の値を引張, 負の値を圧縮とする。

\*\* 振幅値は, 上限値から下限値を引いた値とする。

め熱を吸収し試験体の温度上昇を抑制する効果はあるが、破断直前は試験体を一定温度に保持できず温度上昇があった(参照:図-10)。ホースは鉄筋の応力を全く負担しないので、この装置によって作り出される鉄筋の環境は、付着が全くないコンクリートによって鉄筋が被覆されている状態と仮定しても良いと思われる。以下では、温度制御した試験体をTシリーズと呼ぶ。試験区間は、通常は200mmと、Tシリーズのみ300mmとした。

### 3. 疲労性状

#### 3.1 破断位置

表-2に破断位置を、図-2に圧接部の破断状況を示す。破断位置は、圧接部、つかみ部、圧接部とつかみ部の間(中間部)、のいずれかであった。なお静的試験では、破断位置は、全ての試験体において、中間部であった。圧接部の破断は、疲労試験をすることで起こり、熱影響や形状的な影響があったものと思われる。

#### 3.2 「圧接部の有無」による影響

「圧接部」の影響について、Dシリーズ(完全片振り)を用いて考察を行う。図-3にDシリーズの疲労寿命を示す。破断箇所は、「圧接鉄筋」では「圧接部」で、「普通鉄筋」では「つかみ部」であった。なお、図-3~5の中で、楕円の線に囲まれた点は全て同じ試験体を表し、上限値1.0の完全片振りの試験体である。

同一の上限値における「圧接鉄筋」と「普通鉄筋」の疲労寿命を比較すると、上限値1.5ではほぼ同じ値であったが、上限値が1.5より小さくなると「圧接鉄筋」と「普通鉄筋」の差は広がった。疲労寿命は、上限値1.5程度までならば「圧接鉄筋」は「普通鉄筋」より短い、といえる。

疲労寿命200万回以上となる上限値は、「圧接鉄筋」では0.8程度(応力度144MPa)、「普通鉄筋」では1.0程度(応力度180MPa)であった。このときの、「普通鉄筋」の応力度に対する「圧接鉄筋」の応力度の比率(以下、疲労応力比)を取ると80%程度であった。

