

800MPa級鋼材の大型ガセット継手の疲労強度

FATIGUE STRENGTHS OF LARGE-SIZE GUSSET JOINTS of 800 MPa CLASS STEELS

下川浩資*, 竹名興英**, 伊藤文夫***, 三木千寿****

By Hirosuke SHIMOKAWA, Koei TAKENA, Fumio ITOH, AND Chitoshi MIKI

Fatigue strengths and fracture characteristics of large-size gusset joints are described in this paper. High strength steels of 30 and 45 mm thickness are used for specimens. The specimens are fabricated using a similar procedure to that for actual bridges. In the three types of in-plane and three types of out-of-plane gusset joints, the fatigue strength decreases as stress concentration increases. The results from this study were used as basis for the revision of fatigue design for the Honshu-Shikoku Bridges.

1. まえがき

構造物の疲労設計においては、ガセット継手は、前面すみ肉溶接継手および縦方向溶接継手とともに断面を決定する重要な継手である。この継手は、ガセットプレートの端部の形状の急変によって応力集中が生じて、それが疲労強度の低下の原因の一つとなる。図-1に示すように1972年の本州四国連絡橋の設計基準¹⁾では、図-1のAに示すようなフランジにガセットをグループ溶接で取付け端部を仕上げた継手は、フィレットの半径が20mm以上の条件で、継手等級はB(200万回で124MPa)であった。図-1のBのような腹板にガセットをすみ肉溶接で取付け端部を仕上げた場合の継手は、C等級(103MPa)であり、図-1のCのように仕上げない場合は、調質高張力鋼の継手としては用いないことになっていた。また、図-1のDのようなガセットと主材が一体となった継手(母材切抜きガセット継手)はB等級であった。この設計基準は、当時の国鉄の設計標準²⁾と図-1のCの継手(設計標準では、D等級、78MPa)および図-1のDの継手(設計標準では、A等級、150MPa)を除いて同一内容である。ただし、図-1のDに示す母材切抜きガセット継手を、トラス主構の格点に用いた場合、設計指針³⁾において、静的強度での評価にもとづいて、フィレット半径Rは、トラス弦材の高さDの1/5より小さくしてはならないと規定されていた。

ガセット継手の疲労強度に影響を与える因子は、フィレット半径、ガセットプレートの長さ、幅、厚さなど多くあることが知られている⁴⁾。しかし、ガセット継手の疲労強度に関する多くの過去の研究は、非調質

* 本州四国連絡橋公団 常任参与 (〒105 東京都港区虎の門4-3-20)
 ** 国鉄・鉄道技術研究所 主任研究員 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)
 *** 建設機械化研究所 (〒417 静岡県富士市大淵3154)
 **** 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

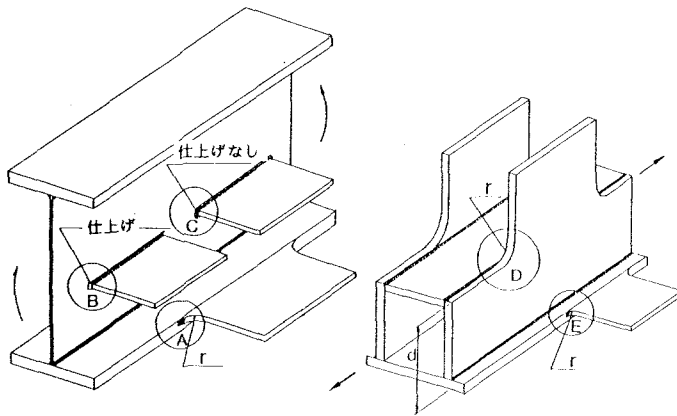


図-1 ガセツ継手の種類

鋼を用いた小型試験片で行われており^{4), 5)}、また、これらの因子の検証は十分とは言えない。本州四国連絡橋の多数の長大橋梁群では、板厚75mmまでの引張強度600MPa～800MPaの調質高張力鋼が相当量用いられる。そのため、これらの継手の疲労強度を検証するために、実構造物と同じ厚さの調質高張力鋼を使用し、実際の製作状態をできるだけ再現した試験体を用いて疲労試験を行い、これらの継手の疲労強度や疲労挙動を研究した。この研究結果は、本州四国連絡橋の疲労に関する設計基準の1982年の改訂の基礎データとして用いられた。

