

高強度鋼溶接継手部の疲労強度と 疲労強度向上法

穴見健吾¹・三木千寿²・山本晴人³・樋口嘉剛⁴

¹正会員 工修 東京工業大学助手 大学院土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³学生会員 工修 東京工業大学 大学院土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
(現 前田建設工業株式会社)

⁴学生会員 工修 東京工業大学 大学院土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)
(現 株式会社大林組)

溶接継手部の疲労強度特性について、鋼材強度依存性および継手寸法依存性について多くの疲労試験結果を整理することにより検討を行い、鋼材が高強度化するに伴い、設計上より疲労に対する配慮、強いては疲労強度を向上させる必要があることを示した。更に代表的な止端部処理であるTIG処理、グラインダー処理、ハンマーピーニング処理について、その効果を検討するとともに、その効果の鋼材強度依存性、及び継手寸法依存性についても検討を行った。

Key Words : *fatigue strength, high strength steel, size effect, fatigue strength improvement, toe treatment*

1. はじめに

近年、鋼橋の合理化に関し、設計・施工・維持管理技術や鋼材自体の性能向上、及びその利用技術開発など様々なアプローチでの研究が行われている¹⁾が、その一つに鋼橋への高強度鋼材の適用が挙げられる。高強度鋼の適用により鋼重の低下及びそれに伴う輸送コスト、製作コストの低下など多くの効用が期待できる可能性がある。我が国でも、1974年の港大橋に始まり、本州四国連絡橋といった長大橋の一部にHT70、HT80といった高強度鋼が実際に用いられた実績はあるが、近年、製鋼技術・鋼材性能が格段に進歩しているにも拘わらず、依然として中小橋梁を含めた鋼橋全般に渡っては中軟鋼程度の鋼材が使われているのが現状である。我が国の道路橋示方書²⁾では引張強度が400MPa～570MPa程度の強度範囲の鋼材を標準として定めている。そのため今後、鋼橋の合理化の一手法として鋼材を高強度化していくためには、その効用を明らかにし、問題点についてはその解決策を検討し明示する必要がある。

使用鋼材を高強度化することによる効用についての研究として、効用を鋼重の低下で表した鋼橋の試

設計が行われている。本間³⁾、高橋・三木⁴⁾は実鋼道路橋を例に、AASHTOのLRFDを用いて試設計を行い鋼材の高強度化と鋼重低下の関係を示しており、疲労設計を行わない場合には高強度化に伴い鋼重の低下は望めるが、溶接継手部の疲労強度を考慮した場合には設計上疲労がクリティカルとなり、ある程度の鋼材強度以上では高強度化による鋼重の低下は望めないことを示している。これらの試設計では、AASHTOのLRFDやJSSCの疲労設計指針を用いて溶接継手部の疲労照査を行っているが、溶接継手部の疲労強度は鋼材強度が向上しても疲労強度が変化しないとしている。鋼材強度の高強度化は鋼桁をスリム化し大きな作用応力に部材が耐え得ることを期待しているが、作用応力の増大はすなわち変動応力の増大を意味するため、高強度化しても変化しない溶接継手部の疲労問題が設計上クリティカルとなることは明らかである。

溶接継手部の疲労強度特性の大きな特徴として、前述した①疲労強度の鋼材強度非依存性⁵⁾⁶⁾と②疲労強度の継手寸法依存性(寸法効果)⁷⁾⁸⁾が挙げられる。これらの特徴についてはこれまで多くの研究がなされている。また、近年の大型疲労試験結果では

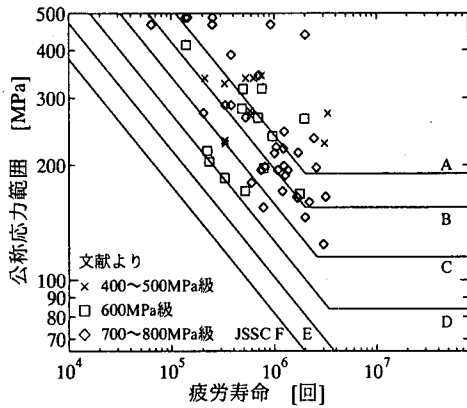


図-1 疲労試験結果
(縦方向溶接継手：小型継手試験体)

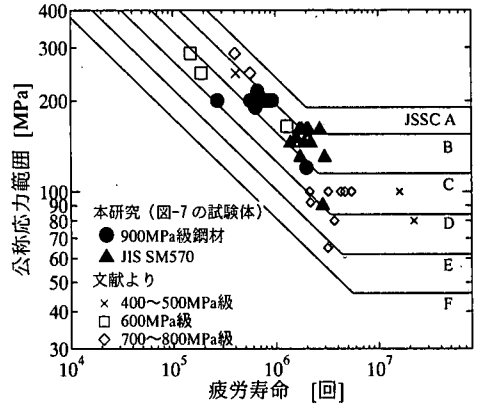


図-2 疲労試験結果
(縦方向溶接継手：桁試験体)

鋼材強度が向上すると疲労強度が低下する、所謂逆依存性も報告されている¹⁰⁾。逆依存性のメカニズムについては未だ明らかにされていないが、鋼橋へ高強度鋼を有効活用した場合に生じる疲労問題を明らかにするためには、実大スケールの継手も含めた溶接継手部、特に高強度鋼溶接継手部の疲労強度特性について、明らかにする必要がある。本研究では、著者らのこれまで行った疲労試験結果を中心に、鋼橋に用いられる代表的な溶接継手形式である縦方向溶接継手（ウェブフランジ首溶接）、十字溶接継手（垂直補剛材）、面外ガセット継手（ウェブガセット）に対して行われた疲労試験結果を整理し、鋼材強度や継手寸法に対する依存性に注目しながら、溶接まま継手の疲労強度特性について検討した。