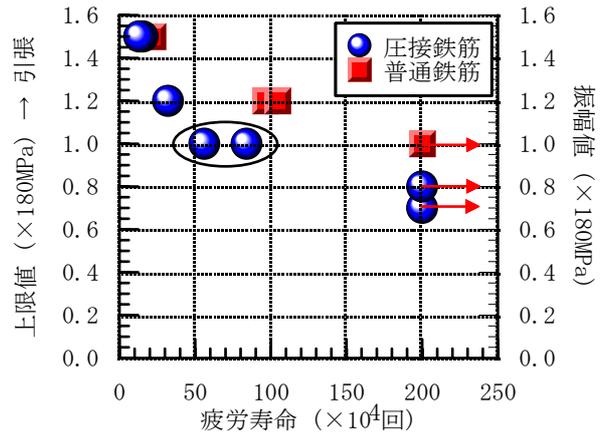


図-3 Dシリーズの疲労寿命

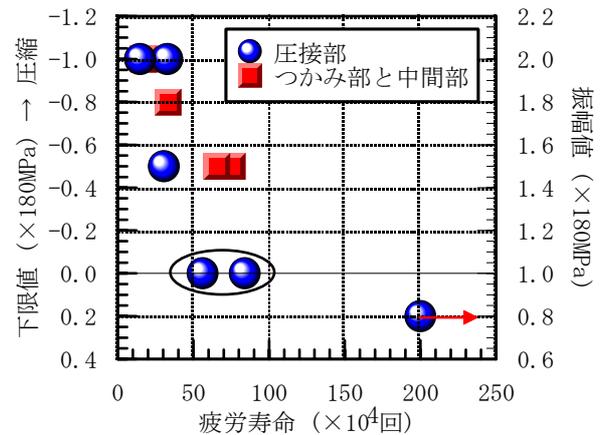


図-4 Uシリーズの疲労寿命

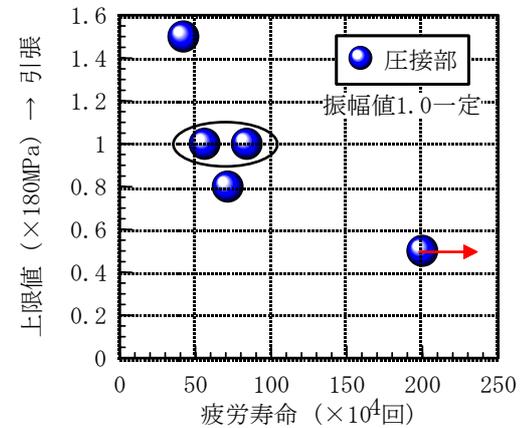


図-5 Aシリーズの疲労寿命

#### 3.3 「応力履歴」による影響

##### (1) Dシリーズ

疲労寿命は、上限値が小さくなるにつれ指数関数的に延びた。引張力が若干小さくなるだけでも疲労寿命には大きな影響を与えることがわかる。

##### (2) Uシリーズ

Uシリーズでは圧縮力が疲労寿命に与える影響を考察する。図-4にUシリーズの疲労寿命を示

す。上限値は1.0に設定した。破断箇所は、「圧接部」、「つかみ部」、「中間部」であった。「圧接部」以外の破断は、この疲労寿命まで「圧接部」が破断しないことを表している。

下限値が-1.0からゼロになるにつれ、即ち、振幅値が小さくなるにつれ、疲労寿命は延びた。従って、疲労寿命は圧縮力による影響がある、といえる。

振幅値を変える方法には上限値もしくは下限値を変える方法があるが(図-3および図-4)、疲労寿命は、上限値を大きくする場合(引張応力を大きくした場合)の方が下限値を小さくする場合(圧縮応力にした場合)より短くなる。

### (3) Aシリーズ

Aシリーズでは、振幅値が同一(振幅値1.0)の場合に疲労寿命がどのように変化するかを考察する。図-5にAシリーズの疲労寿命を示す。破断位置は圧接部であった。疲労寿命は上限値が下がるにつれ、上限値1.5~0.8までは徐々に延びていったが、上限値0.8を境に急激に延びた。このことから、上限値の引張応力を圧縮方向に少しだけシフトさせることで、疲労寿命が格段に延びる領域があることがわかる。

### 3.4 「荷重速度」の影響

図-6に、上限値1.0片振り時の荷重速度の比較を示す(SシリーズとDシリーズの比較)。全ての試験体において、圧接部が破断した。疲労寿命は、荷重速度3Hz~10Hz程度ではほとんど差がなく、荷重速度による影響はみられなかった。

### 3.5 「試験時の温度」による影響

図-7に、Tシリーズの上限値1.5と上限値1.0の疲労寿命を示す。Tシリーズの応力履歴は完全片振りである。破断箇所は圧接部であった。疲労寿命は、上限値1.5では試験体温度40の方が5のときより長く、上限値1.0では両温度とも載荷回数200万回では破断しなかった。温度による影響は、上限値1.5ではみられたが、上限値1.0では試験体が破断しなかったのでわからなかった。なお、今回は一定温度に制御された試験のみを考察したが、今後は温度変動を考慮した試