2. 試験体

図-2に、試験体の形状と寸法を示す。試験体は大きく分けて2グループであり、それぞれについて3タイプの形状の試験体がある。一方のグループは、主材と同一平面上に2つのガセツプレートをグループ溶接で取付けたGC、GDおよびGFタイプ試験体であり、他のグループは、主材平面に直角に2つのガセツプレートをすみ肉溶接で取付けたGA、GBおよびGEタイプ試験体である。表-1に使用鋼材の機械的性質と化学成分を、図-3に、試験体の溶接要領を示す。また、この溶接方法および表面仕上げ方法は製作基準⁷⁾に基づいて行った。

GCタイプは、プレートガーダーのフランジに横桁を取付けるための(図-1のA)、あるいはトラスの主構の弦材に床トラスを取付けるため(図-1のE)の仕口をモデル化したフィレット半径 $R=60\text{mm}$ のガセツ継手の試験体である。GDタイプは、トラス主構の格点に用いられる腹板とガセツが一体となった継手をモデル化した試験体である。トラス格点では角溶接による非常に高い引張残留応力が存在するので、この影響を考慮に入れるために、この試験体は、フィレット半径 $R=40\text{mm}$ で主材から切り出し、両側にガセツプレートを溶接で取付けた。GFタイプ試験体は、GCタイプ試験体と同じガセツ継手で、フィレット半径の影響を調べるために、1972年の設計基準¹⁾および設計標準²⁾の値 $R\geq 20\text{mm}$ より小さい $R=15\text{mm}$ とした。これらGC、GDおよびGFタイプ試験体のガセツの板厚は主材より小さく、ガセツプレートの片面は、主材の片面と同一平面となるように取付け、その溶接ビード端は、ガセツプレートと主材の表面がそろうまでグラインダーで仕上げた(以降、同一平面側を前面、反対側を背面と呼ぶ)。それ以外の部分の溶接ビードは仕上げなかった。また、試験体のディテールは実橋梁と同じとした。この論文では、GC、GDおよびGFタイプ試験体を“側面”ガセツ継手と呼ぶことにする。

GA、GBおよびGEタイプは、図-1のB、Cに示すように、横桁を腹板に取付けるための仕口をモデル化した試験体である。GAタイプ試験体は、ガセツ端のまわし溶接部の止端部をグラインダーで仕上げ