高強度化するに伴い疲労強度が設計上クリティカルになるため、高強度鋼を有効利用するためには溶接継手部の疲労強度を向上させる必要がある。溶接継手部の疲労強度向上法、特に本研究で対象とする止端部処理法^{11)~19)}についてはこれまで多くの研究がなされているが、その多くは中軟鋼程度の鋼材の小型継手試験体を用いたものが多く、止端部処理の効果を高強度鋼材を用いた大型溶接桁試験体により検討した例は非常に少ない²⁰⁾。本研究では、面外ガセット継手を用いて、TIG処理、ハンマーピーニング処理、グラインダー処理について、その効果に対する鋼材強度や継手寸法の影響について疲労試験により検討を行った。

2. 既存データに基づく溶接継手部の疲労強度の材料依存性の検討

鋼橋に用いられる代表的な溶接継手形式である縦

方向溶接継手、リブ十字継手、面外ガセット継手についての疲労試験結果を整理し、溶接継手部の疲労強度特性を整理し、特に鋼材が高強度化、継手が大型化した場合の疲労強度特性の変化について検討した^{21)~27)}。本整理では、各文献のデータをそのまま整理しているため、小型継手試験体では全て破断寿命を疲労寿命と定義してあるが、桁試験体では、破断寿命、もしくは、表面の亀裂長さがある長さとなったときの载荷回数を疲労寿命としている。（整理結果には図-7に示す試験体を用いて行った疲労試験結果も用いた。）

(1) 縦方向溶接継手

図-1に小型継手試験体の疲労試験結果を、図-2に桁試験体におけるウェブフランジ首溶接部の疲労試験結果を示す。ここでは疲労亀裂の発生した試験結果についてのみ整理している。小型継手試験体ではJSSC疲労設計指針で分類されているD等級を、収集したデータ全てが満足しており、桁試験体においても若干D等級を下回るデータも見られているが概ねD等級を満足しているといえる。すなわち明瞭な小型継手試験体と桁試験体との間の疲労強度の差異は見られていない。また、小型継手試験体、桁試験体において、両者とも明瞭な疲労強度の鋼材強度依存性は見られていないといえる。

(2) リブ十字継手

図-3に小型継手試験体の疲労試験結果を、図-4に桁試験体における垂直補剛材下端部を対象とした疲労試験結果を示す。小型継手試験体では、JSSC疲労設計指針でも分類されているJSSCのE等級を、収集データ全てが満足しており、また明瞭な鋼材強度依存性は見られていない。一方、桁試験体ではJSSCの

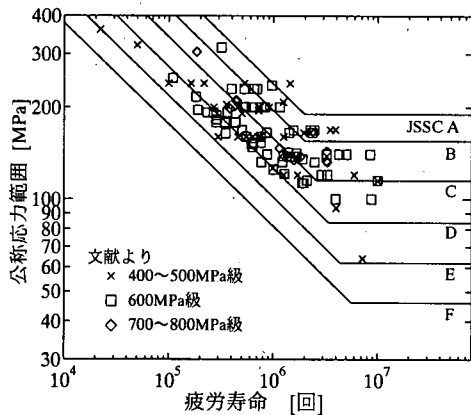


図-3 疲労試験結果
(リブ十字継手：小型継手試験体)

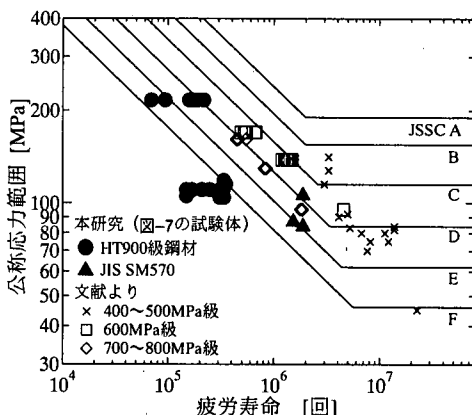


図-4 疲労試験結果
(リブ十字継手：桁試験体)

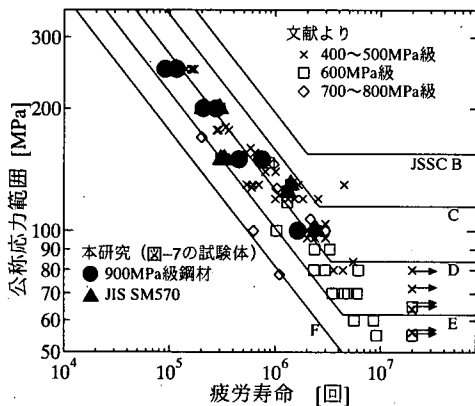


図-5 疲労試験結果
(面外ガセット継手：小型継手試験体)

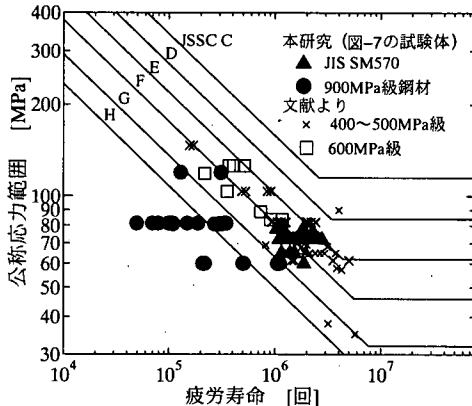


図-6 疲労試験結果
(面外ガセット継手：桁試験体)

