

荷重伝達型十字すみ肉溶接継手ルート破壊の疲労強度解析

FATIGUE STRENGTH ANALYSIS OF LOAD-CARRYING FILLET WELDED CRUCIFORM JOINTS

森 猛^{*}、貝沼 重信^{**}、三木 千寿^{***}

By Takeshi MORI, Shigenobu KAINUMA, Chitoshi MIKI

The object of this paper is to recommend fatigue design stress and allowable stress range of load-carrying fillet welded cruciform joints which fail by fatigue cracking from the weld root, and clarify effect of plate thickness, weld penetration, leg length and weld-shape on the fatigue strength. For this purpose, many existing fatigue test data of the joints are collected and rearranged. Furthermore, fatigue crack propagation analysis is also carried out by using stress intensity factor which is obtained from the finite element stress analysis and the energy method.

1. はじめに

溶接橋梁においては、荷重伝達型十字すみ肉継手と見なされる溶接部のルートから疲労亀裂が発生することとも少なくなく¹⁾、その疲労強度を評価するための方法を明確することは橋梁を疲労に対して安全に使用する上で不可欠である。しかし、ルート破壊する場合の疲労照査応力および許容応力範囲は各種疲労設計基準類でまちまちであり、どのように照査するのが最も適切であるかは明らかとなっていない。例えば、鉄道建造物設計標準²⁾および日本鋼構造協会疲労設計指針(案)1989.³⁾(以後 J S S C 指針(案)と呼ぶ)では照査応力としてのど断面での平均せん断応力を用いて、一方英国の B S 5 4 0 0⁴⁾や欧州鋼構造協会連合(E C C S)の疲労設計指針⁵⁾ではのど断面応力を直応力と見なして疲労照査を行なうこととしている。一般にせん断応力と直応力では設計に用いる応力範囲と疲労寿命の関係の傾きが異なるため(多くの場合、せん断応力に対して-1/5、直応力に対して-1/3)、いづれの応力を用いて疲労照査を行なうかは重要な問題である。さらに疲労許容応力範囲も疲労寿命 2×10^6 回に対して、それぞれ 80 or 64MPa, 80MPa, 43MPa, 36MPa とまちまちである。

十字すみ肉溶接継手の未溶着部先端は非常に鋭いことから、その疲労強度の評価には破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析が有効と考えられている。Frankら⁶⁾は十字すみ肉溶接継手のルート部から発生する疲労亀裂の応力拡大係数を算出するための簡便式を示すとともに、それに基づいた進展解析を行なっている。

* 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

** 法政大学大学院生 建設工学専攻 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

*** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

その結果、十字溶接継手・ルート破壊の疲労強度に対しては主板の厚さおよびすみ溶接の脚長と溶込み深さが支配的な影響因子となることを示している。また、館石ら⁷⁾は、Frankらと同様の解析および独自に行なった疲労試験の結果に基づき、十字継手の疲労照査応力として中板側の溶接脚長を有効厚として計算した溶接部の断面積に基づく応力を用い、許容応力範囲をJ S S C 指針(案)のG等級 (2×10^6 回に対する許容応力範囲 50MPa) で定めることを提案している。しかし、これらはいずれも二等辺三角形のすみ肉溶接部(等脚長)を有する十字継手を対象として検討したものであり、溶接形状が凸あるいは凹、また不等脚となった場合に疲労強度がどのように変化するかについては不明である。

本研究では、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手がルート破壊する場合の適切な疲労照査応力と許容応力範囲を示すこと、さらに疲労強度に対する板厚、溶込み深さ、脚長、溶接形状(不等脚、凹凸)の影響を定量的に明らかにすることを目的とし、これまでに行なわれた疲労試験結果を収集・整理するとともに、種々の形状・寸法の十字すみ肉溶接継手を対象としてルートからの疲労亀裂に対する応力拡大係数の解析およびそれに基づいた疲労亀裂進展解析を行なった。

2. 疲労試験データの整理

荷重伝達型十字すみ肉溶接継手がルート破壊する場合の疲労試験データ⁷⁻⁹⁾を収集し整理した結果を図1に示す。図の縦軸はのど断面での応力範囲 $\Delta \sigma$ である。のど厚は図2に示すように(サイズ+溶接の溶込み深さ) $\div \sqrt{2}$ として求めた。なお、図1に示すデータはすべて等脚のすみ肉溶接を施した試験体より得られたものである。また、いずれの試験体とも溶接形状は若干凸となっており、脚長とサイズは等しい。