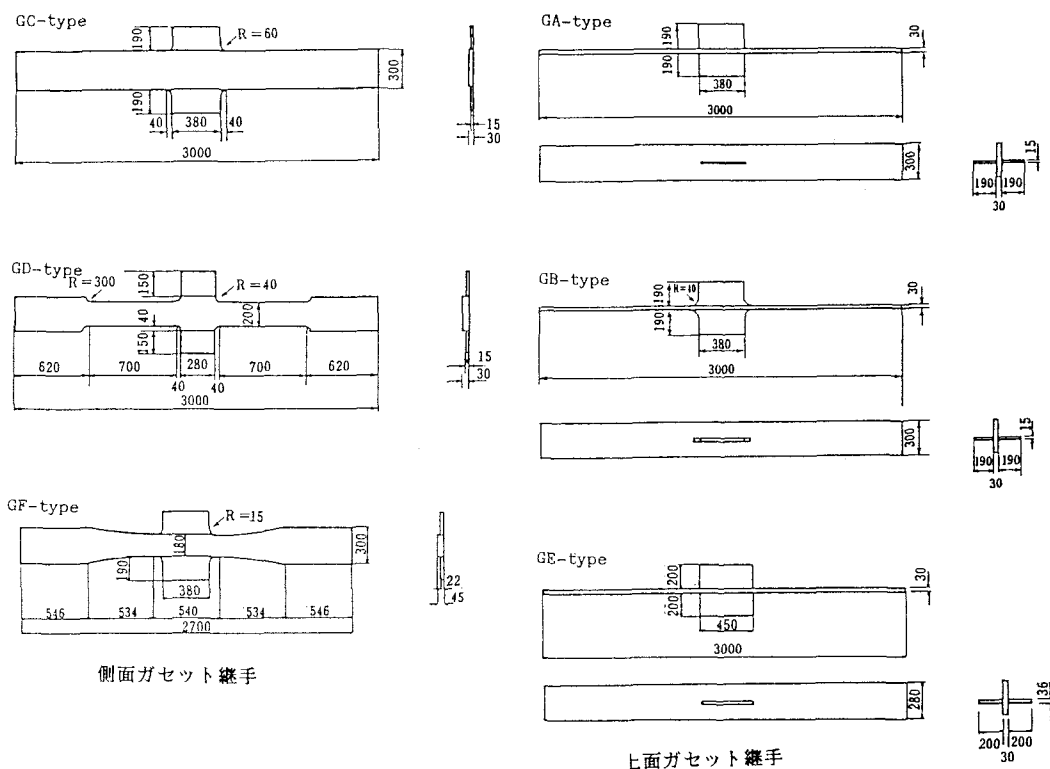


図-2 試験体の形状と大きさ

た。これは、鉄道橋で腹板にガセットを取付ける一般的な方法である。GBタイプ試験体は、従来の基準の継手種類にない継手であり、半径40mmのフィレットの付いたガセットで、かつすみ肉溶接端部をグラインダーで滑らかに仕上げることによって疲労強度が向上することを期待した。GEタイプ試験体のガセットプレートを取付けるすみ肉溶接は、仕上げないままである。これらのGA、GBおよびGEタイプ試験体を、“上面”ガセット継手と呼ぶこととする。

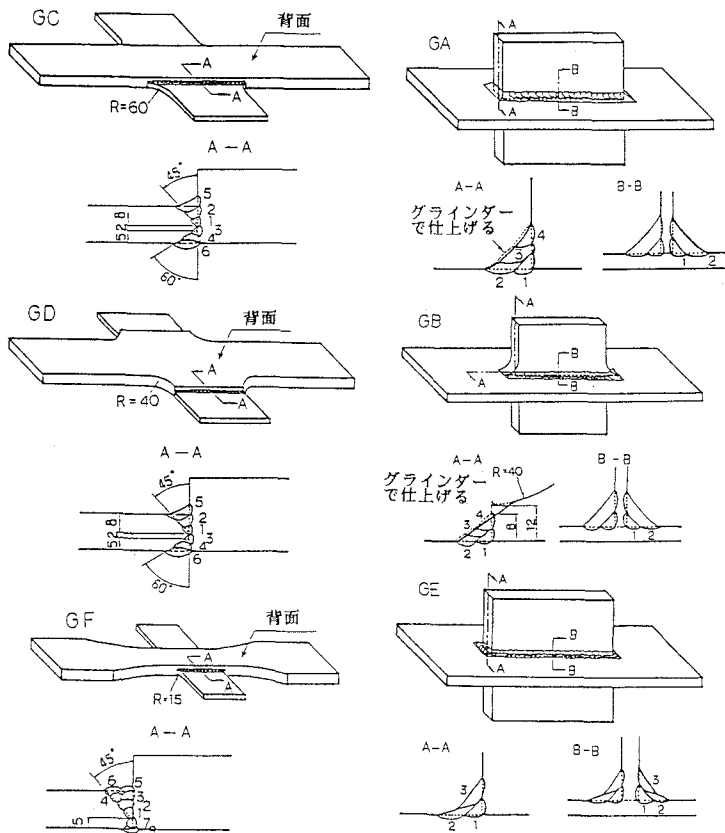
3. 応力分布の解析

試験体の表面および内部の応力分布を解析するために有限要素法を用いた。GC、GDおよびGFタイプ試験体の解析は平面応力の仮定で行った。また、GA、GBおよびGEタイプ試験体では、まず、試験体全体の応力分布を、シェル要素を用いて解析し、つぎに、主材での応力分布は平面ひずみの仮定を用いて解析した。GAタイプ試験体のガセット端の形状の測定値は、曲率半径1.5mmで、フランク角は135°である。図-4は、GE-1タイプ試験体のすみ肉溶接の止端部の測定結果である。有限要素解析でのGEタイプ試験体のガセット端の溶接止端形状は、この測定結果から、半径は0.56mm、フランク角は135°とした。また、最小要素寸法は0.1mm×0.1mmとした。