E等級を下回るデータもあり、また材料強度逆依存性が現れている。

(3) 面外ガセット継手

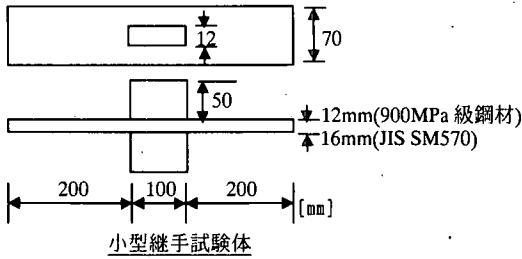
図-5に小型継手試験体の疲労試験結果を、図-6に桁試験体におけるウェブガセットを対象とした疲労試験結果を示す。小型継手試験体においてはJSSCで分類されるF等級を満足しており、また鋼材強度依存性も見られない。一方、桁試験体では小型継手試験体よりも大きく疲労強度が低下していることがわかる。また疲労強度の鋼材強度逆依存性が現れている。

これらの整理結果をまとめたものが表-1である。縦方向溶接継手試験体では、鋼材強度依存性、継手寸法依存性が小型、桁両試験体で明瞭には見られていない。本研究で収集した縦方向溶接継手の疲労試験データの殆どは、疲労亀裂が溶接ルート部もしくは内在する溶接欠陥から発生したものである。その

表-1 疲労試験結果の整理

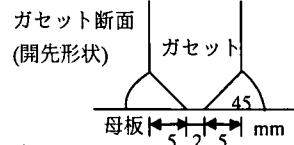
	小型継手試験体	桁試験体
縦方向溶接継手	JSSC-D 鋼材強度非依存	JSSC-D 鋼材強度非依存
リブ十字継手	JSSC-E 鋼材強度非依存	<JSSC-F 鋼材強度逆依存性 寸法効果
面外ガセット継手	JSSC-F 鋼材強度非依存	<JSSC-H 鋼材強度逆依存性 寸法効果

ため、縦方向溶接継手の疲労強度が鋼材強度や継手寸法よりも内在する溶接欠陥や溶接ルート部の状態などの溶接品質に大きく影響を受けた結果となったものと考えられる³⁹⁾。一方、リブ十字継手、面外ガセット継手といった面外付加物継手の場合、小型継手試験体では、鋼材強度依存性は見られていないが、桁試験体では小型継手試験体よりも疲労強度が低くなり、また鋼材強度逆依存性が現れていた。

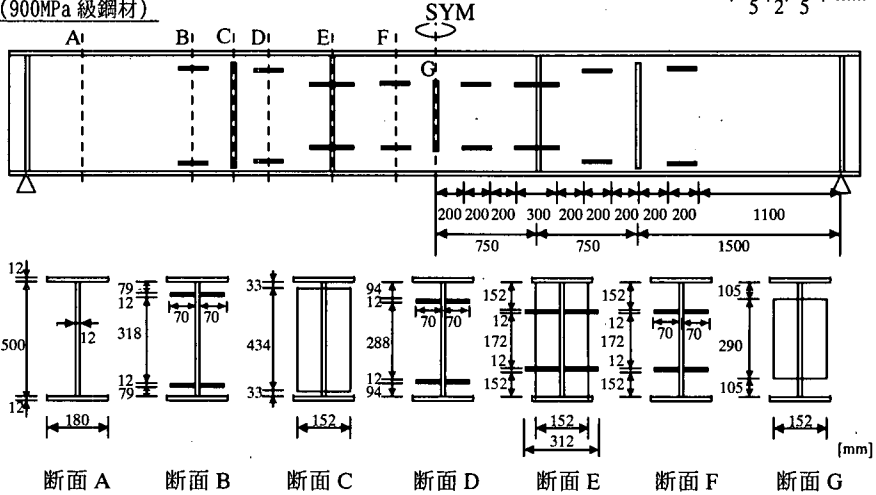


面外ガセット継手：部分溶込み溶接

	溶接材料	溶接条件
900MPa 級 鋼材	YM-80C	300A-29V 30cm/min
JIS SM570	L-60G	320A-28V 24cm/min



桁試験体 (900MPa 級鋼材)



桁試験体 (JIS SM570)

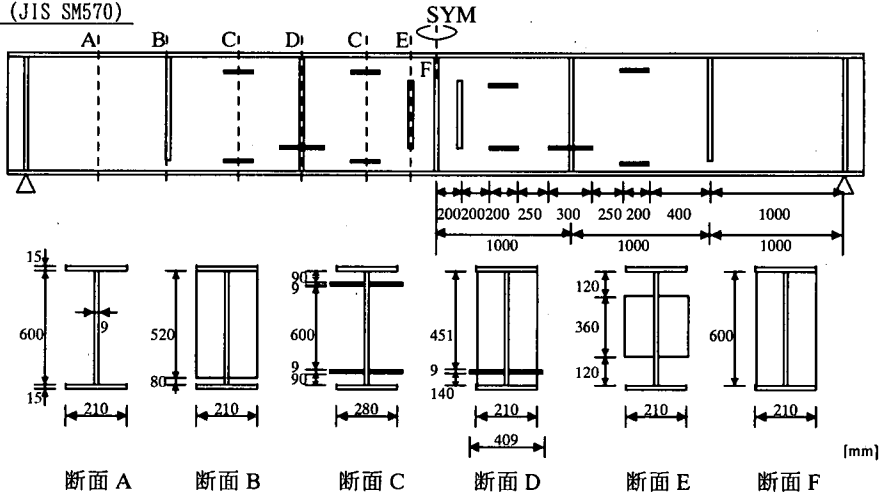


図-7 小型継手試験体と桁試験体，及び面外ガセットの溶接条件（面外ガセット継手）

3. 面外ガセット溶接継手の疲労強度特性

本研究で整理した3種類の継手形式の中で，最も寸法効果（本研究では小型継手試験体と桁試験体の疲労強度の差異），鋼材強度逆依存性が顕著に見られた面外ガセット継手に対して，小型継手試験体，桁試験体を製作し，より詳細な検討を行った．使用

