

カバープレートの疲れ強さと疲れ許容応力度

Fatigue Strength of Cover Plate and Fatigue Allowable Stress

諸戸健一* 山田健太郎**

by ken'ichi Moroto and Kentaro Yamada

Fatigue test data of cover plates welded to tension flange is summarized and compared with the allowable stress in various fatigue specifications. Stress concentration is generated at weld toes of cover plate and this results in low fatigue strength. Fatigue strength at the end of cover plate can be improved by finishing the weld toe. Replacing the end welds of cover plate by high strength bolted joints makes it even better. Based on these results, new fatigue allowable stress ranges for cover plate are proposed.

1. はじめに

近年、構造的な形状の急変部や溶接止端部などの応力集中部に、疲れき裂が発生した例が報告され、その対策も含めて疲労に対する関心が深まってきた。¹⁾ 鋼構造に発生するき裂は、適切な疲労設計と継手形状の採用を行えば防止できると言われており、疲労設計法の見直しが行なわれている。また、発生したき裂もその進展に時間がかかるので、十分な時間的余裕をもって補修・補強で対処できる。発生したき裂の補修・補強が比較的容易に行なえることも鋼構造物の利点であろう。

疲労の防止には、適切な疲労設計が必要である。そのため、これまでも種々の疲労設計指針が定められてきた。最近では、疲労設計の実績や実際の疲労損傷および研究の成果を取り入れて、疲労設計指針が見直されてきている。橋梁関係では、米国(1974年, AASHTO¹²⁾) 英国(1980年, BS5400 Part10¹¹⁾) 日本(1983年, 国鉄建造物設計標準解説⁸⁾) があげられる。また、新しい設計指針も検討されており、ECCSの疲労設計指針は1985年に制定された。また、我が国の一般構造物を対象としたJSSCの疲労設計指針も、制定後の研究や実績を反映させるべく、12年ぶりに改定作業が開始された。⁹⁾

設計指針の改定作業では、強度に対応する設計基本 S-N線図を決めることが重要である。このため、新たに実験を行なって必要な設計基本 S-N線図を系統的に求めることも必要であるが、一般に膨大な費用と時間を要することになる。継手形式によっては、過去の実験値を分析評価することで十分な精度の設計 S-N線図

* 名古屋大学大学院 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

** Ph.D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

を求めることもできる。このような観点から各種の疲れ試験データシートが作られ、システマチックな整理のためにデータベース化されてきている。

本研究では、カバープレート端の疲れ挙動について、曲げ試験体4体の疲れ試験および過去の実験結果の収集・データベース化を行なった。また、この結果を用いてカバープレート端の疲れ強さの評価と疲れ強さに及ぼす影響の分類、および疲れ試験結果に基いた設計基本S-N 線図の提案を行なった。ここで取り上げるカバープレートは、まず、桁のフランジにすみ肉溶接した比較的長いカバープレート（国鉄建造物設計標準解説および道路橋示方書では、「重ね合わせたフランジプレート」と称している）である。これは、圧延桁や溶接組立桁の断面 2次モーメントを増加させるために用いるが、断面補強のため、後から桁のフランジにすみ肉溶接することもある。この他に、枕木やシュー座を支える台座板やプレート、あるいは補修・補強の目的ですみ肉溶接された、比較的短いアタッチメントについても考察する。これは、疲れき裂の発生・進展挙動がカバープレートの場合と似た所があり、カバープレートの特殊な例とも考えられるからである。

なお、本文では呼び名を統一するために便宜上、アタッチメントもカバープレートと称する。

2. カバープレートの疲れ挙動に関する過去の実験例

2. 1 過去の研究のまとめおよび収集した S-Nデータ

カバープレート端の疲れ強さに関して様々な研究が行なわれており、Lehigh大学¹⁾、Maryland大学、U.S.Steel²⁾、名古屋大学（NUCE）³⁾⁴⁾の実験から総計 496件の疲れ試験データを収集した。Fig.1 にカバープレート端の継手形式を示し、また、収集したデータの試験体寸法およびデータ数をTable 1 に示す。