図中の実線はJ S S C 指針(案)での直応力を受ける継手の内継手等級H (2×10^6 回に対する許容応力範囲 40MPa, $\Delta \sigma - N$ 関係の傾き-1/3)、破線はせん断応力を受ける継手の継手等級S (2×10^6 回に対する許容応力範囲 80MPa, $\Delta \tau - N$ 関係の傾き-1/5) に対する設計 $\Delta \sigma - N$ 曲線である。実線で示す設計曲線は疲労試験データのはほぼ下限に位置しており、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊の許容応力範囲はJ S S C 指針(案)での継手等級H程度とするのが妥当と考えられる。その際、のど断面応力はのど厚を(サイズ $\div \sqrt{2}$) として求めるのが良い。これは、設計時にすみ肉溶接のルート部への溶け込みを期待できないためである。また、 $\Delta \sigma - N$ 関係の傾きがほぼ -1/3となっていることより、照査応力としては直応力を用いるのが適切と言える。

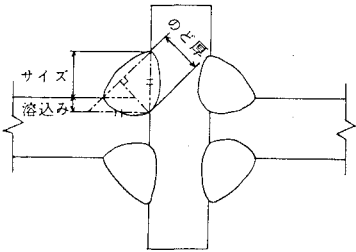
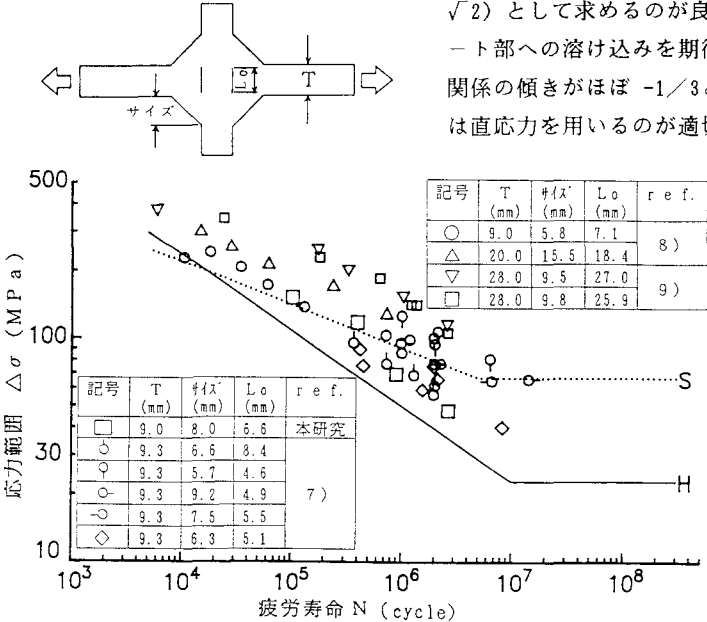


図2 のど厚の定義

図1 疲労試験データの整理

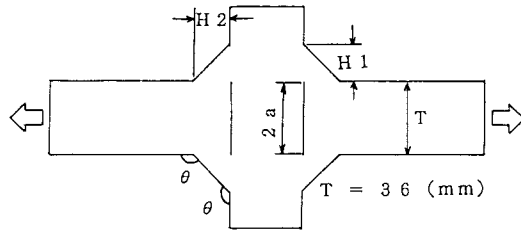


図3 応力拡大係数の解析モデル

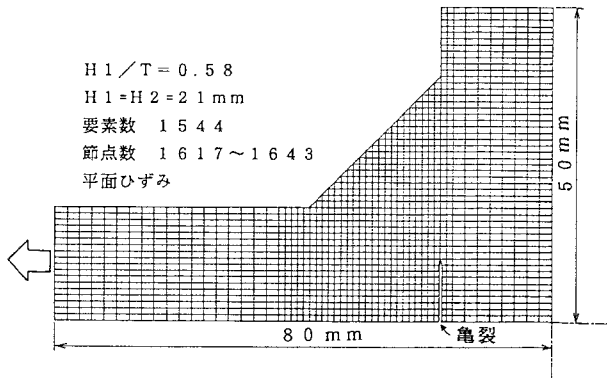


図4 要素分割例

3. ルートから発生する疲労亀裂の応力拡大係数

解析対象は、図3に示す板厚36mmの荷重伝達型十字すみ肉溶接継手モデルであり、溶接形状（等脚、不等脚、凹形、凸形）および溶接サイズをパラメータとしている。これらのモデルに対して2次元平面ひずみ条件下で有限要素解析を行ない、その結果に基づきエネルギー法により応力拡大係数を求めた。図4に要素分割例を示す。ここでは対称性を考慮し1/4モデルを用いて解析している。未溶着部近傍および亀裂が進展する断面での要素寸法は1mmとした。これは、中央亀裂型試験片（板幅80mm）を対象とした有限要素解析から求めた応力拡大係数とそれに対する厳密解¹⁰⁾との比較から設定したものである。なお、要素寸法1mmの中央亀裂型試験片に対して有限要素解析から算出した応力拡大係数と厳密解との差は2%未満であった。応力拡大係数の算出に必要なエネルギー解放率は、亀裂の長さを1要素寸法（1mm）ずつ増加させ、荷重と荷重点変位から求めるエネルギーの変化から求めた。亀裂長さaは板厚の1/4から（板厚/2+0.8x脚長）まで変化させた。