鋼材は JIS-SM570 及び本研究のために試作した 900MPa 級高強度鋼であり，その機械的性質及び化学成分を表-2 に示す．図-7 に製作した試験体形状を示す．両鋼材を用いた試験体の形状の主な差異は母板厚（ウェブ厚）であり，その他の形状はほぼ同等である．過去の試験により止端部を改善すると溶接ルート部に疲労亀裂の発生位置が移るために，溶接

表-2 使用鋼材の機械的性質及び化学成分

機械的性質 [MPa, %]				化学成分 [Weight %]										
JIS SM570														
Y.S	T.S	El.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	
555	626	40	0.14	0.35	1.32	.009	.002	.001	0.02	0.03	0.01	---	---	
900MPa 級高強度鋼														
Y.S	T.S	El.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	
967	970	23	0.06	0.30	1.39	.006	.001	0.97	0.98	0.35	0.29	0.01	0.04	

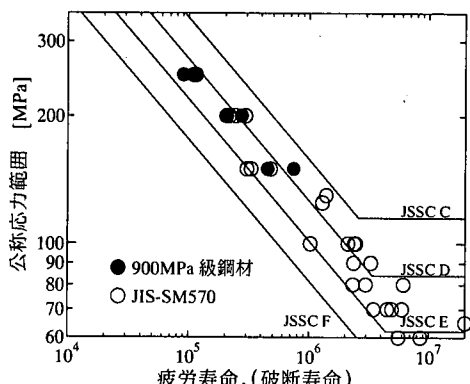


図-8 疲労試験結果 (小型継手試験体)

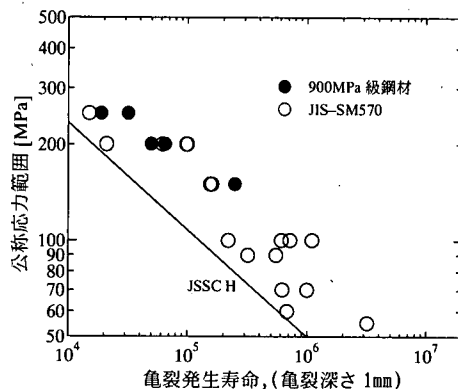


図-9 疲労試験結果 (亀裂発生寿命: 小型継手試験体)

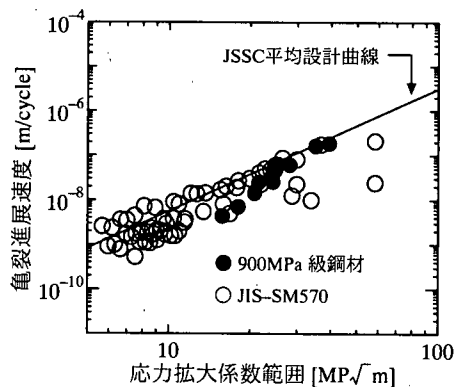


図-10 亀裂進展速度

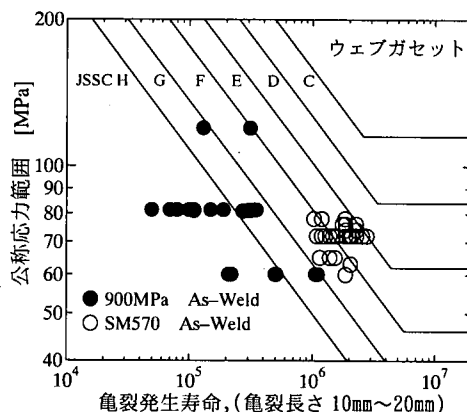


図-11 疲労試験結果 (桁試験体)

は2mmの未溶着部を残した部分溶け込み溶接を行い、疲労亀裂のルート部からの発生を試みた。

疲労試験は小型継手試験体では繰返し引張载荷により、桁試験体では4点曲げ载荷により行った。応力比はほぼ0とした。疲労亀裂は全て廻し溶接止端部から発生した。

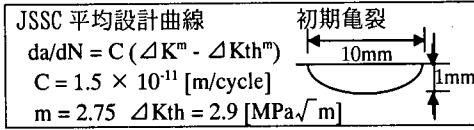
(1) 疲労試験結果

図-8に小型継手試験体の疲労試験結果を示す。両鋼種で疲労強度で差異が見られていないことが分かる。図-9に疲労試験結果を疲労亀裂発生寿命で整理した結果を示す。本研究では疲労亀裂発生寿命を亀裂深さが1mmとなったときと定義し、ピーチマーク試験の観察により測定した。両鋼種の間で疲労亀裂発生寿命の間に明確なる差異が見られていないこと

が分かる。図-10はピーチマークにより測定した板厚方向の亀裂進展速度を応力拡大係数範囲で整理した結果を示す。より低い応力拡大係数範囲でのデータが必要であるが、両鋼種で疲労亀裂進展速度に殆ど差異が見られていないといえ、またその進展速度はJSSCの平均設計曲線に良く一致した結果となった。

図-11に桁試験体の疲労試験結果を示す。本試験では、多くのウェブガセット継手から疲労亀裂が発生することを期待し、表面亀裂長さが20mm程度となった時点で亀裂をグラインダー処理により取り除いているために、ここでは表面亀裂長さが900MPa級鋼材では10mm、JIS-SM570では10~20mmとなったときの载荷回数をを用いて疲労試験結果を整理している。小型継手試験体と比較すると疲労強度が非常に低く、JSSCのH等級に満たないデータも数多く見られた。

