

き裂の突合せ溶接補修とその疲れ挙動

FATIGUE BEHAVIOR OF GROOVE WELD REPAIR OF CRACKED BEAMS

酒井吉永* 松井鋭一** 山田健太郎*** 近藤明雅****

By Yoshinaga Sakai, Eiichi Matsui, Kentaro Yamada and Akimasa Kondo

Two large size test beams, which were fatigue tested once in as-welded condition, were re-used for fatigue tests after the cracked parts were repaired by groove weld. Fatigue cracks were initiated and propagated at the end of the gussets welded to tension flange and at the end of the cover plate. Numerous weld defects due to repair weld were observed on the fracture surface, because the welds were made in relatively unfavorable weld condition. Fatigue life of repaired parts was, however, somewhat longer than that of as-welded one due to grinding the weld toes after weld repair.

1. まえがき

鉄道橋やクレーン走行ばりでは、これまでに各種の疲労変状を経験してきた¹⁾。最近になって、疲労の問題はないと思われていた道路橋にも、繰り返し荷重に起因すると思われるき裂が発見され、その補修・補強方法が検討されるようになった²⁾。

鋼橋で疲れき裂が発見された場合、現場では一般に次に示すような補修・補強が行なわれることが多い。

1)き裂の様子を観察し、必要なら応急的にき裂の先端にドリル孔(ストップホール)を明ける。ストップホールは、き裂先端の鋭い切り欠きを除去し、き裂の進展を一時的に止める働きをもつが、場合によってはストップホールだけで補修効果が期待できる⁴⁾。

2)き裂部分に開先をとり、突合せ溶接で補修する。原形復帰を目的としているので、余盛りは仕上げる。

3)上記1,2の処理を施した後、高力ボルトによる添接板の摩擦接合補強を行なう。き裂の発生が予想される場合に、予防的に補強する場合もある。

4)同様に、添接板をすみ肉溶接して補強する。この場合には、添接板のすみ肉溶接止端に応力集中を生じこの部分からの疲れき裂の発生が予想される。

*	工修	トビー工業株式会社	技術本部技術研究所(〒440 豊橋市明海町一番地)
**		名古屋大学研究生	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)
****	工博	名城大学講師	理工学部土木工学科(〒468 名古屋市天白区塩釜口)

5)き裂を発生させる要因となった構造欠陥を、構造を改良して取り除く。たとえば、引張フランジに溶接されたガセットの形状を改良したり、より影響の少ない腹板に移設する。

これらの補修・補強を行なう場合には、その補修・補強後の疲れ寿命の照査が不可欠である。補修が単に別の部位に疲れき裂発生源を移すだけになることもあるので注意を要する。上記の方法には、作業性やコスト及び強度の信頼性の面で一長一短あり、き裂の発生した部位や現場の状況を考慮して、最適と思われる方法を個々に検討して採用しているのが現状であろう。

このうち、(2)の突合せ溶接による補修は、き裂部分を溶接補修して原形復帰させるもので断面欠損がない、構造物の美観を損なわない、き裂面の防食・防錆ができる、などの利点がある。その反面、作業環境の悪い現場において死荷重及び活荷重の作用下で溶接補修を行なわなければならないという問題点がある。

溶接補修については、応力作用下の溶接による残留応力や機械的性質及び溶接変形、溶接時の熱による座屈などの研究が進められている。しかし、溶接補修後の継手の疲れ強さについては、必ずしも明確にされておらず、補修の効果を判断するうえで、補修・補強後の継手の強度を知る必要がある。¹⁰⁾

本研究では、各種の付加物(引張フランジに溶接されたガセット、カバープレート)が溶接された桁を用い、繰返し载荷によってき裂を生じさせ、現場を想定した溶接補修をしたあとに疲れ試験を行なって、補修部の疲れ挙動を検討した。溶接補修は、溶接工や溶接順序を変えて行ない、これらの違いが補修後の疲れ強さに及ぼす影響を検討した。また、補修箇所には、超音波探傷試験と放射線透過試験を行ない、溶接欠陥を調べるとともに、施工等級が疲れ試験結果におよぼす影響についても検討した。

