

鋼材十字溶接継手部の板厚方向強度特性に関する研究

三木 千寿¹・Fauzri FAHIMUDDIN²・穴見 健吾³・大橋 治一⁴・町田 文孝⁵

¹正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²工修 東京工業大学博士課程 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

³正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

⁴正会員 工修 本州四国連絡橋公団 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 5-1-5)

⁵正会員 川田工業株式会社 中央研究室 (〒114-0023 東京都北区滝野川 1-3-11)

近年の鋼材の強度特性の向上から、今後、橋梁構造の合理化の為に鋼板の板厚方向に応力が作用するディテールを活用していくことが考えられる。本研究では、吊橋の箱断面補剛桁のハンガー定着部の溶接継手ディテールを対象に、鋼板の板厚方向特性を、静的強度、破壊じん性値、疲労強度に注目して検討した。またその際、鋼板の化学成分、特にS(硫黄)量にも注目し、化学成分の強度特性に対する影響を検討した。その結果、鋼材のS量を制御すれば、対象とした継手部の安全性は十分確保できることが明らかにされた。

Key Words: thickness direction, mechanical property, chemical composition, fatigue strength, fracture toughness, load-carrying cruciform joint

1. はじめに

鋼板は主たる応力方向と圧延方向を合わせて使用することが原則であり、道路橋示方書でもそのように規定されている¹⁾。特に鋼板の板厚方向(z方向)の力学、強度特性は圧延(x方向)およびその直交方向(y方向)に比べてかなり劣るとされており²⁾、鋼橋におけるさまざまな構造ディテールにおいてもこのような鋼板の方向性に配慮して設計が行われてきた。そのために、製作上極めて都合が悪く、また溶接欠陥が発生しやすいディテールを採用せざるを得ないことがある。しかし近年は鋼材の特性が格段に向上しており、板厚方向に力を伝達することを完全に否定するべきではないと考えられる。また、設計計算では板厚方向への力の伝達は考えていないが、実際には板厚方向に力を伝達している継手ディテールは橋梁構造の中に多く見られる。

本研究では、吊橋の箱断面補剛桁のハンガー定着部ディテールを対象にして、鋼板の板厚方向強度特性を検討したものである。現在建設中の来島大橋のハンガー定着部定着板には、当初は図-1(a)のように

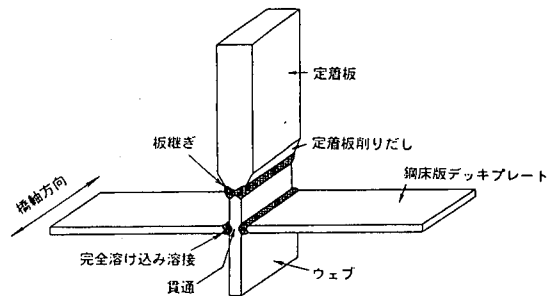


図-1(a) 一般的なハンガー定着部ディテール

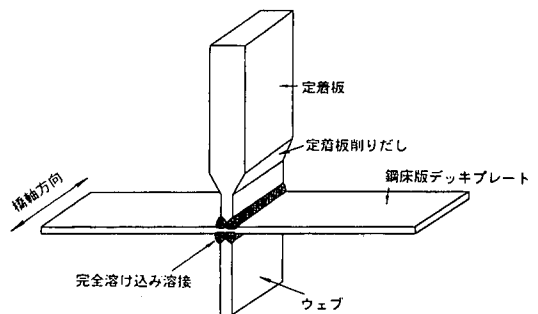
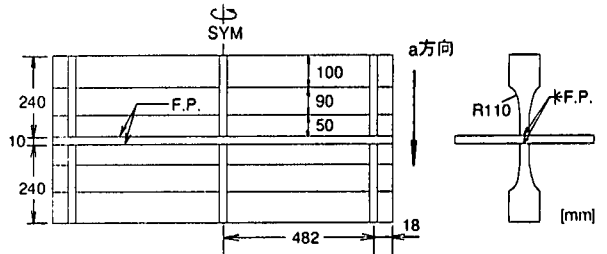