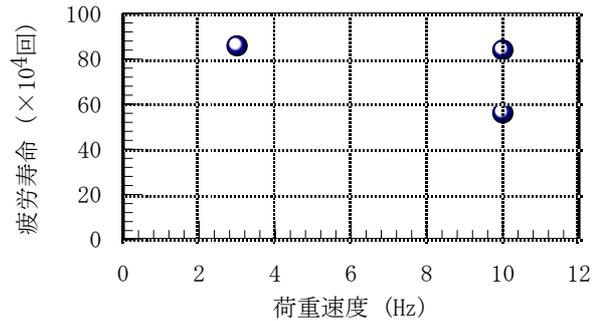
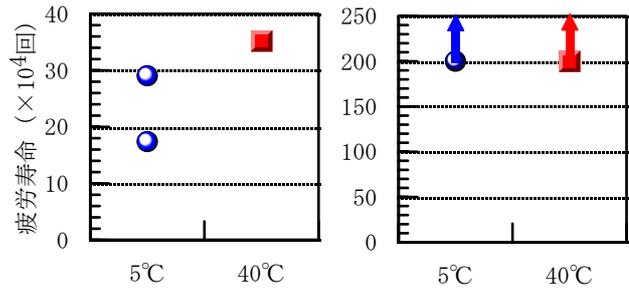
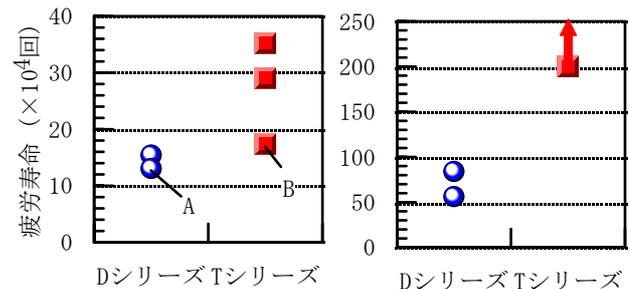


図-6 荷重速度の影響



(1) 上限値1.5 (2) 上限値1.0

図-7 温度の比較



(1) 上限値1.5 (2) 上限値1.0

図-8 DシリーズとTシリーズの比較

験を行う予定である。

### 3.6 「熱伝導率」の影響

熱伝導率の違いを、気中試験を行った(熱伝導率が小さい)「Dシリーズ」と温度制御を行った(熱伝導率が高い)「Tシリーズ」を用いて比較する。その比較結果を図-8に示す。

上限値1.5および1.0の両方において、疲労寿命はDシリーズよりTシリーズの方が明らかに長かった。疲労寿命に差が出た理由として次のようなことが考えられる。

亀裂先端は、繰返し応力による引張塑性変形が起こっている。引張塑性変形が起こる時、静的引張試験からもわかる通り温度上昇がみられる(図-9)。亀裂先端は当然、塑性域であるから

試験体の温度は上昇するはずである。そこで、圧接部に貼った熱電対から疲労試験時の温度変化を測定した。その結果を図-10に示す。試験体は

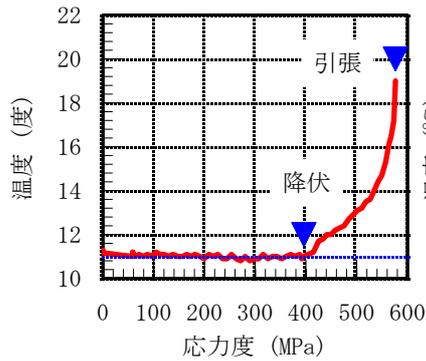
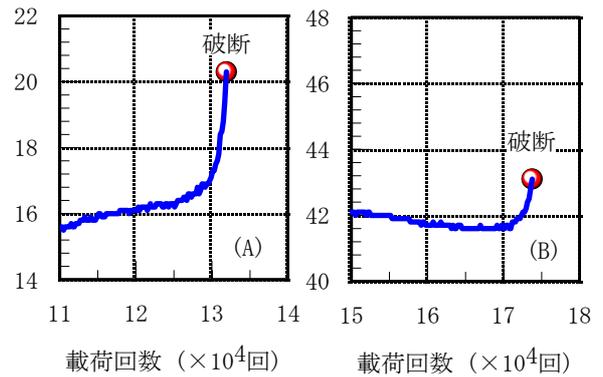