図5(a)~(c)に応力拡大係数の解析結果を示す。図中の実線はFrankらの式を用いて求めた応力拡大係数を示している。図中の破線は疲労亀裂の長さが板厚の1/2（18mm）となる位置を示している。図(a)に示すようにすみ肉溶接が二等辺三角形（等脚長）の場合には、Frankの式により高い精度で応力拡大係数を評価できる。図(b)は、すみ肉溶接が不等脚の場合、図(c)は溶接形状が凹形あるいは凸形の場合の応力拡大係数の解析結果を示している。図中の実線は、道路橋示方書¹¹⁾のすみ肉溶接サイズの計算方法に従い各溶接部をそれに内接する二等辺直角三角形と見なし、Frankの式より求める応力拡大係数を示している。いずれの場合もFrankの式は本解析結果に比べ、応力拡大係数を大きめに評価している。以上より、以後の解析における応力拡大係数の算出は、すみ肉溶接が二等辺三角形の場合Frankの式、その他の場合には有限要素解析結果にエネルギー法を適用することにより行なう。

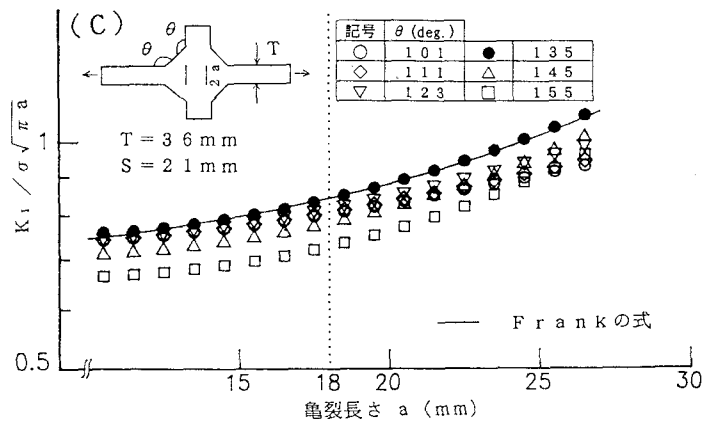
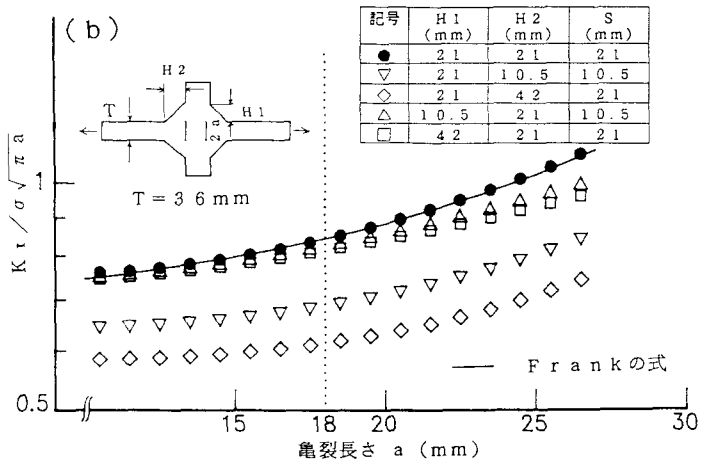
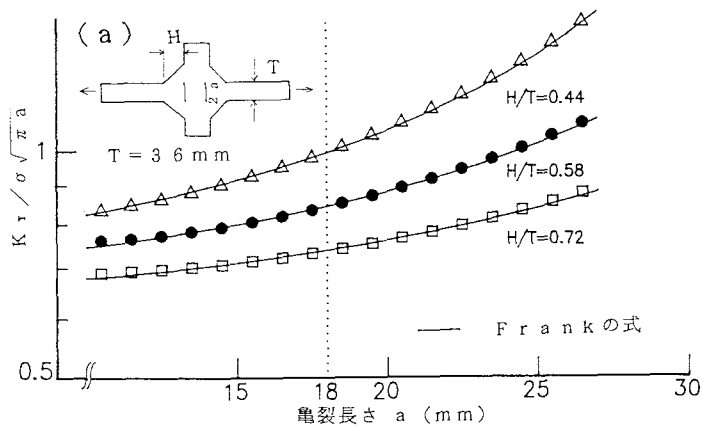