表-3 解析条件および初期亀裂の仮定



また900MPa級鋼材を用いた試験体の疲労強度がJIS-SM570よりも非常に低いことが分かる。

(2) 小型継手試験体と桁試験体との違い

図-8, 図-11に示したように桁試験体の疲労強度は小型継手試験体と比較して非常に低いものであった。しかし本研究では小型継手試験体と桁試験体の疲労寿命の定義が同じではないために直接この二つのグラフを比較することは適切ではない。そこで、桁試験体の疲労寿命を亀裂進展解析により小型継手試験体と同様の疲労寿命まで伸ばすことにより、両試験体の比較を試みた。表-3に進展解析条件を示す。ここでは図-10を参考にJSSCの平均設計曲線を用い、修正Paris則 ($da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$: 亀裂長さa, 載荷回数N, 応力拡大係数範囲 ΔK , 下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} , 定数C,m)を用いて亀裂の板厚貫通までの進展解析を行った。初期条件として表面亀裂長さが10mmの時の亀裂深さを1mmと仮定した。この仮定は必ずしも正確なものとは言えないが、ある程度概略的な評価は可能であると考えられる。

図-12に整理結果を示す。図中Nf2は小型継手試験体では破断寿命であり、桁試験体では図-11に示した疲労試験結果に、表面亀裂が10mm(または20mm)から板厚貫通するまでの亀裂進展解析結果の和である。疲労寿命を合わせることにより、桁試験体の疲労強度は小型継手試験体の疲労強度に近づき、また図-11で見られたばらつきも、依然として小型継手試験体よりJSSCの疲労強度等級で2~3等級程度低い疲労強度となっている。

小型継手試験体と桁試験体の疲労強度の差異の主な原因として、溶接止端部における応力集中の差異が挙げられる。面外ガセット継手のような付加物溶接継手止端部の応力集中係数は、継手形状・寸法が大きくなると増加し、それに伴い疲労強度が低下する、所謂寸法効果があることが知られている。この継手寸法が変化することによる止端部の応力集中の変化の疲労強度への影響はホットスポット応力の概念を用いて良く説明できると言われる。そこで図-12の試験結果をホットスポット応力範囲を用いて整理した。ホットスポット応力範囲は、試験体形状・寸法を正確に取り入れたFEM応力解析を行い、止端部から4mm及び6mm位置の応力解析値から外挿し

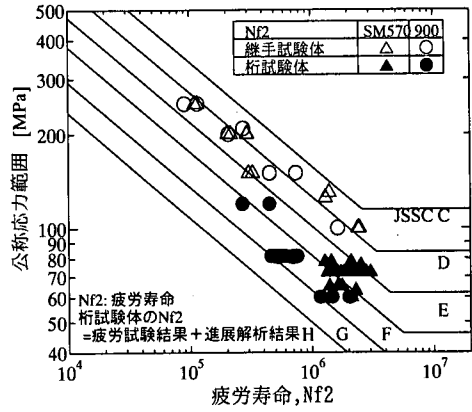


図-12 Nf2で整理した疲労試験結果

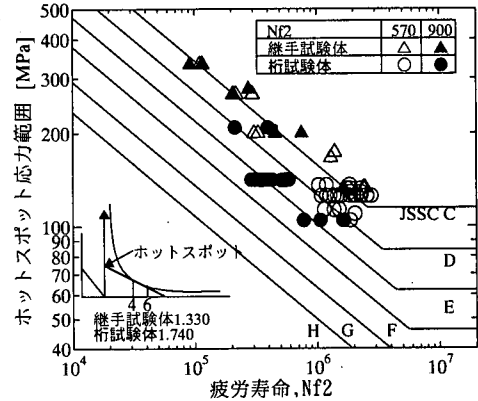


図-13 ホットスポット応力範囲で整理した疲労試験結果(Nf2)

て求めた³⁹⁾。桁試験体では、ガセット位置、及びその載荷点との位置関係でホットスポット応力が異なるが、ここでは純曲げ領域のガセットに対して求めたホットスポット応力範囲を用いた。図-13にホットスポット応力範囲を用いて図-12を整理した結果を示す。ホットスポット応力範囲は、桁試験体の方が小型継手試験体よりも大きい、このホットスポット応力範囲で整理しても1等級程度の疲労強度の差異が見られた。これは応力分布や応力状態の差異⁹⁾、残留応力の差異などが考えられるが、この点についてもより検討が必要であるといえる。

小型継手試験体で見られなかった疲労強度の鋼材強度依存性が、桁試験体で鋼材強度逆依存性として見られた点については、収集データが少ないこと、及びそのメカニズムも明らかでないこともありその逆依存性の有無も含めて、より検討を行うことが必要である。しかし、少なくとも高強度化により疲労強度が上がらず、また大型化により疲労強度が低下するこの形式の溶接継手に高強度鋼を用いるためには疲労強度を向上させる必要があるといえる。

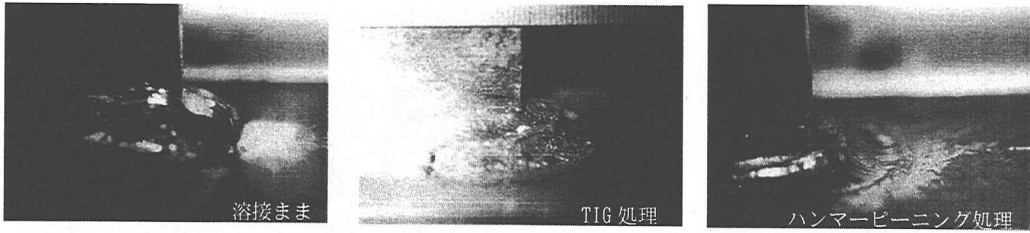


図-14 処理表面の例 (900MPa 級：小型継手試験体)

表-4 止端部処理条件の概略

TIG 処理	ハンマーピーニング
予熱温度：50°C	型式：空気式
電圧：20V	空気圧力：6bar
電流：250A	ハンマー重量：1.7kg
処理速度 ：150mm/min	パス数：3 パス
	打撃速度：43 打/秒
	先端直径：12mm
	処理速度：72mm/min