図-9 静的試験時に測定した温度 - 応力度関係

図-8のA点とB点である。縦軸の温度は、左右の図で対象温度は異なるがスケールは同じである。Dシリーズの室温下(正確には15.5)では、破断時に20.3まで温度が上がり破断前に比べると4.8上がった。一方、Tシリーズの温度40(正確には41.8)では、温度制御により破断前に温度が若干低下していたが、破断時に43.1まで温度が上がり破断前に比べると1.3しか上がらなかった。これは、空気に比べて熱伝導率が高い材料で被覆されたため温度上昇があまり起こらなかった。温度上昇量の減少は、試験体の外部に熱エネルギーが放出されてしまい、放出した熱エネルギーが試験体内部に蓄積されない。温度の上昇量の違いから、疲労寿命は延びたと考えられる。従って、疲労寿命は、熱伝導率が高い材料で被覆されると延びる。このことから、コンクリートで鉄筋が被覆されると疲労寿命が気中試験のときより延びる理由として、コンクリートが空気より熱伝導率が高いことが関係しているのではないか、と思われる。

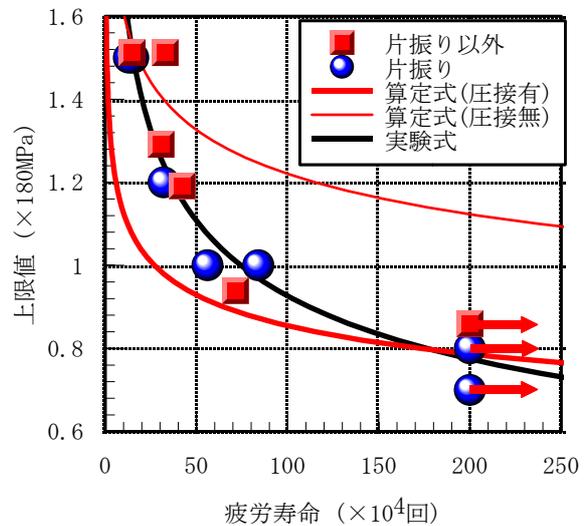
#### 4. 疲労寿命式の検討

現在、疲労寿命算定式<sup>3)</sup>(以下、算定式)が提案されている。この算定式について、Tシリーズを除く圧接部で破断した試験体の結果を用いて評価する。種々の応力履歴を、算定式では修正Goodmanの関係を用いて完全片振りに変換し上限値を推定できる。完全片振り以外の試験体の応力履歴を修正Goodmanの関係によって完全片振

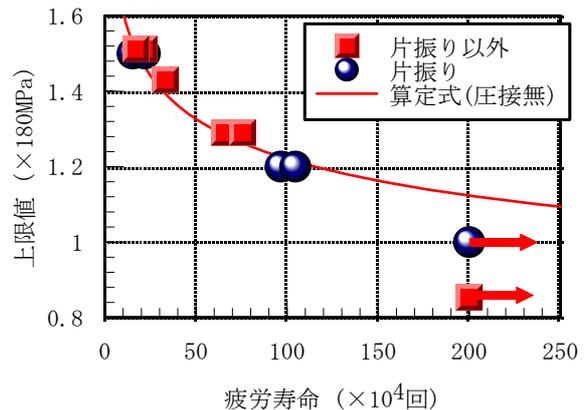


(1) 温度 15 (2) 温度 40

図-10 破断までの温度変化状況 (上限値 1.5 の完全片振り)



(1) 圧接部で破断した圧接鉄筋



(2) 普通鉄筋および圧接部以外で破断した圧接鉄筋

図-11 補正後の疲労結果 (修正 Goodman の関係に基づく)