1)比較的長いカバープレート

圧延桁は、溶接桁に比べて製作コストが低いことから、米国などで広く用いられている。この圧延桁を補剛するためには上下フランジにカバープレートを溶接するのが簡便であるが、カバープレート端の疲れ強さが問題になる。これに関しては、Lehigh大学で行なわれた一連の研究が有名である。これは、圧延桁にすみ肉溶接したカバープレート（CR）、溶接桁にすみ肉溶接したカバープレート（CW）、フランジ厚の2倍の板厚をもつカバープレート（CT）、フランジ幅よりも幅の広いカバープレート（CB）について疲れ試験を行なったもので、カバープレート長さは1219mmである。この結果をもとに、AASHTOではこの種の構造の許容応力度を定めた。また、U.S. Steel では、実働荷重による疲れ試験をカバープレートを溶接した圧延桁と引張試験体で行なった。圧延桁およびカバープレートは、Lehigh大学のも

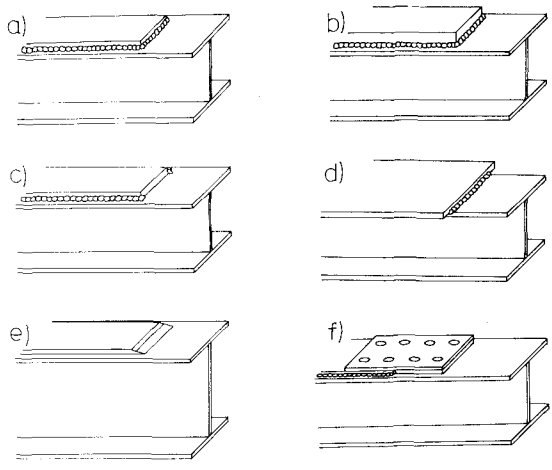


Fig.1 Type of cover plate end details.

Table 1 Number of test data and dimension of fatigue test specimens of each laboratory.

試験体の種類		研究機関	データ数	母材(mm)		カバープレート(mm)			
				厚さ	幅	厚さ	幅	長さ	
桁	短い	NUCE	'85	6	10	160	10	80	200
			'84	4	10	300	10	200	400
	長い	U.S.Steel	146	9.5	171	14	114	1219	
		Maryland	仕上げ	11	10	165	9.5	127	1575
			ボルト	14	10	171	13	146	1218
		Le-high	CW	61	9.5	171	14	114	1219
			CR	91	9.5	171	14	114	1219
			CT	22	9.5	171	19	114	1219
			CB	60	9.5	171	14	229	1219
		引張	短い	Maryland	24	10	64	7	45
U.S.Steel	82			9.5	68	14	51	102	

*但し、U.S.Steel の引張り試験体は、前面すみ肉溶接無し

のと同じものを用いている。さらに米国では、Yellow Mill Pond橋のき裂発生を契機に、板厚の大きいカバープレートの場合に先のAASHTOの規定では危険側になることが判り、いわゆる板厚効果を考慮したより低い許容応力度 (E') を追加した。

カバープレート端の疲れ強さを向上させるために、Maryland大学では、カバープレート端の溶接止端部を1:2のテーバーでグラインダー仕上げした。この結果、溶接止端部の疲れ強さは向上したが、疲れき裂の発生点が前面すみ肉溶接のルート部へ移り、その部分の疲れ強さで強度が決まる現象がみられた。この実験では、既設のカバープレート端の疲れ強さ向上も意図していたが、カバープレート端の前面すみ肉溶接のサイズが小さく、それをカバープレート端とともに仕上げたため、若干のサイズ不足を生じていた。JSSC疲労設計指針に示されるように、十分大きな前面すみ肉溶接にしてこの溶接部を仕上げるようにすると疲れ強さはさらに向上するものと思われる。さらに、同大学ではこの部分の疲れ強さを向上させるため、側面溶接を途中で止め、カバープレート先端を高力ボルト締めした試験体を用いて、疲れ試験を行なった。また、既設橋の補強を考えて、前面すみ肉溶接の応力を軽減するためにまわしすみ肉溶接されたカバープレートの先に、さらに添接板を高力ボルト締めして補強したものの試験も行なった。