有限要素解析で求めた(GC、GDおよびGFタイプ試験体)および(GA、GBおよびGEタイプ試験体)のガセット端部の板厚方向の応力分布を図-5(A)および図-5(B)にそれぞれ示す。試験体のガセット端の表面での公称応力に対する最大応力の比である応力集中係数は、GCは1.6、GDは1.6、GFは2.2、GAは4.7、GBは2.3およびGEは5.9である。ガセット端の半径がほぼ同じとき、応力集中係数は、側面ガセット継手より上面ガセット継手の方が大きいことがわかる。

表－１ 機械的性質と化学成分（ミルシート）

鋼材	機械的性質					化学成分												備考
	t	Y.P.	T.S.	EL	VE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	B	V	Ceq	
	mm	MPa	MPa	%	N.m	×100			×1000			×100			×1000		×100	
HT80	30	833	882	22	80	11	25	97	18	8	250	83	51	38	10	44	50	主材 GA～GE
HT80	22	764	823	24	201	10	27	97	15	5	—	104	59	33	2	—	50	主材 GF
SM58Q	15	568	657	36	186	14	34	133	17	6	—	1	2	3	—	37	39	ガセット材 GA～GD



図－３ 溶接の詳細

４．疲労試験の方法

疲労試験は動的能力4000kNの油圧サーボ制御方式の大型疲労試験機を用いて実施した。応力波形は正弦曲線で、繰返し速度は5～6Hzである。応力比は、約0.1の片振引張りである。また、一部の試験で、疲労破面にビーチマークを残すために、一定回数ごとに最小応力を上昇させて応力範囲を半減させた。