りに補正したものに、完全片振りの試験体を併せたものを図-11に示す。「片振り以外」の試験体と「片振り」の試験体の点はほぼ重なって

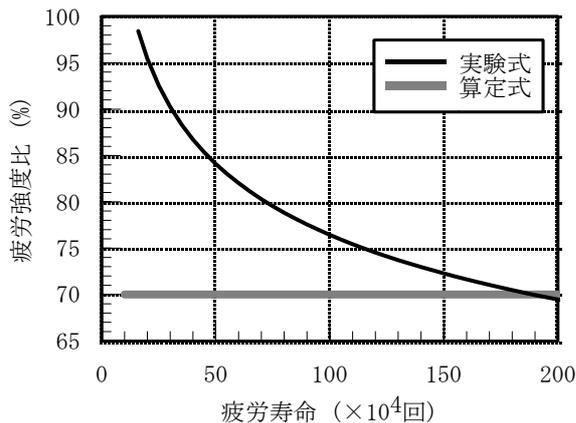


図-12 疲労応力比

た。修正Goodmanの関係による補正は妥当であった。

算定式は圧接部が有る場合と無い場合を分けて求められる。図-11に、算定式の「圧接有」と「圧接無」の場合を示す。「圧接有」の算定式と実験結果の疲労寿命を比較すると、算定式は上限値が小さい領域では精度良く推定できたが、上限値が大きい領域では精度が極端に悪かった。むしろ、「圧接無」の算定式の方が精度良く推定できた。これは、算定式が一律、振幅値に関係なく「疲労応力比」を70%としているからである。

ここで、「圧接部」以外の破断は「普通鉄筋」の破断とみなし、これに「普通鉄筋」で破断したものを含めたものを算定式(圧接無)による推定を行う。推定した結果、実験値の点は算定式の線上にあった(図-11)。実験値は、算定式によって推定が可能である。

そこで、振幅に応じた「疲労応力比」を検討するため、圧接部で破断したものを対象にバスキンの式を用いて最小自乗法により疲労寿命式を求めた(以下、実験式)。実験式は以下のようになった。

$$\sigma \cdot N^{0.258} = 10^{3.77} \quad (1)$$

σ: 上限値 × 180 (MPa), N: 疲労寿命 (回)

図-11に実験式を示す。実験式は、実験結果を精度良く推定できた。実験式の線は算定式の「圧接有」と「圧接無」の線の間を通り、上限値1.5

程度の疲労寿命は実験式と算定式(圧接無)が、上限値0.8以下では実験式と算定式(圧接有)がほぼ同じであった。

図-12に、算定式(圧接無)の上限値に対する実験式の上限値の比率を取った「疲労応力比」を示す。実験式の疲労応力比は、疲労寿命15万回では約98%であり、疲労寿命が15万回から延びるにつれ小さくなり、疲労寿命200万回では70%まで低下し実験式と算定式の値は一致する。疲労応力比は、疲労寿命に応じて決める必要があると思われる。

## 5. まとめ

ガス圧接したD19(SD345)の疲労試験を行い、以下の知見を得た。

疲労寿命200万回以上を確保できる、圧接鉄筋の応力度は144MPa程度であった。

疲労寿命が200万回以内であれば、普通鉄筋の応力度に対する圧接鉄筋の応力度の比率(疲労応力比)は、0.7で十分安全側の値となる。しかし、合理的な設計を目指すのであれば、疲労応力比は疲労寿命に応じて変化させる方が良い。

空気より熱伝導率の大きい材料(コンクリートなど)で被覆されると、疲労寿命は気中試験の結果より延びる。このことは、破断時における温度上昇が気中試験のときより小さいことに関係していると思われる。

疲労寿命は、応力履歴や熱伝導率による影響が大きく、それに比べると荷重速度の影響や定温下であれば温度の影響は小さい。

## 参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 前田昭一, 岡村甫: 異形鉄筋の疲労強度算定式, 土木学会論文集, 第354号, Vol.2, pp.73-79, 1985.2
- 2) 西林新蔵ほか: 海水中におけるRCはりの疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.2, pp.279-284, 1992
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書構造型能照査編, 2002.3