図5 応力拡大係数の解析結果

4. 疲労試験および疲労亀裂進展解析

4.1 疲労試験

供試鋼材は板厚 9mm の SM490YA であり、その機械的性質および化学的性質を表 1 に示す。溶接は低水素系溶接棒（5φ）を用いて下向きで行った。溶接電流は230～240A、電流は30～35V、速度は13cm/minである。

試験体の形状および寸法を図 6 に示す。

試験に用いた疲労試験機は、動的能力±100 kNの電気油圧サーボ式材料試験機である。疲労試験は、上限荷重を100kN（のど断面応力 150 MPa）とした片振り引張り荷重下で行なった。これは、溶接ルート部に存在する圧縮残留応力の影響を取除くためである^{12,13)}。

表 1 機械的性質および化学成分

鋼材	機械的性質			化学成分 (%)					
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	C	Si (x100)	Mn (x100)	P (x1000)	S (x1000)	Ceq (x100)
SM490YA	358	551	27	16	37	140	20	40	41

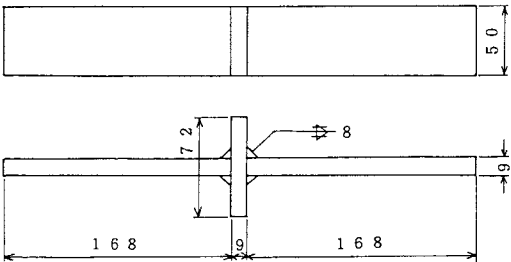


図 6 試験体の形状および寸法

4.2 解析方法

疲労寿命は、各疲労亀裂長さに対する応力拡大係数範囲ΔKを疲労亀裂進展速度da/dNとの関係に代入することにより疲労亀裂の進展をシミュレートし、これを初期亀裂から限界亀裂まで繰り返すことにより推定する。初期亀裂長さは、未溶着長さの測定結果（測定値5.0～7.45 mm, 平均値6.6mm）に基づき、3.3mmとした。すなわち、すみ肉溶接は母材に1.2mm程度溶け込んでいた。限界亀裂長さは 10.9mm（0.8×脚長+板厚/2）とした。疲労亀裂進展速度da/dNと応力拡大係数範囲ΔKの関係式としては J S S C 指針(案)に示される平均設計曲線および最安全設計曲線⁶⁾を用いた。

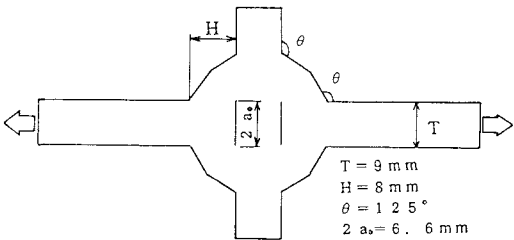


図 7 試験体の解析モデル

平均設計曲線 $da/dN = 1.5 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.9^{2.75})$ (1)

最安全設計曲線 $da/dN = 2.7 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.0^{2.75})$ (2)

da/dN : m/cycle, ΔK : MPa $\sqrt{m}$

応力拡大係数は、試験体をその形状・寸法の測定結果に基づき図 7 のようにモデル化し、前章と同様に有限要素法とエネルギー法から求めた。ただし、前章のモデルに比べ板が薄いことを考慮し要素寸法は0.25mmとした。したがって、応力拡大係数は亀裂長さ0.25mmおきに計算されるが、任意の長さの亀裂に対する応力拡大係数は0.25mmごとに算出した値を基にLagrangeの補間式を用いて求めた。

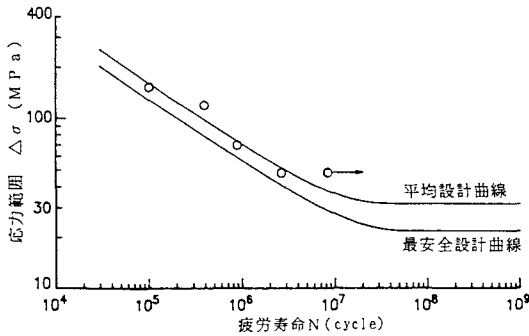


図8 疲労試験結果

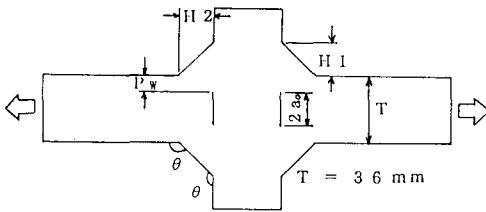


図9 疲労亀裂進展解析に用いたモデル

4.3 試験結果と解析結果の比較

図8に疲労試験結果を示す。図の縦軸はのど断面応力範囲 $\Delta\sigma$ であり、のど断面積は(板幅)×(溶接サイズ+溶込み深さ)/ $\sqrt{2}$ として求めた。図中の2本の実線は、それぞれJSSC指針(案)の平均設計曲線、最安全設計曲線を用いた疲労亀裂進展解析により予測した $\Delta\sigma$ と疲労寿命Nの関係である。平均設計曲線を用いた解析結果は実験結果とよく一致しており、ここで用いた条件で疲労亀裂進展解析を行うことにより荷重伝達型十字すみ肉溶接継手がルート破壊する場合の疲労寿命を精度よく予測できると言える。