2. 試験体と疲れ試験方法

(1) 曲げ疲れ試験体の製作

試験体は、Fig.1 に示すように、支間4m、桁高500 mmの上下非対称のI形断面桁を2体用いた。鋼材は、SM50A で、その化学成分と機械的性質をTable 1 に示す。引張側のフランジには、以下に示す付加物を溶接した。

a) G タイプのガセット：引張フランジの両側にフランジ面に平行に、50×10×200mm のガセットをレ形開先で突合せ溶接したもの。A1桁で6ヶ所、A2桁で4ヶ所。

b) T タイプのガセット：フランジ面と直角に、100×10×200mm のガセットをすみ肉溶接したもの。A1桁、A2桁に各4ヶ所。この継手は、一般に疲れ強さが低いもので橋梁では用いないが、本研究ではき裂を容易に発生させることで用いたものである。なお、桁端でフランジを切り欠いて腹板のみで溶接するような構造がこの継手に代表されると思われる。

c) カバープレート：引張フランジの中央に、200×10×400 mmのカバープレートをすみ肉溶接したもの。A2桁のみ1ヶ所。ガセット及びカバープレートの溶接は、すべてJIS Z3212 05016 相当の溶接棒(3.2mmφ)を用いて手溶接で行なった。

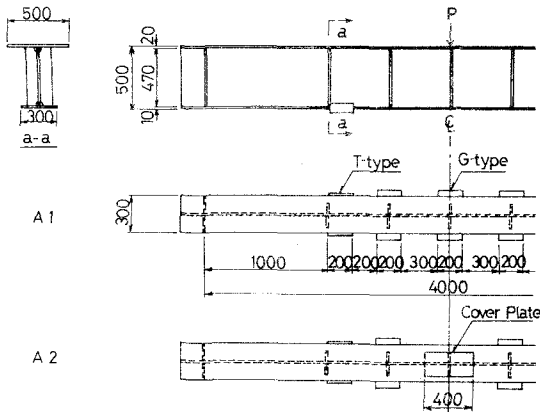


Fig.1 Bending fatigue test beams with welded gussets and cover plates.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of steel.

Steel	Yield Point Lower Flange	Tensile Strength (MPa)	Elonga tion (%)	Chemical Composition (%)				
				C X100	Si X100	Mn X100	P X1000	S X1000
SM50A	373	520	26	16	29	132	13	5

(2) 疲れ試験の方法

疲れ試験は、Fig.2 に示すように、容量35tonのサーボ式疲れ試験機を用いて、約1.6Hz(96回/分)の繰り返し速度で3点曲げ载荷で実施した。また、応力比は0.1とした。Photo 1 にこの状況を示す。

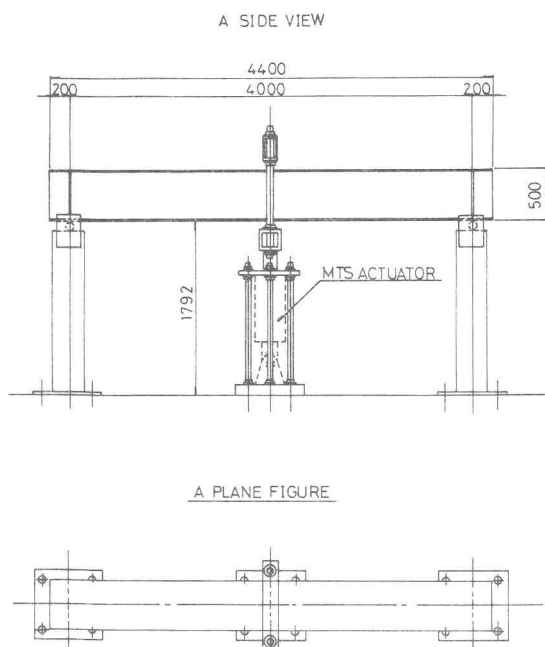


Fig.2 Fatigue test set-up.

各溶接止端部とそこから10mmの位置に銅線(0.1mmφ)を貼り、き裂が発生して銅線が切断したらブザーが鳴るようにした。また、1～2時間毎にき裂の有無を肉眼でチェックした。き裂が発生して長さが10mm程度になった時点を、その継手の疲れ寿命 N_f とみなし、き裂先端を中心にストップホールを明けた。また、継手の位置と作用応力範囲に応じて、ストップホール孔を利用した高力ボルトの空締めや添接板による補強を施し、試験を続行して桁の各継手箇所から疲れき裂を発生させるようにした。Photo 2 にこの状況を示す。疲れ試験は、予備試験で多数き裂を発生させ、溶接補修したあとに、本試験を行なった。この結果、約40ヶ所からき裂が発生し、as-weldedの状態のデータが収集できた。これらの詳細を文献 3,11 に示す。

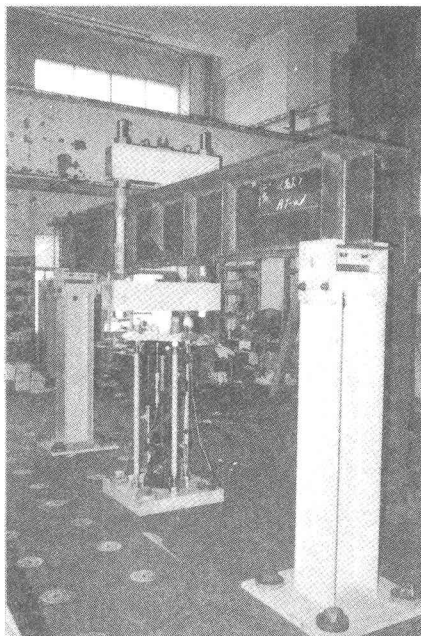


Photo 1 Fatigue test.