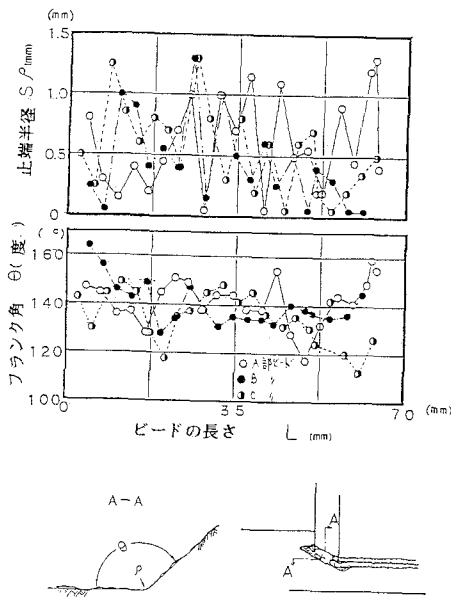


図-4 溶接止端形状の測定

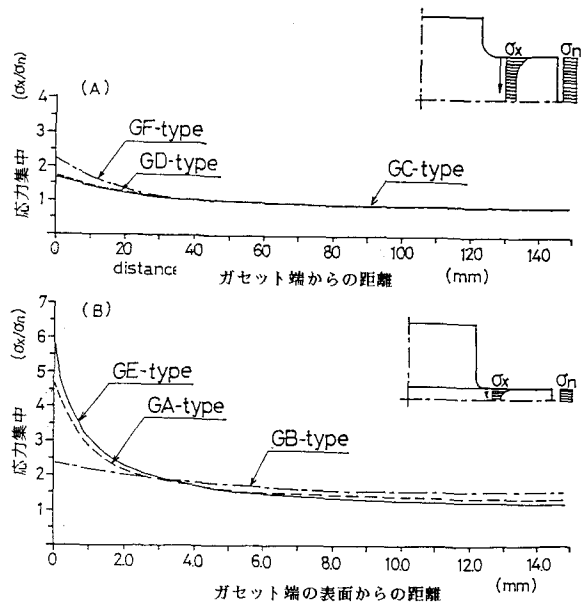


図-5 ガセット端部の応力分布

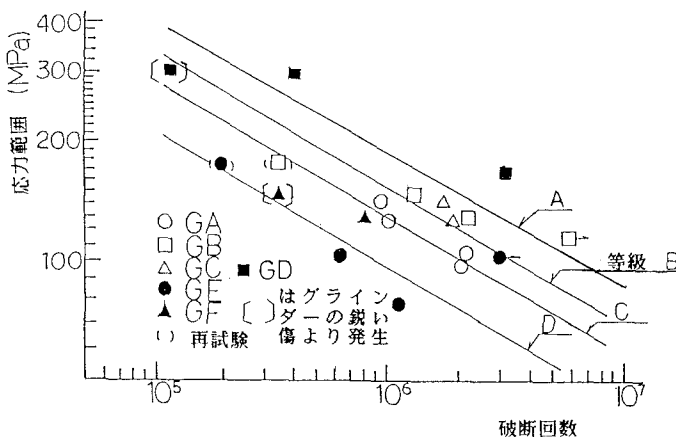


図-6 試験結果と許容応力範囲の比較

5. 試験結果と考察

図-6に、疲労試験結果を示す。図のように疲労強度は、GDタイプ試験体の疲労強度が最も高く、2番目がGCとGBタイプ試験体で、3番目がGAとGFタイプ試験体で、GEタイプ試験体が最も低い。この順番は、上記した応力集中係数の順番と異なる。しかし、側面ガセット継手であるGC、GDおよびGFタイプ試験体において、あるいは上面ガセット継手であるGA、GBおよびGEタイプ継手においては、疲労強度の

順位は、それぞれ応力集中係数の順位と同じである。したがって、応力集中の大きさが同じレベルなら、側面ガセット継手の方が、上面ガセット継手より、疲労強度はかなり低いことになる。図-6に、本州四国連絡橋の新しい設計基準の各継手等級の設計寿命曲線を実線で示す。この設計基準のガセット継手の許容応力範囲は、フィレットの半径(R)、主材の幅(D)および溶接止端部の仕上の有無によって違う。