5. 疲労強度に及ぼす諸因子の影響

荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊の疲労強度に対する板厚、溶込み深さ、脚長、溶接形状(不等脚、凹凸)の影響について疲労亀裂進展解析を行なうことにより検討する。解析対象および記号の意味は図9に示す通りである。疲労亀裂進展解析は前章と同様に未溶着部を初期亀裂とみなし、限界亀裂長さを $(0.8 \times \text{脚長} + \text{板厚}/2)$ として行なった。 $da/dN - \Delta K$ 関係としては、

JSSC指針(案)の最安全設計曲線を用いた。応力拡大係数は、すみ肉溶接が二等辺三角形の場合(5.1、5.2、5.3節) Frankの式、その他の場合(5.4節)には有限要素解析とエネルギー法から1mm間隔で求めた値にLagrangeの補間式を適用することにより算定した。

5.1 板厚の影響

ここでは、板厚を9, 16, 25, 35, 50, 75, 100mmに変化させ、疲労亀裂進展解析を行った。その際、すみ肉溶接は二等辺三角形としている。本解析より求めた 2×10^6 回疲労強度と板厚の関係を図10(a), (b)に示す。図(a)では、溶込み深さを0とし脚長を板厚の0.5、0.7、0.9とした場合の疲労強度と板厚の関係を示している。いずれの場合も板が厚くなるにしたがって疲労強度は両対数紙上でほぼ直線的に減少しており、その傾きはおよそ $-1/6$ である。図(b)では、脚長を板厚の0.7とし溶込み深さを板厚の0/6、1/6とした場合の疲労強度と板厚の関係を示している。溶込みがある場合にも、疲労強度と板厚の関係は溶込みがない場合と同じである。板厚が増加するにしたがって疲労強度が低下する原因は、未溶着長さ主と主板厚の比を一定とした場合、主板が厚くなるにしたがって未溶着部が長くなり、初期の応力拡大係数が大きくなるためである。

JSSC指針(案)では、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手など実験的あるいは解析的に板厚が疲労強度に影響を及ぼすことが確かめられている板厚25mm以上の継手に対して、(3)式で与えられる補正係数 C_t を乗じることにより許容応力範囲を補正することとしている。

$$C_t = (25/T)^{1/4} \quad (T: \text{板厚}) \quad (3)$$

荷重伝達型十字溶接継手・ルート破壊に対して(3)式と同様に許容応力範囲の補正を行なうことは、板厚の影響を若干大きめに評価することになる。しかし、取扱い上の簡便さおよび安全側の評価であることを考慮

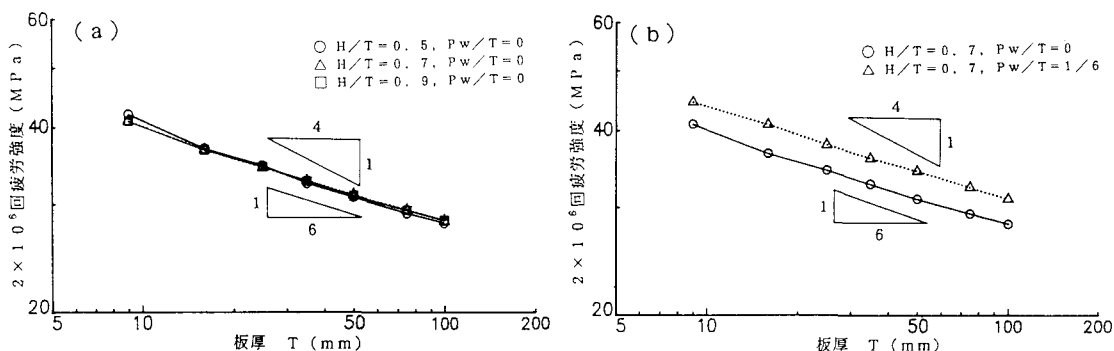


図10 疲労強度に及ぼす板厚の影響

すれば、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊に対しても(3)式に基づき許容応力範囲を補正することは妥当と考えられる。