2) 比較的短いカバープレート

比較的短いカバープレート (アタッチメント) は、構造物の各所にみられる。名古屋大学では、長さ 200 ~ 400mm のカバープレートを引張フランジにまわしすみ肉溶接した溶接桁を用いて疲れ試験を行なった。この概要をAppendixに示す⁶⁾。また、前述の U.S.Steelの研究では、長さ102mm の前面すみ肉溶接のないカバープレートを溶接した引張試験体の疲れ試験を行なっている。同様の引張試験体で前面すみ肉溶接のある場合は、Maryland大学でも試験されたが、この場合は耐候性鋼 (A588鋼) で無暴露および2ないし4年の大気暴露後の疲れ強さの比較を行なっている。

我国でも枕木下の台座板のようなアタッチメントに対する疲れ試験が行なわれており、圧縮荷重を受ける枕木下のアタッチメントのすみ肉溶接や、疲れ試験の圧縮側の載荷板のすみ肉溶接に疲れき裂が発生した例がある。これは、引張残留応力に起因するものと考えられる。圧縮側に溶接されたカバープレート端に発生する疲れき裂は、ある程度の長さまで進展すると停留する。それが縦ビードなどによる引張残留応力部に進展すると予想外にき裂が大きくなる可能性のあることが指摘されている。

2. 2 カバープレート端での疲れき裂の発生状況

これまでの実験で観察されたカバープレート端における疲れき裂の発生状況を、Fig.2 に示す。まず、カバープレート端の前面すみ肉溶接の溶接止端部が非仕上げの場合、Fig.2 (a) に示すように、前面溶接の止端部からき裂が発生する。この場合、一般に複数の半楕円形き裂が発生し、それらが複合合体しながらフランジに進展していく。前面すみ肉溶接の溶接金属内にブローホールやスラグ巻き込みなどの欠陥がある場合、この欠陥からき裂が進展することもある。

カバープレートの前面すみ肉溶接は、力の伝達と防錆の効果がある。このシール効果を必要とせず、この部分の応力集中を軽減するために、Fig.2(b)に示すように側面すみ肉溶接だけ用いることも試みられている。この場合、疲れき裂は応力集中の高い側面すみ肉溶接の端部から発生する。

前面すみ肉溶接のシール効果を保ちながらこの部分の疲れ強さを向上させるためには、Fig.2(c)に示すように仕上げる。

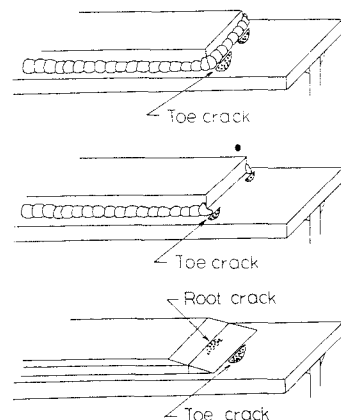


Fig.2 Location of fatigue cracks observed in various fatigue tests.

仕上げによる応力集中の低減と、止端部の小さな溶接欠陥の除去に効果がある。この継手の場合もFig.2(a)と同様に、すみ肉のサイズによって前面すみ肉溶接止端部が溶接欠陥から疲れき裂が発生する。また、仕上げによって止端部の疲れ強さが向上するため、き裂発生点がルート部に移行することもある。このため前面すみ肉溶接のカバープレート側のサイズを十分確保することが必要である。

前面および側面すみ肉端部の応力集中を除くために、側面すみ肉溶接を途中で止めて、先の部分を高力ボルト摩擦接合継手とすることも検討されている。この方法によると、前面すみ肉溶接に相当する部分は、高力ボルト摩擦接合の疲れ強さで支配されるので疲れ強さが高い。この場合のき裂の発生は、ボルト孔およびその周辺から多く発生する。

Table 2 Allowable stress ranges for cover plates welded to tension flanges. Details made of high strength steel are not included.