GCタイプ試験体は設計基準の継手等級Bに分類されており、その疲労試験結果は、B等級設計寿命曲線を

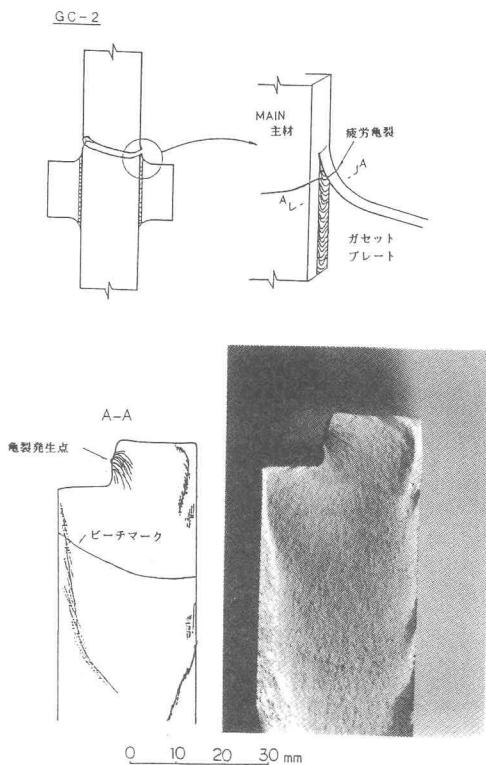


図-7 GC-2試験体の破面

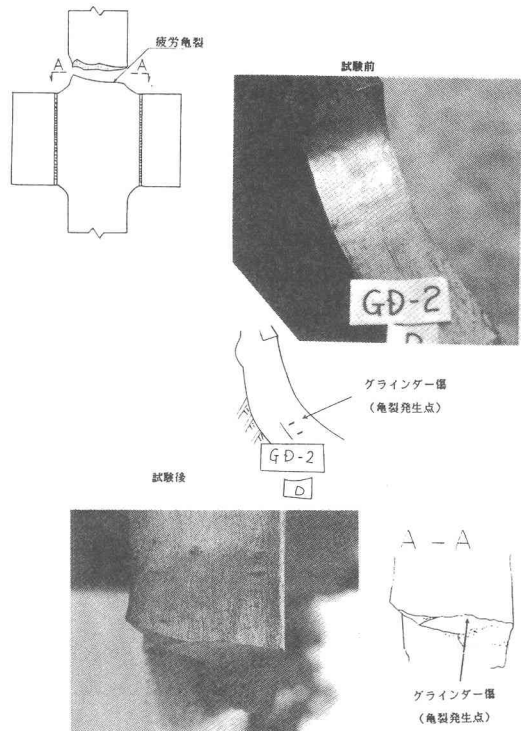


図-8 (a) GD-2試験体の破面

満足している。図-7にGC-2試験体の疲労破断性状を示す。図のように、疲労亀裂は、フィレット端より少しガセットプレート側に入った背面のエッジの溶接ビードの凹凸から発生した。他のGCタイプ試験体でも、同様に応力がほぼ最大となる部分から疲労亀裂は発生している。その疲労亀裂の進展性状は、まず4分の1円として進展し、次に主材およびガセットのプレートを貫通して、4分の3円に成長し、さらに主材の板幅方向に疲労亀裂は進展していった。

GDタイプ試験体は、継手等級Aに分類されている。試験結果は、GD-2試験体を除き、この等級の設計寿命曲線を満足している。GD-2とGD-3の破面を図-8に示す。GD-1とGD-3試験体では、疲労亀裂はフィレット端の近くのエッジから発生した。しかし、GD-2試験体では、疲労亀裂はフィレット端のグラインダーによる応力直角方向の鋭い傷(図-8)から発生した。そのため、この試験体は、GD-1とGD-3試験体より疲労強度がかなり低い。このように、応力直角方向の傷は強度低下の原因となる。

GFタイプ試験体($R=15\text{mm}$)は、半径の大きいGCタイプ($R=60\text{mm}$)試験体にくらべて疲労強度はかなり低く、特にGF-1試験体はかなり低かった。また、図-9にGF-2試験体の破面を示すが、すべてのGF試験体では、疲労亀裂は主材の板厚の中心近くから発生した。GF-1試験体の疲労強度が特に低いのは、GD-2試験体と同様に、グラインダーによる応力直角方向の鋭い傷から疲労亀裂が発生したためであり、このように半径が小さく(15mm)なると仕上げが難しくなるので、あまり小さい半径は部材の製作において問題があると考えられる。また、GF-2試験体において疲労亀裂がエッジでなく内側から発生したのは、GF-1試験体がグラインダー傷から破断した試験結果によって、応力平行方向に入念に仕上げを行うことによって、エッジが円く滑らかになったためである。

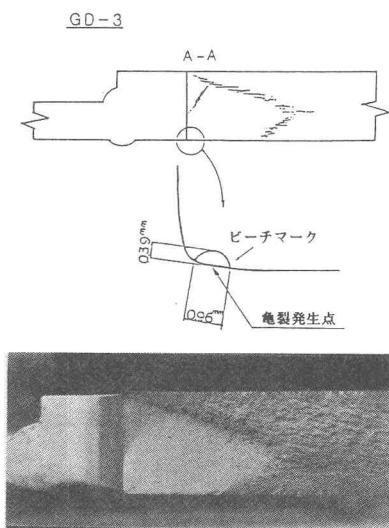


図-8 (b) GD-3 試験体の破面

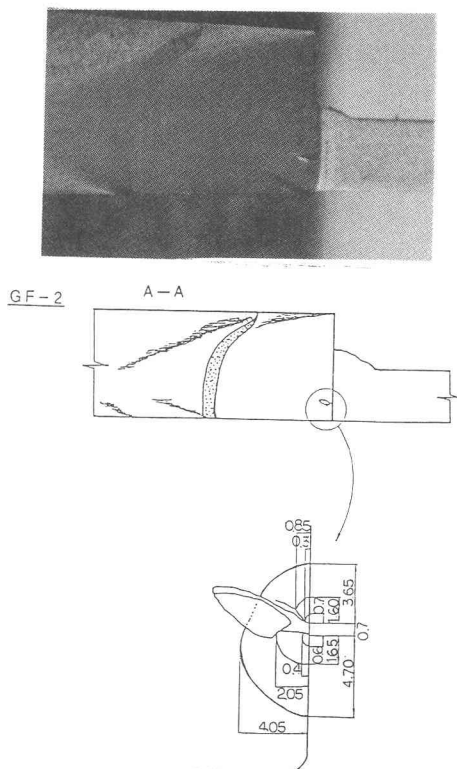


図-9 GF-2 試験体の破面

GAタイプ試験体は、当時の設計基準では継手等級Cに分類されているが、新しい設計基準ではD等級とした。図-6に示すように試験結果は、D等級は十分満足しているが、C等級以下である。図-10にGA-3試験体の疲労破面を示すが、このタイプ試験体のうち2つは、すみ肉溶接のルート部から疲労亀裂が発生した。他の2つは、すみ肉溶接の止端部のグラインダー傷より疲労亀裂が発生し、その発生位置は一方の試験体は主材からで、他方の試験体はガセットプレート側からである。