表-5 疲労亀裂発生位置

JIS-SM570			900MPa 級高強度鋼				
	①	②	③		①	②	③
小型継手試験体			小型継手試験体				
A.W	●			A.W	●		
T.D.	●		○	T.D.	●		
H.P.		●		H.P.		●	○
桁試験体			桁試験体				
A.W	●			A.W	●		
T.D.	●			T.D.	●		
H.P.				H.P.			
F+G	●			F+G	●		
A.W.溶接まま T.D.TIG 処理 H.P.ハンマーピーニング F+G フィレット+ グラインダー処理			③：その他（母材・ チャック内など）			② ①	

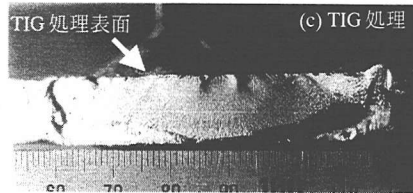
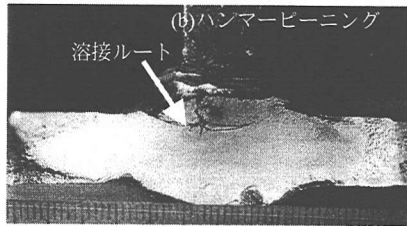
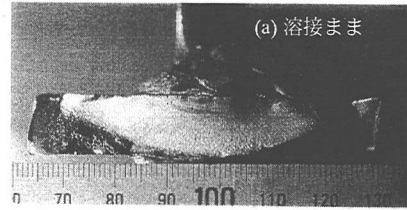


図-15 小型継手試験体の疲労破面例 (900MPa)

4. 止端部処理による疲労強度向上

前述したように、縦方向溶接継手部の疲労強度は溶接欠陥の大きさや溶接ルート部の形状・性状に大きく影響を受けるために、疲労強度を向上させるためには、完全溶け込みにするなどの溶接条件の工夫や、存在する有害な溶接欠陥を確実に発見し除去することのできる検査システムの構築が必要となる。

一方、面外ガセット継手やリブ十字継手については実橋梁の主要部材の場合、一次応力的には縦方向溶接継手（首溶接）よりも高い応力範囲が作用することはないことより、疲労強度の向上目標を定めるならば、首溶接の疲労強度分類であるJSSCのD等級以上ということになる。そこでここでは、この向上目標を考慮しながら、面外ガセット継手に対する止

端部処理の疲労強度向上について検討する。本研究で対象とした止端部処理法はTIG処理、ハンマーピーニング処理、グラインダー処理（フィレット付き：桁試験体のみ）である。これらの処理を図-7に示した試験体に施し溶接まま試験体と同様の疲労試験を行った。

表-4に処理条件の概略を示す。JIS-SM570、900MPa級鋼材に対して、更には小型継手試験体、桁試験体に対してほぼ同等の処理条件としている。ハンマーピーニング処理については、処理による止端部の巻き込みを防止するために、処理前に止端部にグラインダー処理を施した後にハンマーピーニング処理を行っている³⁰⁾。図-14に900MPa級高強度鋼溶接継手部に止端部処理を施した処理表面の例を示す。

図-15に小型継手試験体の疲労破面の例を、図-16に桁試験体の疲労亀裂の例を示す。表-5に疲労亀裂



図-16 桁試験体に発生した疲労亀裂の例 (900MPa 級)

表-6 疲労強度向上効果のまとめ

		溶接まま	TIG 処理	ハンマーピーニング	フィレット+グラインダー処理
小型 継手	SM570:200 万回疲労強度	100.4MPa	137.5MPa	亀裂発生なし	-----
	向上効果	-----	1.37	1.95(3 等級)以上	-----
900MPa:200 万回疲労強度	900MPa:200 万回疲労強度	97.0MPa	109.2MPa	亀裂発生なし	-----
	向上効果	-----	1.13	1.55~1.95(2~3 等級)以上	-----
桁 試験 体	SM570:200 万回疲労強度	67.6MPa	78.6MPa	-----	67.0MPa
	向上効果	-----	1.16	-----	1.00
	900MPa:200 万回疲労強度	35.6MPa	46.0MPa	亀裂発生なし	51.3MPa
	向上効果	-----	1.29	1.55~1.95(2~3 等級)以上	1.44

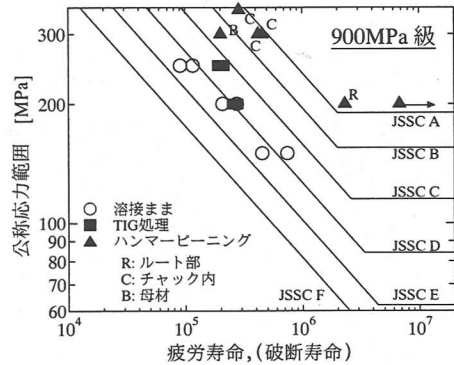
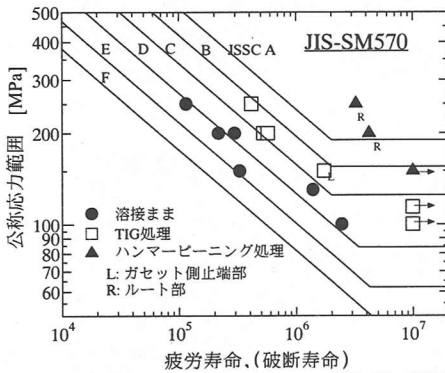


図-17 疲労試験結果 (小型継手試験体)

発生状況をまとめた。桁試験体については、溶接まま継手同様に、疲労寿命を表面亀裂長さがJIS-SM570では10~20mm, 900MPa級鋼材では10mm程度となったときの载荷回数と定義した。