2. 3 疲れ許容応力度

引張部材に溶接されたカバープレートの疲れ許容応力度を、国鉄建造物設計標準解説(JNR)⁸⁾、鋼構造協会疲労設計指針(JSSC)⁹⁾、欧州鋼構造連合疲労設計指針(ECCS)¹⁰⁾、英国のBS5400、米国のAASHTOから抜粋し、Table 2 に示す。

示方書	条件	幅 mm	継手分類	許容応力 (MPa)
JNR	非仕上げ	4	D	78 (2×10^6)
	溶接端仕上げ	4	C	103 (2×10^6)
JSSC	グラインダー仕上げ $b \leq 2h$ $h \geq 0.8 \text{ tcp}$	5.56	C	118 (10^6)
ECCS	$t_f \text{ and } t_{cp} \leq 20\text{mm}$	3	50	50 (2×10^6)
	$t_f \text{ and } t_{cp} > 20\text{mm}$	3	36	36 (2×10^6)
BS5400	側面溶接長さ $L > 150\text{mm}$ カバープレート幅 $w > 50\text{mm}$ 溶接止端 10mm以上	3	G	50 (2×10^6)
AASHTO	非仕上げ $t_f < 20\text{mm}$	約3.1	E	55 (2×10^6)
	非仕上げ $t_f > 20\text{mm}$	約3.0	E'	約40 (2×10^6)

3. 疲れ試験結果の評価

3. 1 疲れ試験結果のS-N 線図

a) 比較的に長いカバープレートの疲れ強さ (非仕上げ)

ここではカバープレートの長さが1m以上のものを、長いカバープレートと定義した。米国における非仕上げのカバープレートの実験値207データを用いてS-N 線図を求め、平均値および平均値-2s (s: 標準偏差) に相当する S-N線図をFig.3 に示す。設計S-N 線図の傾きは、いずれも約 3であり、許容応力度を比較してもAASHTOが少し高いが、その差はほとんどない。

b) 短いカバープレート (非仕上げ)

カバープレートの長さが1m未満のものを、短いカバープレートとした。この範囲では、カバープレートの長さが 100mmから 400mmの範囲で、疲れ強さが大きく変化する。カバープレートの長さが102mm の非仕上げの試験体に相当するMaryland大学と U.S.Steelのデータの S-N線図、および非仕上げのカバープレートの許容応力度をFig.4 示す。その結果、データのS-N 線図の下限値が各示方書の許容応力度をはるかに上回ることがわかる。すなわち、短いカバープレートに対して、現行の許容応力度は安全すぎることになる。逆に、短いカバープレートの疲れ試験結果を基準にして求められた許容応力度は、長いカバープレートでは、非安全側になることも考えられる。

c) カバープレート端の前面すみ肉溶接の仕上げおよび高力ボルト補強の効果

Maryland大学で実施された溶接端仕上げと高力ボルト補強の試験結果を、長いカバープレートの試験結果と比較したものをFig.5 に示す。平均値を比較すると、溶接端仕上げは 100万回疲れ強さで約 1.7倍、高力

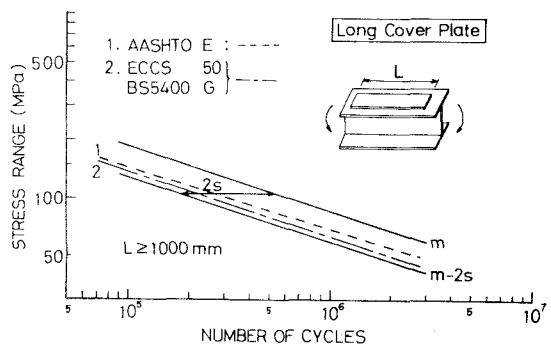


Fig.3 Comparison of fatigue strength of as-welded cover plates over 1000 mm long with allowable stress in various fatigue specification.