GBタイプ試験体の継手は、当初の設計基準¹⁾および建造物設計標準²⁾の継手種類には含まれてなかった。この試験体の試験結果は、図-6のようにB等級設計寿命曲線付近にプロットされており、したがってC等級設計疲労強度を十分に満足している。図-11にGB-1試験体の疲労破面を示すが、このタイプ試験体はすべて、疲労亀裂がすみ肉溶接のルート部の不溶着部より発生した。このルート部より発生した疲労亀裂は、まず、すみ肉溶接の表面の方向へ進展し、さらに表面に達し、疲労亀裂の幅が、不溶着部より幅が大きくなった後に、主材に進展する(図-11)。この疲労亀裂の進展性状は、GA、GBおよびGEタイプ試験体とも非常に似ている。フランジのカバープレートの横方向溶接の止端部をグラインダーで仕上げた場合には、疲労亀裂はしばしば溶接のルートより発生する⁹⁾。しかし、これらのタイプの継手で、すみ肉溶接のルートから疲労亀裂が進展することは、過去の研究では報告されていない。疲労亀裂がルートより発生するということは、もしすみ肉溶接のサイズの大きさが十分でなく、かつルートが表面に近い場合は、疲労強度がかなり低下する可能性があることを示している。このことは、止端部をグラインダーで仕上げた場合(GAタイプ)、あるいはフィレットを付けた場合においては、ルートの応力を低減させる工夫をしないと疲労強度が向上しないことを示している。