5.2 脚長の影響

主板の厚さに比べ溶接の脚長が相対的に小さくなると疲労強度が低下すると考えられ、JSSC指針(案)では、脚長と板厚の比 H/T が0.7以下となる継手については適用範囲外として許容応力範囲を与えていない。一方、ECCSやBS 5400では、適用範囲に関する規定はない。

図11(a)に板厚を15、25、35mm、溶込み深さを0とした場合の 2×10^6 回疲労強度と脚長の関係に関する解析結果を示す。なお、脚長は板厚で無次元化 (H/T) している。 H/T が0.4以上の領域ではすべての板厚の継手で H/T によらず疲労強度はほぼ一定となっている。一方、 $H/T < 0.4$ の領域では H/T が小さくなるにしたがって疲労強度が低下している。また、疲労強度の低下の程度は板が厚いものほど顕著となっている。

図11(b)は、板厚を25mmで溶込み深さを変えた場合の疲労強度と H/T の関係を示したものである。 $H/T \geq 0.4$ の領域では、溶込みがあっても疲労強度は H/T によりさほど変化していない。 $H/T < 0.4$ の領域では、溶込み深さが板厚の1/20程度以上あれば H/T が小さくなるにしたがって疲労強度が低下することはなく、溶込みが深くなるほど、また H/T が小さくなるにしたがって疲労強度が高くなっている。図11(c)に板厚15mmある

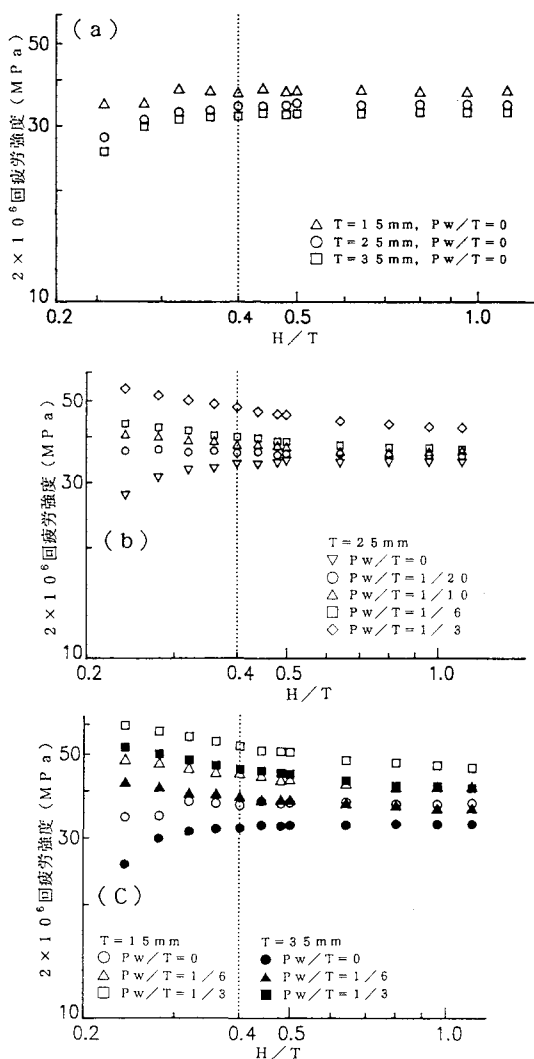


図11 疲労強度に及ぼす脚長の影響

いは35mmとした場合の疲労強度と H/T の関係を示すが、その傾向は板厚25mmの場合と同じである。

以上より、溶込みを期待できない場合であっても、 $H/T \geq 0.4$ の領域では H/T による疲労強度の変化を考慮する必要はなく、また、開先をとるなどにより溶込みを確保する場合にはその深さを板厚の1/20程度以上とすれば H/T による疲労強度の変化を考慮する必要はないと言える。ただし、 H/T がある程度以上大きくなった場合には、ルート破壊から止端破壊に疲労破壊モードが変化するため、止端破壊にも注意する必要がある。