ボルト補強したものは約 2.4 倍も疲れ強さが向上しており、明らかに溶接端の仕上げ、あるいは高力ボルト補強による疲れ寿命の向上効果がみられた。ただし、仕上げについては仕上げの方法や精度が問題となる。不完全な仕上げの部分や、グラインダー跡などから疲れき裂が発生する場合もある。また前述したように、仕上げによってき裂発生点がルート部に移り、別の破壊形態を示して仕上げの効果が薄れることもあるので注意が必要である。

3. 2 疲れ試験結果の100 万回疲れ強さの比較

疲れ試験結果の100 万回疲れ強さ（平均値と平均値 $\pm 2s$ ）と各種示方書に示されるカバープレートの許容応力度の比較をFig.6 に示す。図中のそれぞれのデータには、研究機関名をインシタルで示した。また、ここでは、データの疲れ強さはS-N 線図の傾きを 3として計算した。

溶接端が非仕上げの場合、カバープレートの長さが長くなるに従い、疲れ強さが減少する。特に、カバープレートの長さが 400mm 以下では、その傾向が顕著にみられる。しかしながら、400mm 以上の長さになると、疲れ強さはあまり変化しない。

溶接端を仕上げたカバープレートの疲れ強さは、非仕上げの 102mm のものと同程度の疲れ強さまで向上する。また、高力ボルト補強したものは 102mm のものに比べて、疲れ強さが約45%も上回っている。非仕上げの試験結果と疲れ許容応力度と比較すると、カバープレート長さが 200mm 以下では、JNR の継手形式D の許容応力度程度が妥当であると思われる。400mm 以上では、ECCS の継手形式50 が妥当と思われる。試験値のばらつきが大きい U.S. Steel の実験値とフランジ幅よりもカバープレート幅が広いLehigh大学のCBシリーズは、下限がわずかにECCS の規準を下回る。

カバープレート端部を仕上げたMaryland大学の試験結果は、溶接端部の仕上げを規定している

JNR の継手形式C の許容応力度を下回った。これは、仕上げによる疲れ強さの向上効果と長さ起因する疲れ強さの低下が相殺したためであると考えられ、疲れ強さに対するカバープレートの長さによる影響も考

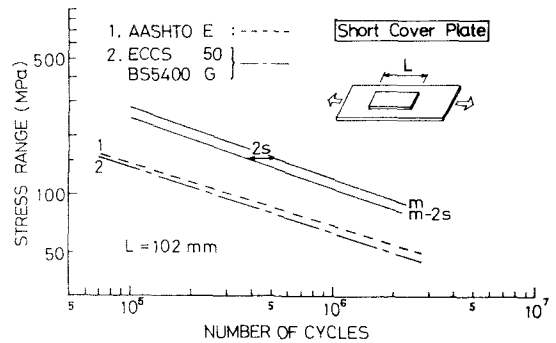


Fig.4 Comparison on fatigue strength of as-welded cover plates of 102 mm long with allowable stress in various fatigue specification.

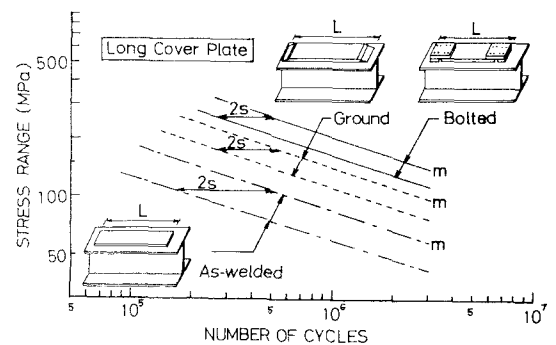


Fig.5 Comparison on fatigue strength of long cover plates (over 1000 mm long).