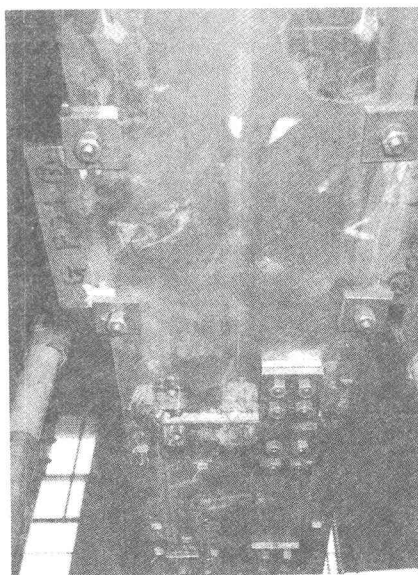


Photo 2 Fatigue cracked tension flange looking underneath. Stopholes drilled at leading edge of cracks are stiffened with high strength bolted splices.

3. 疲れき裂の溶接補修

(1) 突合せ溶接補修の方法

前述の疲れ試験では、疲れき裂が発生した部分のき裂先端に10～20mmφのストップホールをあけた。その時点でのき裂の長さは20mm以下で、ストップホール縁までの距離も30mm以下であった。現場では疲れき裂がかなり進展した後に発見されるケースが多い。そこで、Gタイプのガセットでは、長さ100mmのき裂を突合せ溶接により原形復帰させることを想定した。各継手の溶接補修方法を以下に示す。

Gタイプのガセット：Fig.3 に示すように、疲れき裂の進展方向100 mmの位置にドリル孔(10mm φ)を明け、ガスカットによりき裂を模したスリットを入れた。まず下向きでガウジングにより開先をとった後、下向きで突合せ溶接を行なった。ドリル孔の部分は、溶接のたれ落ちを防止するため、直径 8mm、板厚 3mm程度の鋼円板を挿入して溶接した。さらに挿入板を含めて裏はつりした後、上向きで突合せ溶接した。最終の溶接を上向きで行なったのは、現場の状況により下向きで溶接できない場合を想定したもので、一般に最終の溶接を下向きで行なう場合より条件が悪く、欠陥も生じやすいと思われる。溶接補修後、余盛りをグラインダーで仕上げて除去し、ガセット端を $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げて補修を終了した。

Tタイプのガセット：この継手では、約30mmのき裂の補修を想定した。すなわち、約30mmの位置にストップホールを明け(既にある場合はそれを利用した)ガスカットによりき裂状のスリットを入れた。ガウジングと溶接補修は、Gタイプ同様の手法を用いたが溶接順序を変えた。すなわち、最初上向きで溶接した後、裏はつり裏溶接を下向きでおこなった。補修後、余盛りを削除し、ガセット端の溶接止端を $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げた。

カバープレート：A2桁のカバープレートでは、き裂がフランジを貫通して腹板まで進展した。そこで、Fig.4 に示すように、まず腹板とフランジ上面に開先をとって突合せ溶接をした。腹板の反対側も同様に、裏はつり裏溶接をした。フランジは、最後に上向きで開先をとって下面から裏溶接した。余盛りはすべてグラインダーで削除し、カバープレート端は $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げた。

(2) 補修溶接

補修溶接は、試験体製作時と同じ溶接棒を用いて、すべて手溶接で行なった。現場での補修

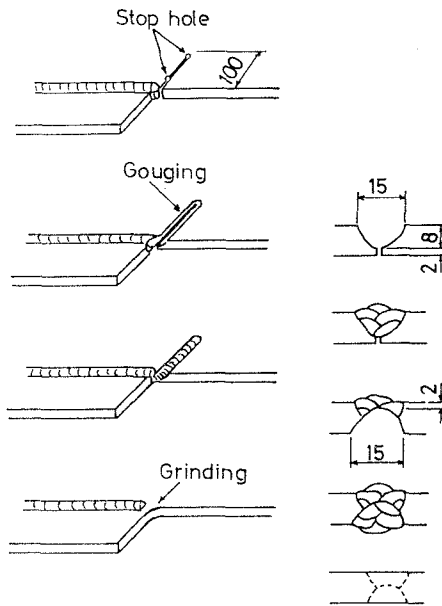


Fig.3 Repair procedure of crack at gusset end by groove weld.