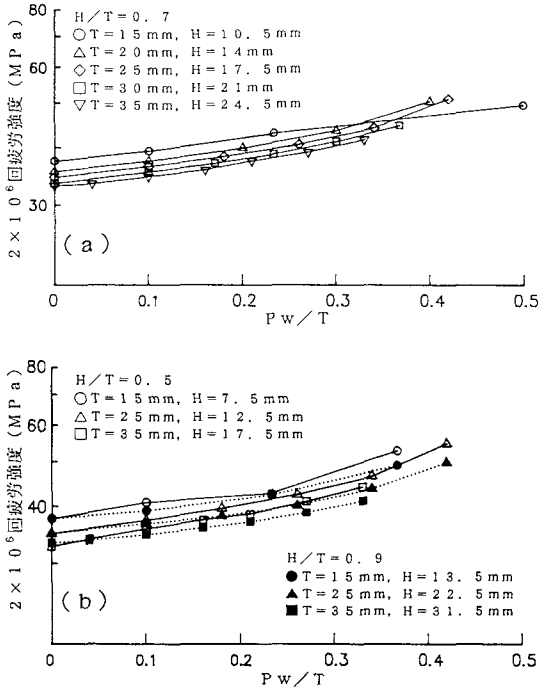


図12 疲労強度に及ぼす溶込み深さの影響

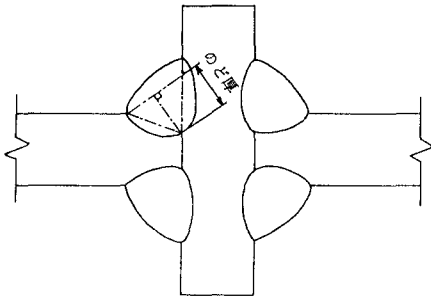


図13 理論のど厚の定義（道路橋示方書）

5.3 溶込み深さの影響

図12(a)に 2×10^6 回疲労強度と溶込み深さの関係を示す。ここでは板厚 T を15、20、25、30、35 mmとし $H/T = 0.7$ (H : 脚長) とした場合の解析結果を示している。いずれ板厚においても、溶込みが深くなるにしたがって疲労強度が増加している。 H/T を0.5あるいは0.9としても、図12(b)に示すように溶込みが深くなるほど疲労強度は高くなっている。したがって、開先をとり溶接の溶込みを深くすることはのど断面積を大きくすること以上に疲労強度の改善に対して効果があると言える。

道路橋示方書¹¹⁾では、開先溶接にすみ肉溶接を重ねる場合ののど厚は、図13に示すようにルート部を頂点として溶接部に内接する二等辺三角形の高さと規定されている。これに従えば、さらに安全側すぎる疲労強度評価を行なうことになる。

5.4 溶接形状の影響

すみ肉溶接が不等脚となった場合の疲労亀裂進展解析結果を図14(a)に示す。ここでは主板側の脚長を21mmで固定し中板側の脚長を21~42mm、逆に中板側の脚長を21mmで固定し主板側の脚長を21~42mmと変化した場合の結果を示している。したがって、これらの継手のサイズはすべて21mmである。図の横軸は、主板側と中板側の脚長の差の絶対値、すなわち等脚のすみ肉溶接に比べてどの程度脚長を増したかを示している。いずれの場合も脚長を大きくすることにより疲労強度は上昇しており、道路橋示方書の規定に従い計算したのど断面を用いて疲労強度を評価すれば、特に危険となることはないと言える。脚長を大きくすることによる疲労強度の改善効果は、特に主板側の脚長を増した場合に顕著である。これは、主板側の脚長を増すことによりすみ肉溶接部の応力が滑らか

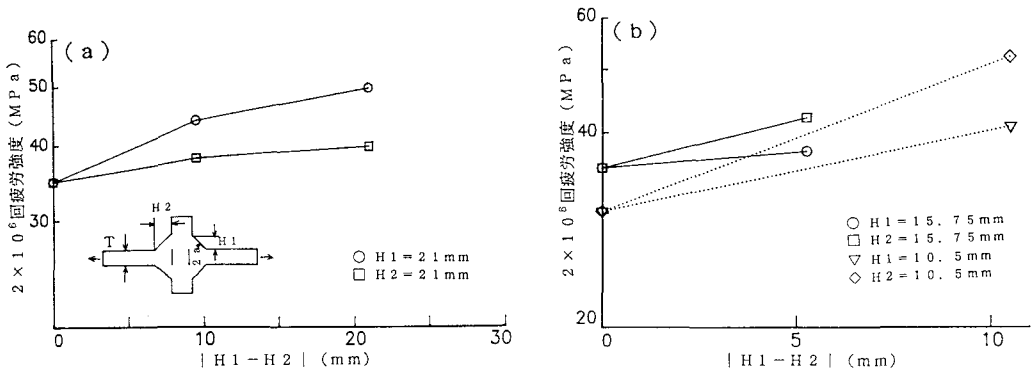


図14 不等脚なすみ肉溶接部を有する継手の疲労強度

になるためと考えられる。したがって、既設橋梁においてすみ肉溶接のルート破壊が懸念される場合には、主板側に肉盛溶接を行なうことも有効な補強方法と言えよう。

図14(b)はサイズを10.5、15.75mmとした場合の 2×10^6 回疲労強度と主板側と中板側の脚長の差の絶対値の関係を示している。サイズを10.5、15.75mmとしても、サイズ21mmの場合と同様の傾向を示している。