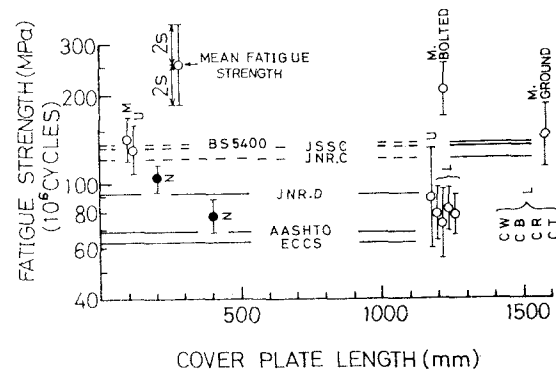


Fig.6 Fatigue strength corresponds to one million cycles for cover plates of various length and allowable stress ranges.

慮すべきであると思われる。高力ボルト補強したMaryland大学の試験結果は、カバープレートが長いにもかかわらず、JSSCの継手形式Cの許容応力度を満足しており、疲労に対して強い継手形式であるといえる。

3.3 新しい許容応力度規準の提案

カバープレートの疲れ強さは長さの影響を受ける。したがって、アタッチメント的な要素をもつ短いカバープレートから、剛性の増大をねらった長いカバープレートを同一の許容応力度で包括するのは難しい。そこで、疲れ試験結果に基づいてカバープレートの長さによって許容応力度を段階的に変える新しい規準を提案する。Fig.6 に示すように、カバープレートの長さが400mm より短いと疲れ強さが大きく変化する。このためこの間で2段階に分け、400mm 以上では疲れ強さの変化が小さいため同一の許容応力度を与えた。許容応力度としてはECCSの規準をあてはめた。この結果を Fig.7および Table 3 に示す。

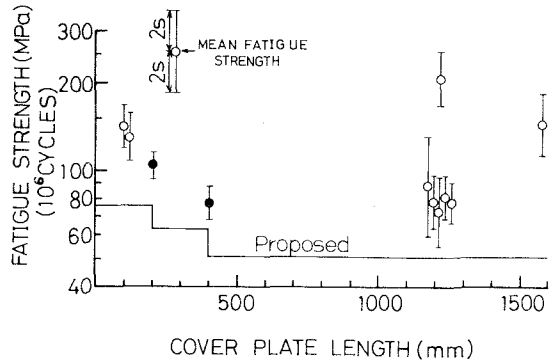


Fig.7 Proposed allowable stress ranges of cover plated details.

Table 3 Proposed allowable stress ranges for cover plated details.

	カバープレート 長さ	100万回疲れ強さ (MPa)	条件
非仕上げ	a) $L_{cp} \leq 200\text{mm}$	7.5	$t_f / t_{cp} \geq 1$ ECCS.63
	b) $200 < L_{cp} \leq 400\text{mm}$	6.3	$t_f / t_{cp} \geq 1$ ECCS.50
	c) $400\text{mm} < L_{cp}$	5.1	$t_f / t_{cp} \geq 1$ ECCS.40
仕上げ	d) 規定せず	10.1	$t_f / t_{cp} \geq 1$ グラインダー仕上げ ECCS.80 $b \geq 2h$ $h \geq 0.8 t_{cp}$

L_{cp} : カバープレートの長さ、 t_f : フランジの板厚、 t_{cp} : カバープレートの板厚、 b , h : 脚長

4. まとめ

カバープレートの端部の前面すみ肉溶接止端部は、応力集中のため疲れ強さが低い。そこで、引張部材に溶接されたカバープレートについて、試験結果をデータベースに収め、疲れ強さに及ぼすカバープレートの長さの影響、溶接止端部の仕上げの効果などについて検討した。また、各種示方書の疲れ許容応力度と比較した。