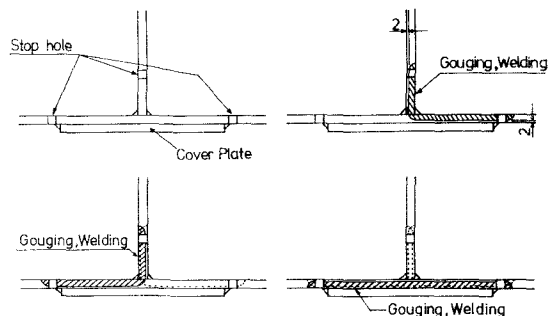


Fig.4 Repair procedure of crack at cover plate end by groove weld.

溶接を考慮して、エンジンウェルダを使用した。補修桁は、工場建屋内の地上約0.8mに設置した。このため、上向き補修溶接時には、溶接工が腰をかめなくてはならず、作業条件は必ずしも良くなかった。

補修溶接は、2名の溶接工によって行なわれた。溶接工を仮にAとBとし、その資格をTable 2に示す。溶接工Aは10年程度の経験を有する者で、常時溶接作業に従事している。溶接工Bは4年程度の経験を持つが、上向き溶接の資格を持たない。A1桁、A2桁とも、腹板に対して片側を溶接工Aが、反対側をBが溶接した。カバプレート部も、両方が片方ずつ溶接補修した。

溶接補修時には、ガウジングによる裏はつり後、カラーチェックにより割れがないことを確認しながら次のステップへ移った。また、溶接補修後、超音波と放射線による検査を行なった。ただし、欠陥があると判定された部分の再補修は行なわなかった。

(3) 非破壊検査の結果

溶接補修部の健全度を評価するため、JIS Z 3060にもとづく超音波探傷試験の結果をFig.5に、放射線透過試験の結果をFig.6に示す。溶接補修後に行なった疲れ試験でき裂が発生した箇所を矢印で、また補修溶接した溶接工の違いをA、Bで示す。今回の実験では、最終の溶接を上向きで行なったり、溶接姿勢が悪くなるような狭い空間で溶接したため、溶接部に欠陥が多数発生した。

欠陥の種類：放射線透過試験の結果、溶接補修部の多くにブローホール(BH)が存在しており、スラグ巻き込み(SI)や、融合不良(LF)

は比較的少なかった。欠陥は、疲れき裂先端に明けたストップホールや100mmの位置に明けたドリル孔、フランジ縁近傍に特に多く発生していた。すなわち、ストップホールの埋め戻し溶接や、溶接終縁近傍は、溶接欠陥の生じやすい箇所であることがわかった。

欠陥の等級：放射線透過試験では、大半が3級または4級と判定され、欠陥の発生が顕著であったことがわかる。超音波探傷試験では、逆に4級と判定されたものが少ない。この違いは、ガセット端の近傍(溶接の終点近傍)の欠陥が、超音波探傷試験ではうまく捕えられず、比較的欠陥の少ない判定になったためと思われる。溶接工の経験年数の違いは、両試験法によっても明瞭に表われている。一般に経験年数の少ない溶接工によるものの等級が悪い。特にTタイプのガセットでは、ガセットが突出していて溶接がしにくく、両者の差が大きく表われている。

Table 2 Qualification of welders.

Welder	Experience	Qualification
A	10-year	A-2F, A2V SA-2F, SA-2V, SA-20 SA-3F
B	4-year	A-2F, A-2V SA-2F, SA-2V

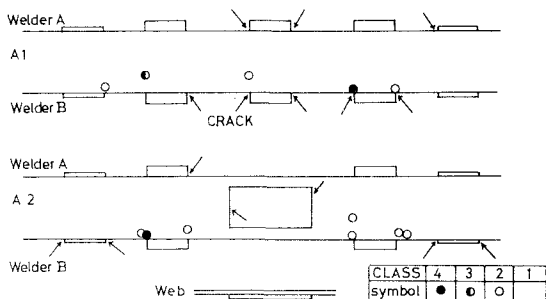


Fig.5 Non-destructive test results at the groove weld repair by ultrasonic test.

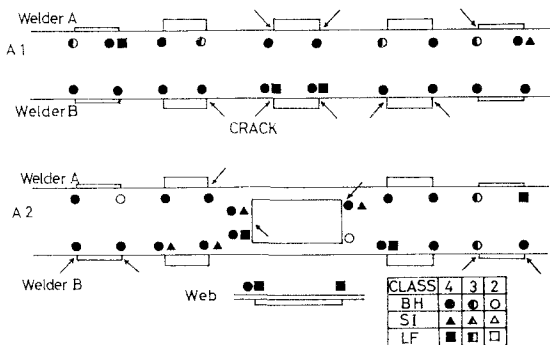


Fig.6 Non-destructive test results at the groove weld repair by X-ray radiography.