図-17に小型継手試験体の疲労試験結果を、図-18に桁試験体の疲労試験結果を示す。

(1) 小型継手試験体の疲労強度向上効果

各処理により疲労強度が向上しており、疲労試験結果はJSSCのD等級を全て満足するものであった。また、各処理の向上効果はJIS-SM570, 及び900MPa級高強度鋼の小型継手試験体でほぼ同等であり、

TIG処理：JSSCの1等級程度，効果は鋼材強度非依存

ハンマーピーニング処理：JIS-SM570, 900MPa級高強度鋼溶接継手試験体ともに処理部からの疲労亀裂の発生は見られず，処理効果，及びその効果の鋼材強度依存性については明言できない

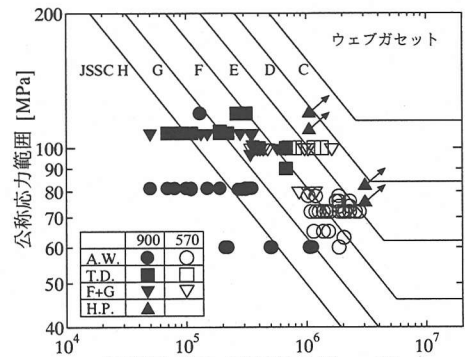


図-18 疲労試験結果 (桁試験体)

が、少なくともA等級を超える程度の疲労強度向上効果が得られた。従って、この2つの手法は、JSSCのD等級を向上

目標とするのであれば、鋼材が高強度化しても十分な手法であると言える。

(2) 桁試験体の疲労強度向上効果

桁試験体においても各処理により疲労強度が向上していた。JIS-SM570と900MPa級鋼材との間で疲労強度の間で、疲労強度自体は大きく異なるが、その向上効果は殆ど差異がないと言える。また、その効果は小型継手試験体の向上効果とほぼ同等と言える。

TIG処理：JSSCの1等級程度

グラインダー処理：1等級程度

ハンマーピーニング処理：疲労試験終了まで疲労亀裂の発生は見られず、現在E等級を超える程度のデータが得られているが、桁試験体においても大きな効果が期待できるといえる。

従って、JSSCのD等級を向上目標とするならば、TIG処理、グラインダー処理は必ずしも十分な手法であるとは言えないことになる。

表-6は以上の疲労強度向上効果を200万回疲労強度で整理したものである。ここでは、200万回疲労強度は、試験データのばらつきを考慮してS-N線図上で傾きを3に固定した最小二乗法を行って求めた。向上効果は、各処理試験体の200万回疲労強度を溶接まま試験体の200万回疲労強度で除した値としている。SM570の桁試験体のグラインダー処理の疲労強度向上効果が見られていないが、各処理ともに、その向上効果に明確な継手寸法依存性、鋼材強度依存性が見られなかった。

5. 結論

本研究より以下の結論が得られた

- 1) 溶接継手部の疲労強度の鋼材強度依存性、寸法効果依存性を調べた結果、小型継手試験体では、本研究で対象とした全ての継手形式において、疲労強度の鋼材強度非依存性が見られたが、大型桁試験体における付加物溶接継手では鋼材強度逆依存性が大きく見られた。
- 2) 小型継手試験体では、JIS-SM570材溶接継手と900MPa級鋼材溶接継手の間に疲労強度、疲労亀裂発生寿命、疲労亀裂進展速度の全てにおいて差異は見られなかった。今後、桁試験体で見られた鋼材強度逆依存性の原因について、残留応力の影響などから検討が必要である。
- 3) 面外付加物継手小型継手試験体と桁試験体の間

に見られた疲労強度の差異は、主に、寿命の定義や応力集中の差異が原因であるが、作用応力分布や残留応力の差異の影響について更に検討が必要である。

- 4) 本研究で行った、ピーニング処理、TIG処理の疲労強度向上効果は鋼材、継手寸法に依存しなかった。

謝辞：本研究は鋼材倶楽部が日本鋼構造協会に委託した次世代土木鋼構造研究特別委員会「高機能鋼材への橋梁への利用小委員会」の一環として行なった。また本研究を行うに際し、新日本製鉄(株)楠隆氏、(株)サクラダ南邦明氏にご協力頂きここに感謝致します。また貴重なご意見を頂きました東京工業大学創造プロジェクト研究SIG1の委員各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：「次世代土木鋼構造研究特別委員会・高機能鋼材の橋梁への利用小委員会」最終報告書、2000。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説鋼橋編、1996。
- 3) 本間宏二：鋼橋部材における高性能鋼の活用に関する基礎的研究、東京工業大学博士論文、1997。
- 4) 高橋和也、三木千寿：高強度鋼材適用による鋼橋構造の合理化の可能性、第53回土木学会年次学術講演会、I-A, pp.2-3, 1998。
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、1993。
- 6) 太田昭彦、前田芳夫、小菅雄雄、町田進、吉成仁志：引張残留応力場にある溶接継手の設計疲労き裂伝ば曲線、溶接学会論文集、第7巻、第3号、pp.391-396, 1989。
- 7) Smith, I.F.C. and Gurney, G.W.: Change in the Fatigue Life of Plates with Attachments Due to Geometrical Effects, Welding Research Supplement, pp.244-250, 1986。
- 8) Hobbacher, A.: Stress Intensity Factors of Welded Joints: Engineering Fracture Mechanics, Vol.46, No.2, pp.173-197, 1993。
- 9) 穴見健吾、三木千寿：溶接継手部の疲労強度の寸法効果に関する研究、鋼構造論文集、4-14, pp.9-16, 1997。
- 10) Tajima, J., Takena, K., Miki, C. and Itoh, F.: Fatigue Strength of Truss made of High Strength Steels, Proc. of JSCE, No.341, pp.1-11, 1984。
- 11) 日本鋼構造協会：JSSCレポートNo.6「止端加工による疲労強度向上法」、1987。
- 12) Haagensen, P. J.: Round Robin Test Program on Improvement Techniques, IIW-XIII-WG-2, 1995。
- 13) Smith, I. F. C.: Peening Methods for Improvement of Fatigue Strength, IIW-XIII-WG-2-290, 1990。
- 14) Booth, G.S.: The fatigue life of grounded or peened fillet welded steel joints, Metal Construction, Vol.12, pp.112-