- 1) 疲れき裂は、カバープレート端の溶接止端部で応力集中の高い所に発生している。そのため種々の疲れ強さ改善方法が提案され、用いられてきている。
- 2) 疲れ強さには、カバープレートの長さが影響し、カバープレートの長さが長くなると疲れ強さは低下する。特に400mm 以下でその変化は著しく、400mm 以上では変化が少ない。
- 3) 長いカバープレート（ここでは1m以上）では、非仕上げのカバープレートを規定しているECCSの許容応力度が妥当であると思われる。短いカバープレート（1m未満のアタッチメント）に対して、この許容応力度は安全すぎるため、許容応力度を上げられる。
- 4) 長いカバープレートで、カバープレートの前面すみ肉溶接端を仕上げたものは平均値で約1.7 倍に、また高力ボルト補強したものは約 2.4倍に疲れ寿命が向上しており、疲れ寿命向上の効果がみられた。
- 5) カバープレートの長さを3 段階にわけて、それぞれの許容応力度を与えるという新しい規準の提案をした。

〔謝辞〕

本研究の一部は、文部省科学研究補助金（一般研究C）によるものである。本研究を遂行するにあたり、名城大学の近藤明雅講師の助言を得、また、実験については同大学学生の大野真治君（現 中日建設）と大森美樹君（現 東海テクノ）の協力を受けたことを付記して感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) Fisher J. W. et al.: Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams, NCHRP Report 102, Highway Research Board, 1970.
- 2) Schilling C.G. et al.: Fatigue of welded steel bridge members under variable-amplitude loadings, Report, NCHRP 12-12, August, 1975.
- 3) Albrecht P.: Fatigue Behavior of 4-year Weathered A588 Steel Specimens with Stiffeners and Attachments, University of Maryland, July, 1981.
- 4) Yamada, K.: Fatigue Behavior of Structural Components Subjected to Variable Amplitude Loading, University of Maryland, 1975.
- 5) 酒井吉永：付加物が溶接された桁の曲げ疲労試験と補修・補強に関する研究，名古屋大学工学部土木工学科修士論文，1985.
- 6) 諸戸健一：付加物溶接桁の疲れ試験とクレーン走行ばりの疲労照査，名古屋大学工学部土木工学科卒業論文，1986.
- 7) 横河橋梁研究所：圧縮の繰返し応力を受ける付加物すみ肉溶接継手の疲労性状，1986年 5月.
- 8) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983年5月.
- 9) 鋼構造協会疲労小委員会：日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説（案），JSSC, Vol.10, 1974年 5月.
- 10) Committee TC6 (Fatigue). Recommendations for the fatigue design of steel structures: European Convention for Constructional Steelwork, No.43, 1985.
- 11) British Standards Institution: Steel, concrete and composite bridges, BS5400 Part10, 1980.
- 12) The American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specification for Highway Bridges, 1983.

〔Appendix〕 カバープレート の 疲 れ 試 験

名古屋大学でこれまで実施された比較的短いカバープレート（アタッチメント）の疲れ試験について、その概要を示す。これらは、カバープレートを引張フランジにまわすみ肉溶接した小型の溶接桁を用いて、疲れ試験を行なったもので、本文中でそのデータを引用したものである。なお、酒井らの研究は、文献5)に示されているので、ここではその後のデータを中心に示す。

- 1) カバープレートが溶接された桁の疲れ試験
Fig.A1に試験桁を示す。引張フランジ（10×160 mm）中央に10×80×200 mmのカバープレートを脚長 6mmでまわすみ肉溶接した。

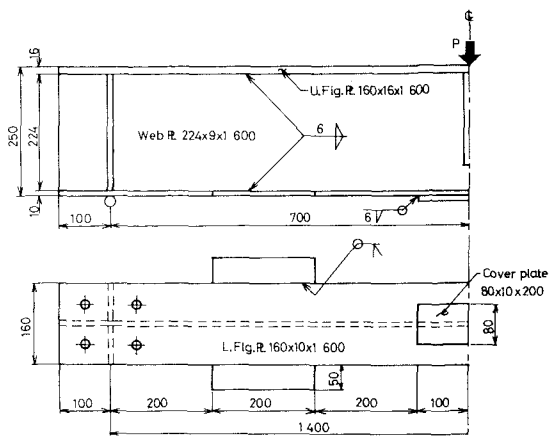


Fig.A1 Test girders with welded cover plate.