4. 溶接補修後の疲れ試験結果

(1) 疲れ試験

溶接補修後、A1桁では $P_r=251\text{kN}$ (スパン中央の応力範囲: $\sigma_r=127\text{MPa}$)で繰り返し载荷した。その結果 8ヶ所からき裂が発生した。約 221万回繰り返したところ、添接板補強のためのボルト孔からき裂が発生したので試験を終了した。A2桁では、 $P_r=212\text{kN}$ ($\sigma_r=108\text{MPa}$)で载荷したところ、4ヶ所からき裂が発生した。繰り返し数が 144万回に達したところで $P_r=251\text{kN}$ ($\sigma_r=128\text{MPa}$)に上げて試験し、さらに 3ヶ所からき裂が発生した。約72万回载荷したところ、カバープレートから発生したき裂のストップホールにき裂を生じたので、試験を終了した。

(2) 溶接補修後の疲れ強さ

溶接補修後の疲れ試験の結果、Fig.5 に示す位置から疲れき裂が発生した。この部分は、試験終了後に破面観察を行なった。また、疲れき裂が発生しなかった箇所は、目視、超音波探傷試験および放射線透過試験を行なったが、き裂の発生は認められなかった。

Gタイプのガセット：このタイプは、20ヶ所のうち 8ヶ所にき裂が発生した。疲れき裂は、ガセット端のフィレット部に発生し、ほぼ主応力に直角方向に進展した。疲れ破断面の側をPhoto 3 に示す。a)は比較的欠陥の少ないもので、疲れき裂がフィレット部のグラインダーの跡から発生したものと思われる。破断したもののうち、最も寿命が長かった。b)は、フィレット部にブローホール状の欠陥があり、これを起点としてき裂が発生したものと思われる。疲れ寿命は、破断したものの中では平均的な値を示した。c)は破面に多くの欠陥を生じており、疲れき裂はいくつかの欠陥から発生し、それが合体しながら進展したものと思われる。疲れ寿命は、破断したものの中で最も短い。

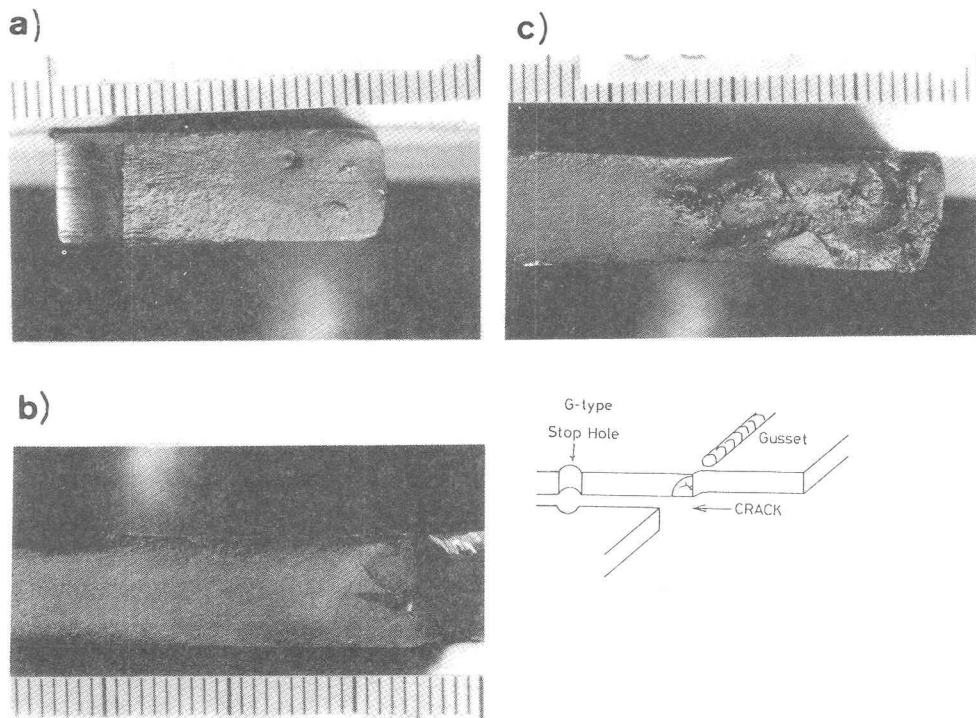


Photo 3 Typical fatigue fracture surfaces of groove welded gusset ends (G). Weld defects were visible on the surfaces.