- 115, 1981.
- 15) Maddox, S.J.: Improving the Fatigue Strength of Welded Joint by Peening, *Metal Construction*, Vol.17, pp.220-224, 1985.
 - 16) 太田省三郎, 浅井公屋, 大谷真一: すみ肉溶接継手のTIGアーク再溶融による疲労強度の向上, 溶接学会論文集, Vol.8, pp.254-261, 1990.
 - 17) 河合末男, 宮本俊雄, 塩野忠彦, 才川至孝: 高張力鋼溶接継手の疲労強度に及ぼすピード止端処理の効果, 溶接学会誌, Vol.48, pp.44-45, 1979.
 - 18) 三木千寿, 穴見健吾, 谷英樹, 杉本一朗: 止端部改良による疲労強度向上法; 溶接学会論文集, Vol.17-1, pp.111-119, 1999.
 - 19) 瀬戸厚司, 征矢勇夫, 田中洋一: 各種溶接部改善処理継手の疲労強度向上と板厚効果の検討, 日本造船学会論文集, Vol. 172, pp.617-626, 1992.
 - 20) 下川浩資, 竹名興英, 伊藤文夫, 三木千寿: 800MPa級高張力鋼を用いた大型ガセット継手の疲労強度, 土木学会論文集, No.356/I-3, pp.279-287, 1985.
 - 21) 三木千寿, 森猛, 阪本謙二, 柏木洋之: 前面隅肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.393-402, 1987.
 - 22) 三木千寿, 坂野昌弘, 豊田幸宏: 隅肉溶接止端部からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動, 構造工学論文集, Vol.35A, pp. 321-328, 1989.
 - 23) 三木千寿, 豊田幸宏, 森猛, 榎土尚宏: 鋼桁ディテールの道路橋シミュレーション荷重疲労, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.951-960, 1989.
 - 24) 大江慎一, 三木千寿, 奥川淳志, 安井成豊: 800MPa級鋼材を用いた実大トラス弦材各種構造の疲労強度, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1031-1044, 1992.
 - 25) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Ohga, H.: Fatigue Strength of Longitudinal Welded Joints Containing Blowholes, *Proc. of JSCE*, No.325, pp.155-165, 1982.
 - 26) 村越潤: 溶接道路橋部材の交通荷重による疲労損傷の予測, 昭和62年度東京工業大学修士論文, 1984.
 - 27) Miki, C., Tajima, J., Asahi, K. and Takenouchi, H.: Fatigue of Large-Size Longitudinal Butt Welds with Partial Penetration, *Proc. of JSCE*, No.322, pp.143-156, 1982.
 - 28) 館石和雄, 慶甲秀, 町田文孝, 三木千寿: 高張力鋼すみ肉溶接継手部の疲労強度の溶接材料依存性, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.133-140, 1996.
 - 29) 慶甲秀, 森猛, 三木千寿, 橘剛志: 高強度鋼溶接継手部の溶接材料軟質化による疲労強度向上の試み, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.97-106, 1997.
 - 30) Anami, K., Miki, C., Tani, H. and Yamamoto, H.: Improving Fatigue Strength of Welded Joints by Hammer Peening and TIG-Dressing, *土木学会論文集*, No.647/I-51, pp.67-78, 2000.
 - 31) 阪本謙二, 阿部允, 杉館政雄: 実働荷重による鋼橋部材の疲労強度 (その1), 鉄道総合技術研究所報告, Vol.3, No.10, pp.22-29, 1989.
 - 32) 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一: 10年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.121-127, 1994.
 - 33) 小野塚正一: 海洋構造物の疲労強度に対する板厚効果評価法の検討, 溶接学会FS委員会資料, FS-735-87, 1987.
 - 34) 坂野昌弘, 三上市蔵, 米本栄一, 安池寿夫: 4種類の垂直補剛材取付部をもつプレートガーダー試験体の疲労実験と寿命予測, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.999-1010, 1992.
 - 35) Fisher J. W.: Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, *International Cooperative Highway Research Program Report 147*, 1974.
 - 36) Fisher J. W.: Fatigue Behavior of Full-Scale Welded Bridge Attachment, *Fritz Engineering Report 446-1 (80)*, Lehigh University, 1980.
 - 37) Keating, P. B.: Review of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details, *Fritz Engineering Report 488-1 (85)*, Lehigh University, 1985.
 - 38) 竹名興英, 伊藤文夫, 平野茂, 三木千寿: ボックス断面角継手の溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.939-949, 1989.
 - 39) 三木千寿, 館石和雄, 山本美博, 宮内政信: 局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1055-1062, 1992.

(2000. 4. 26 受付)

FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINT MADE OF HIGH STRENGTH STEEL AND FATIGUE STRENGTH IMPROVEMENT

Kengo ANAMI, Chitoshi MIKI, Haruhito YAMAMOTO and Yoshitake HIGUCHI

By rearranging many data of fatigue tests with welded joint made of various class steels, dependence of the fatigue strength of welded joint on steel strength and on size of joints were investigated. In addition, the applicability of the typical toe treatment, such as TIG-dressing, hammer peening and burr-grinding for fatigue strength improvement at welded joint made of high strength steel were examined with out-of-plane gusset welded joint.