鋼材は SM50Aである。疲れ試験は、繰返し速度 1.8Hz~2.0Hz、応力比 0.1の定荷重振幅である。曲げ試験体4体について疲れ試験を行なった。カバープレートの両端でき裂が発生したものもあり、6個のき裂がカバープレート端に発生した。実験では表面き裂長さが50mmに達した時の繰返し数を疲れ寿命Nfとした。この時点で、板厚方向に進展したき裂がフランジの反対の面に貫通した。

2)疲れ試験結果

Table A1 Summary of fatigue test result.

試験体 No.	応力範囲 (MPa)	疲れ寿命 $\times 10^3$	き裂の発生箇所
B 1	147	441	止端部
B 2	177	180	止端部
B 3	102	910	ルート部
	102	983	ルート部
B 4	147	348	ルート部(破断)、止端部
	147	401	ルート部(破断)、止端部

Table A1に疲れ試験データを、Fig.A2に試験結果とカバープレート長さ 102mmと1000mm以上の平均 S-N線図とを比較したものを示す。その結果、102mmと1000mm以上の平均 S-N線図の間に95%信頼区間の S-N線図が入り、カバープレート長さが長くなるにつれて疲れ強さが低下する様子がわかる。また、Fig.A3にカバープレート端から発生した疲れき裂の破面の代表例のスケッチを示す。非仕上げのカバープレート端の疲れき裂は通常、応力集中が高い溶接止端部から発生する(toe crack)。試験体B2ではカバープレート端の前面すみ肉溶接止端のフランジ3ヶ所からき裂が発生し、それが合体、進展して破断に至っていることがわかる。また、カバープレートでは溶接欠陥やのど厚不足などが原因となり、溶接のルート部から発生する(root crack)場合もある。このき裂は前面すみ肉溶接を切断し、さらにカバープレート両側からフランジに進展していく。破面にはビーチマークのような痕跡があり、疲れき裂の形状や発生位置、進展状況が観察できる。

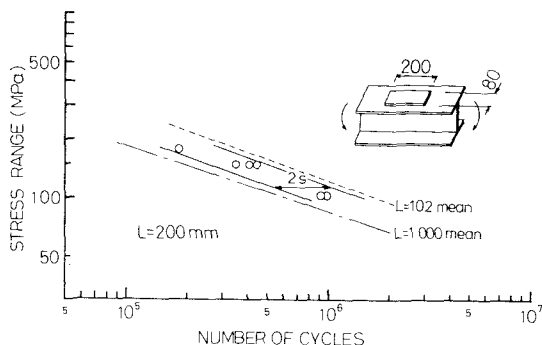


Fig.A2 Fatigue test result compared with mean S-N curves of 102 mm and over 1000 mm long cover plate.

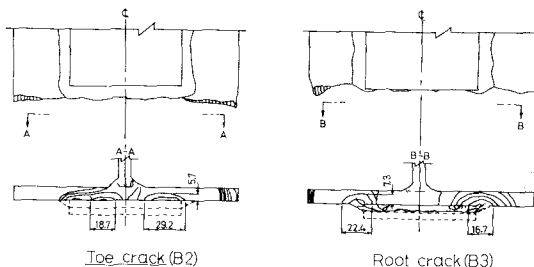


Fig.A3 Sketch of fatigue fracture surface at end of cover plate.

(1986年10月17日受付)