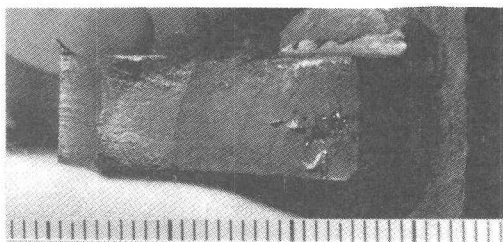
Gタイプのカセットの疲れ試験結果を、Fig.7 に示す。溶接補修後、カセット端を $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げたため、非仕上げのカセット（図中データのばらつきを示す 2本のS-N線図で示す）⁶⁾より長い寿命を有することがわかる。ところが、同様のカセットで $r=20\sim30\text{mm}$ に仕上げたものの疲れ試験結果と比較すると⁸⁾ 今回の実験値は少し短寿命側にある。これは溶接補修したものでは、応力集中のあるフィレット部に、Photo 3 に見られるような溶接欠陥が存在し、それがき裂発生点となつて疲れ強さを低下させたためと思われる。

鋼構造協会疲労設計指針(JSSC)では、 $r \geq$

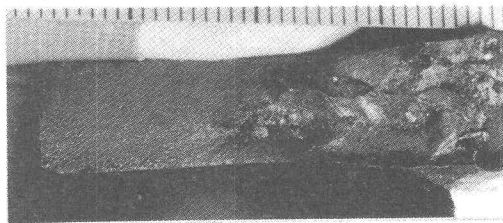
20mm にグラインダー仕上げしたカセットは、継手等級Dに分類される⁵⁾。溶接補修した箇所欠陥がある場合、この許容応力度を満足しないことがある。溶接欠陥の検査や再補修をしない場合には、非仕上げのカセットの継手等級Fを適用するのが妥当であろう。

Tタイプのカセット：このタイプは、16ヶ所中 5ヶ所にき裂が発生した。疲れき裂は、Gタイプと同様に、仕上げたフィレット部に近い溶接欠陥から発生している。Photo 4 に代表的な破断面を示す。a),b) とともに、破断面に多数の溶接欠陥（ブローホール、スラグの巻き込み、融合不良）が存在し、疲れき裂の発生点になったものと思われる。これらの箇所は、Tタイプの継手で最も疲れ寿命の短いものであった。c)は、フィレット部近傍に多数の球形の欠陥が見られ、これが疲れき裂の発生点になったと思われる。疲れ寿命は、破断したものの中では、比較的長いものであった。

a)



b)



c)

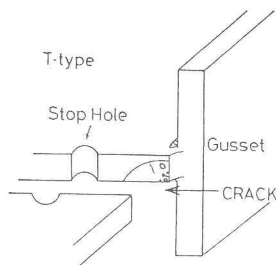
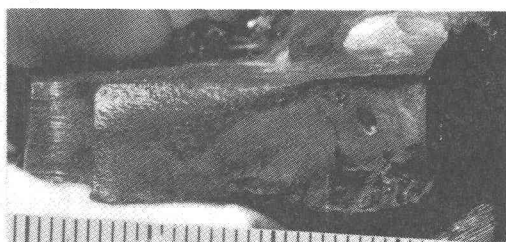


Photo 4 Typical fatigue fracture surfaces of fillet welded gusset ends (T). Numerous weld defects were visible near the end of gussets.

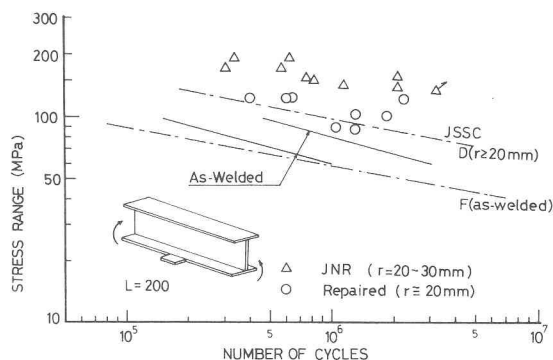


Fig.7 Fatigue test results of beams with gussets of 200 mm long (G) after weld repair.