溶接形状が凹型および凸型とした場合の疲労強度の解析結果を図15に示す。図の横軸は溶接止端部の開き角 θ であり、溶接形状は $\theta = 135^\circ$ で二等辺三角形、 $\theta > 135^\circ$ で凹、 $\theta < 135^\circ$ で凸となる。溶接サイズはすべて21mmである。溶接形状が二等辺三角形($\theta = 135^\circ$)の場合に比べて、凹($\theta > 135^\circ$)の場合には主板側の脚長の増加により、また凸($\theta < 135^\circ$)の場合にはど断面部分の余盛により、ルート部への応力の集中が緩和されると考えられる。そのため、疲労強度は $\theta = 135^\circ$ の場合が最も低くなっている。

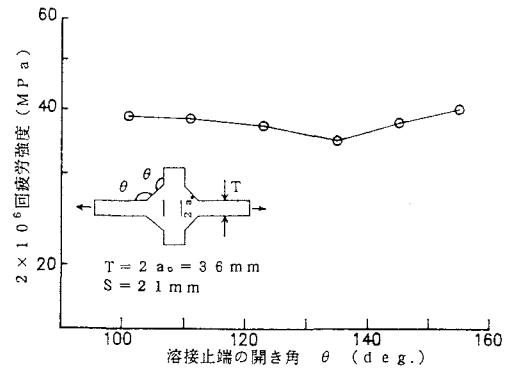


図15 疲労強度に及ぼす溶接形状の影響

6. まとめ

本研究では荷重伝達型十字すみ肉溶接継手がルート破壊する場合の疲労照査応力と許容応力範囲、および疲労強度に対する板厚、溶込み深さ、脚長、溶接形状(不等脚、凹凸)の影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 疲労照査はのど断面での直応力範囲と日本鋼構造協会の疲労設計指針(案)の継手等級Hを用いて行なうとよい。のど断面での直応力は、のど厚を道路橋示方書にしたがい(サイズ $\sqrt{2}$)として求めればよい。
- (2) 板厚が増加するにしたがって疲労強度は低下するため、許容応力範囲は板厚により補正する必要がある。
- (3) (1)の適用範囲は(サイズ/板厚) ≥ 0.4 とするのがよい。
- (4) 開先をとり部分溶込み溶接とすることはのど断面応力を小さくすること以上に疲労強度を上昇させる効果がある。部分溶込み溶接を併用する場合ののど断面応力はのど厚を(サイズ+溶込み深さ) $\sqrt{2}$ として求めれば、危険側の評価となることはない。

- (5) すみ肉溶接が不等脚な継手およびその形状が凹あるいは凸な継手の疲労照査は、(1)に従って行なえば、危険側となることはない。
- (6) 疲労強度の改善を目的として肉盛り溶接を行なう場合には、主板側の脚長を増すように行なうのが効果的である。

本研究の一部は、曾根貢君と関貴志君の卒業研究（法政大学土木工学科）として行なわれたものである。また、本研究は文部省科学研究費補助金（試験研究(1) 代表：三木千寿）の補助を受けて実施したものである。試験体の製作に際しては、東京鉄骨橋梁製作所の田中雅人氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して、謝意としたい。

参考文献

- 1) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No. 392, pp. 403～410, 1988.
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、1983.
- 3) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)、JSSCレポート、NO.14, 1989.
- 4) British Standards Institution : Steel, Concrete and Composite bridges, BS5400, Part10, 1980.
- 5) ヨーロッパ鋼構造協会連合：鋼構造物の疲労設計指針（山田健太郎訳）、日本鋼構造協会、1985.
- 6) Frank, K.H. and Fisher, J.W. : Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints, Proceedings of ASCE, ST9, 1727～1740, 1979.
- 7) 館石和雄、三木千寿、森猛：隅肉溶接継手部のせん断応力設計疲労曲線の検討、東工大土木工学科研究報告、No. 42, pp. 1～9, 1990.
- 8) 金属材料研究所：溶接構造用圧延鋼SM50B十字溶接継手の疲れ特性データシート、NO.18, 1980.
- 9) トピー工業（株）：電気炉鋼溶接継手の疲労試験、溶接学会FS委員会資料、FS782-89, 1989.
- 10) 石田誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数、培風館, pp. 144～145, 1976.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、pp. 164～165, 1990.
- 12) 曾根貢、関貴志、森猛：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労破壊起点の検討、土木学会第19回関東支部技術研究発表会講演概要集, 1-31, 1992.
- 13) 貝沼重信、森猛、川嶋克昌：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手のルート部から発生する疲労亀裂の進展性状、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第1部, 1-125, 1992.

(1992年9月21日受付)