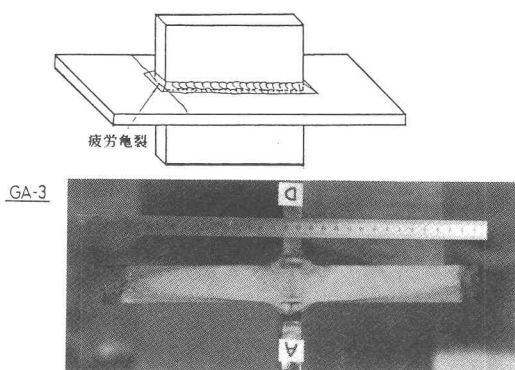


図-10 GA-3試験体の破面

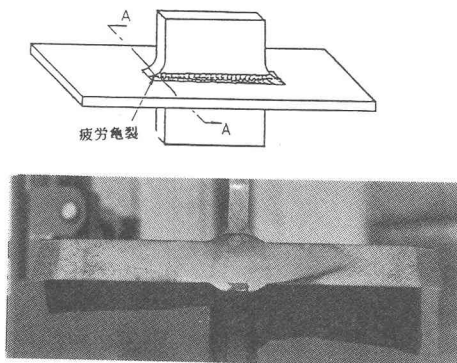


図-11 GB-1試験体の破面

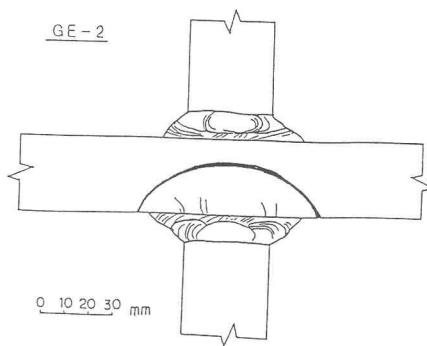
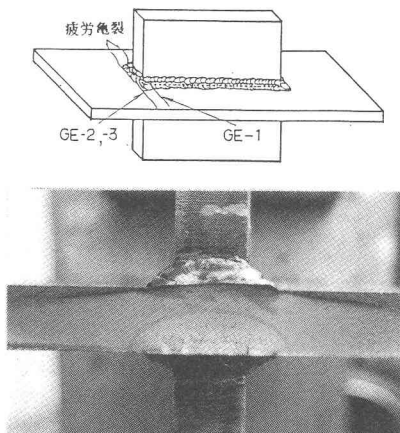
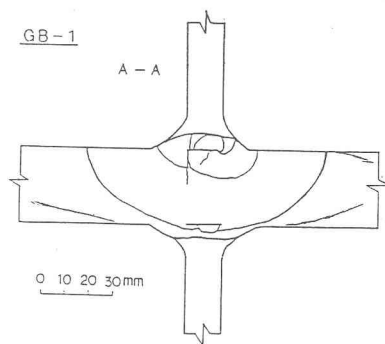
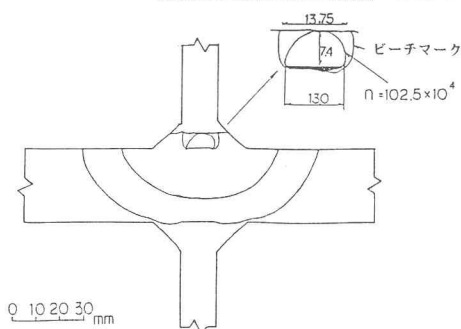


図-12 GE-2試験体の破面

本州四国連絡橋プロジェクトでは、調質高張力鋼を用いた継手においては、GEタイプ試験体のガセット継手は用いないことにしている。ほとんどのGEタイプ試験体の試験結果は、D等級設計寿命曲線も満足しない。したがって、このような設計ディテールを用いる場合には、D等級疲労強度より低い新しい等級（E）を設定しなければならない。図-12に、GE-2の疲労破面を示す。疲労亀裂は、2つ試験体では止端から、他の試験体はルートから発生した。

6. 結論

(1) 側面ガセット継手の3タイプおよび上面ガセット継手の3タイプで、それぞれのグループで、疲労強度は応力集中が大きくなるにしたがって低下している。また、応力集中係数がほぼ同じ上面と側面ガセット継手をくらべると、側面ガセット継手の疲労強度はかなり低い。

(2) 側面ガセット溶接継手では、疲労亀裂はガセットプレートの端部の付近の背面の溶接の凹凸から発生することが多い。したがって、疲労強度は、ガセットプレートの端部の近く、特に溶接ビード端の仕上げのレベルの影響を受ける。グラインダーの応力直角方向の鋭い傷があると、しばしば強度低下の原因となる。また、あまり小さいフィレット半径は、仕上げのレベルが低くなり、強度低下の原因となるので注意しなければならない。

(3) すみ肉溶接を用いた上面ガセット継手では、疲労亀裂はしばしば、すみ肉溶接のルートの不溶着部から発生する。この亀裂は、まず、すみ肉溶接ののど厚を切断し、次に主材に進展する。したがって、すみ肉溶接の止端部の仕上げだけでなく、ルートの不溶着部の位置および応力状態が疲労強度に影響を与える。したがって、疲労強度を低下せないためには、レ形開先で完全溶込みを用いるとよい。

(4) この試験結果に基づいて1982年に疲労に関する設計基準が改訂された。この設計基準では、ガセット継手の許容応力範囲は、ガセットのタイプ、フィレットの半径、プレートの幅および溶接止端部の仕上げの有無によって異なる。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説、1977-8.
- 2) 日本国有鉄道：建造物設計標準（鋼とコンクリートとの合成鉄道橋）および解説、1974-3.
- 3) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会・構造分科会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査報告書・別冊3・トラス格点構造設計指針（案）、1976-3.
- 4) Zettlemoyer, N. and Fisher, J.W.: Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Gusset Plate, Welding Journal, Vol.57, 1978-2.
- 5) 山田健太郎、牧野時則、馬場千尋、菊池洋一：疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析、土木学会論文集、第303号、1980-11.
- 6) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書、1983-3.
- 7) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準・同解説、1977-3.
- 8) 西田正孝：応力集中、森北出版、1967.
- 9) Gurney, T.R.: Fatigue of Welded Structures (second edition), Cambridge University Press, 1979.

(1986年10月17日受付)