Tタイプのカセットの補修後の疲れ試験結果を、Fig.8 に示す。非仕上げのデータ（データのばらつきで示す）と比較すると⁶⁾、カセット端を $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げたにもかかわらず、破断したものは非仕上げの疲れ寿命とほぼ同じであった。ただし破断しなかった他の11ヶ所については、補修後の仕上げの効果が認められた。

Tタイプでは、カセットが突出しているため溶接作業条件が悪くPhoto 4 に見られるように比較的大きな溶接欠陥が生じていた。もともとTタイプの応力集中係数はGタイプより大きい。この応力集中と溶接欠陥が重畳して疲れ強さの向上につながらなかったものと思われる。

このタイプの継手は、JSSCの疲労等級分類に示されていない。この継手の等級分類は、非仕上げの場合、継手等級G程度と思われるが、溶接補修後にフィレット部を設ける場合も、非仕上げの場合と同様に、継手等級Gの許容応力度が適当と思われる。

カバープレート：カバープレート端では、2ヶ所き裂が発生した。Photo 5 に、その破断面の1部を示す。

a)



b)

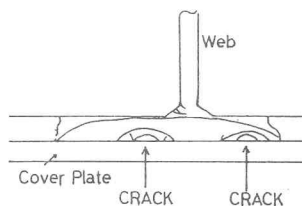
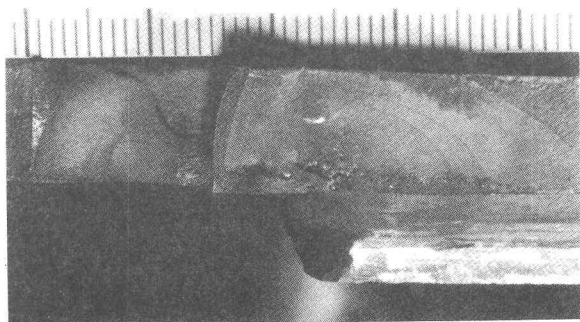


Photo 5 Fatigue fracture surfaces of tension flanges at the end of cover plates. Repair was made by groove weld.

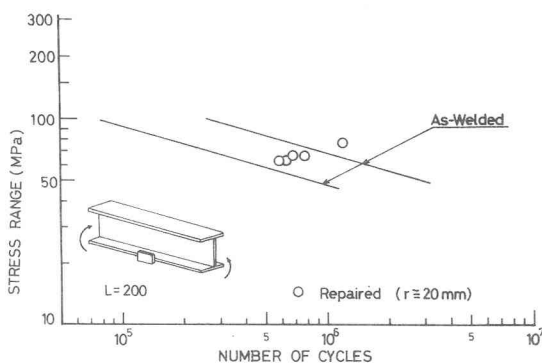


Fig.8 Fatigue test results of beams with gussets of 200 mm long (T) after weld repair.

a)は、約63万回の繰返し数で、表面の長さ 4mmのき裂が発生したものである。き裂は、カバープレート端の仕上げた r部から複数発生し、半楕円形のき裂として進展している。この部分は、突合せ溶接補修された部分であるが、カバープレート端の余盛りが小さく、r部の半径も小さい。また、表面には作用応力直角方向にグラインダー跡も見られ、それらが重畳して予想より早く疲れき裂が発生したものである。また、フランジと腹板の交差部には、3方向から補修溶接が行なわれたため、比較的多くの欠陥が認められた。破面観察の結果、この部分からの疲れき裂の発生も認められるが、破断の主要因とはなっていない。b)は、寿命の長かったもので、疲れき裂は、カバープレート端のストップホールの埋め戻し溶接部の欠陥から発生した。き裂は、いくつかの断面に発生し、それが連結して 1つのき裂を形成している⁹⁾。

カバープレートの補修後の疲れ試験結果を、Fig.9 に示す。非仕上げのカバープレート端の疲れ強さを、リーハイ大学の試験結果のばらつきで示す⁷⁾。補修後のデータの 1つ a)は、比較的早期にき裂を生じた。これは、カバープレート端の仕上げ半径が小さく高い応力集中を生じたためと考えられる。他のデータ b)は、144万回載荷後、荷重を上げたところ 116万回でき裂が発生したもので、非仕上げのデータの上限以上の寿命をもち、補修および仕上げの効果があったことを示している。

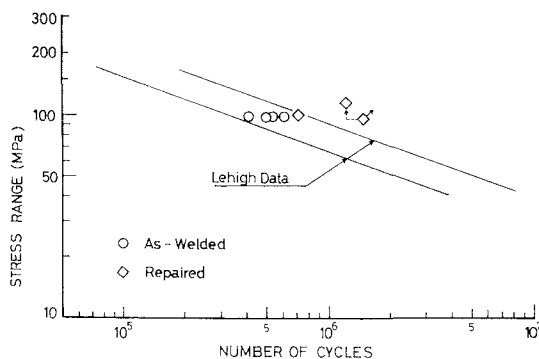


Fig.9 Fatigue test results of cover plates after weld repair.

(3) 施工等級と疲れ強さ

溶接補修は、Gタイプのカセットで20ヶ所、Tタイプで16ヶ所行なった。疲れき裂の多く

は、カセットの端近傍の溶接欠陥を起点として発生・進展した。放射線透過試験は、この部分の欠陥の状況をよく把握しているので、その施工等級と疲れ挙動を比較する。

まず、疲れき裂はGタイプで8ヶ所発生したが、すべて4級と判定された部分から発生した。この部分にはブローホールが存在し、溶込み不良も2ヶ所あった。Tタイプでは、4級と判定された部分3ヶ所と、3級と判定された部分2ヶ所からき裂が発生した。欠陥は、すべてブローホールであり、溶込み不良からのき裂は見られなかった。放射線透過試験では、溶接補修箇所がほとんど4級または3級と判定された。施工等級の差がないため、疲れ強さにおよぼす施工等級の影響も明確にはできなかった。ブローホール等の第1種の欠陥をもつ溶接継手の施工等級は、ある所定の範囲内に存在するすべての欠陥の大きさと数とを評価して分類されるものであり、必ずしも応力集中部に存在する欠陥そのものを評価するものではないことから、施工等級と疲れ強さとの関連がつけにくい。破面観察からも、カセットのような応力集中のある部材の溶接補修では、特に応力集中部の欠陥が重要であり、非破壊検査でもこの部分の欠陥を把握できるようにする必要がある。今回実施した超音波探傷試験では、応力集中部の欠陥を把握できなかったため、施工等級が良いように確認している。今後、応力集中部をもつ継手の検査では、この点に注意する必要があると思われる。

5. まとめ

引張フランジにカセットおよびカバープレートを溶接した桁2体を用いて、疲れき裂を想定したスリットを入れ、現場での溶接補修を想定した突合せ溶接で補修し、補修後の疲れ挙動を調べた。なお、この試験体は、as-weldedの状態で試験したものを再度使用したものである。

疲れき裂の補修は、溶接姿勢や溶接工を変えるなど現場での補修作業を想定して行なった。補修後の非破

壊検査（超音波探傷試験と放射線透過試験）および疲れ試験の結果、次のことがわかった。

- 1) ガセット継手の溶接部は、ストップホールの埋め戻し溶接部と溶接終端部（今回の場合、ガセット端近傍）に、ブローホールやスラグ巻き込みなどの溶接欠陥が多く発生していることがわかった。
- 2) 疲れき裂は、一般にガセット端の $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げたフィレット部の溶接内に存在した溶接欠陥を起点に、発生・進展したものと思われる。
- 3) 現場を想定して比較的悪い条件溶接補修を行なったため、放射線透過試験では多くの継手が4級と判定された。超音波探傷試験では、フィレット部の応力集中を受ける部位の欠陥評価に問題があり、この部分の検査に注意する必要がある。
- 4) 今回溶接補修した箇所は、いずれも $r=20\text{mm}$ 程度に仕上げたため、補修後の各継手は、一般に非仕上げの継手と同等かそれ以上の疲れ寿命を示した。したがって、非仕上げと同程度の寿命を期待するのであれば、今回用いたような溶接補修は、有効な方法であると思われる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、疲れ試験には、名城大学理工学部三宅守之氏（現建設省）戸ヶ崎正美氏（現島田建設）の協力を得、試験体の製作には、トビー工業豊橋製造所鉄構事業部および技術研究所の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阿部英彦・谷口紀久・阿部充：鋼鉄道橋における疲労問題と補修補強，橋梁と基礎，1983年 8月。
- 2) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修補強，橋梁と基礎，1983年 8月。
- 3) 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、名古屋大学土木工学科修士論文、1985。
- 4) 山田健太郎・酒井吉永・菊池洋一：ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果、土木学会論文集，第 341号，1984年 1月。
- 5) 鋼構造協会疲労小委員会：鋼構造協会疲労設計指針・同解説（案），JSSC，Vol.10, No.101, 1974年 5月。
- 6) 山田健太郎・三ッ木幸子・近藤明雅：ガセット溶接継手と設計基準，構造工学論文集，Vol.32A，1986年 4月。
- 7) Fisher, J.W. et al.: Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams, NCHRP Report 102, 1970。
- 8) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983年 5月。
- 9) Yamada, K. and Albrecht, P.: Fatigue Behavior of Two Flange Details, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST4, April, 1977。
- 10) 山田健太郎・近藤明雅：鋼部材のき裂補修補強後の疲れ挙動，土木学会論文集，No.368/I-5, 1986年 4月。
- 11) Yamada, K. et al.: Weld Repair of Cracked Beams and Residual Fatigue Life, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.3, No.2, (Proc. of JSCE No.374/I6) Oct. 1986。

（1986 年10月18日受付）