図-1(b) 来島大橋のハンガー定着部ディテール

箱桁のウェブに直接取り付け、デッキプレートを貫通するようなディテールが考えられていた。しかし、この構造では定着板がデッキプレートを貫通する部分の溶接ディテールが非常に複雑となり、ハンガーから箱桁への荷重伝達を考えたとき、疲労抵抗も低くなると考えられた。また製作上も非常に煩雑であり、溶接の品質管理もかなり困難を伴うと考えられた。このようなことから図-1(b)のディテールを採用することとした。このディテールではハンガー定着板はデッキプレートに溶接されており、定着板からの力はデッキプレートを介して箱桁ウェブに伝達される。定着板からの力によりデッキプレート部に板厚方向に生じる応力は極めて低く、また、定着板の寸法を大きくすることにより、応力をさらに低くすることは可能であるが、板厚方向に力を伝達することは従来とは異なることから、その破壊特性を調べることにした。



来島大橋ピン定着構造と同等の試験体（上図）を製作し、a方向にスライスした後、余盛り等を切削して、試験体（下図）を作成

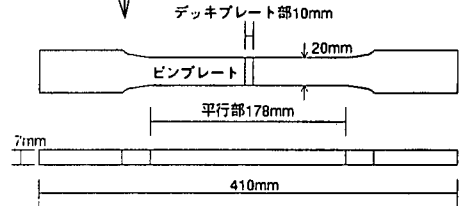


図-2 試験体製作及び試験体形状

表-1 供試材の機械的性質，化学成分

2. 試験体

図-2 に試験体製作手順，及び試験体形状を示す。

本研究では、先ず来島大橋の定着構造と同等の試験体を製作し（図-2 上図），その後図中に示す方向でスライスすることにより荷重伝達型十字継手試験体を製作した。また本研究では、荷重伝達型十字継手の中板の強度を調べることが目的であるために、引張試験、疲労試験で破壊起点が中板になるように溶接余盛り等を切削することとした（図-2 下図）。表-1 に本試験体製作に用いた鋼材の機械的性質，及び化学成分の一部を示す。また表-2 には溶接金属の機械的性質，化学成分，および溶接条件を示す。従来の鋼床版デッキプレートには SS400 が用いられていたが、道路橋示方書では SM 材が用いられるように改訂された。更に、来島大橋の当該ディテールではデッキプレートにハンガーから伝わる板厚方向の応力作用するために、絞り値が SM400A-Z25 の規定値を満足するように S 量を制御した SM400A 材が用いられている。この鋼材をここでは SM400A-S と呼ぶことにする。本試験体ではデッキプレート部として SM400A-S と SS400 の 2 種類を用いている。また、ウェブ及び定着板部には実橋と同じく SM490B を使用した。定着板とデッキプレート，デッキプレートとウェブの溶接ディテールについては実橋に合わせている。このような溶接継手部の疲労強度は、ハンガーからの力の伝達については荷重伝達型リブ十字

鋼種	適用	YP[MPa]	TS[MPa]	El[%]
SS400	デッキプレート	312	460	26
SM400A-S	デッキプレート	306	434	33
SM490B	ピンプレート	370	567	31

YP: 降伏強度 TS: 引張強度 El: 伸び (%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.19	0.10	0.68	0.019	0.007
SM400A-S	0.11	0.25	1.12	0.012	0.002
SM490B	0.17	0.33	1.45	0.014	0.004

表-2 溶接金属の機械的性質，化学成分，溶接条件

溶接材料	YP[MPa]	TS[MPa]	El[%]	vEo[J]
YM-26	460	560	30	130

(%)

C	Si	Mn	P	S
0.10	0.52	1.11	0.017	0.011

溶接条件（平均は1パス当たりを示す）

溶接パス数	平均電流	平均電圧	平均溶接速度	平均入熱量
片面 14 パス	290A	35V	47cm/min	13.0KJ/cm

予熱温度 50°C

継手として考え、定着板の幅を十分広くとることにより、生じる応力を低く抑えることが安全上の配慮となる。またデッキプレート側については、面外ガ

セット継手として検討すればよい。工学的にはこのような検討を行えば十分であり、いずれについても来島大橋の当該ディテールでは十分安全であることが確認されている。しかし、今後鋼板の板厚方向に荷重を伝達するような構造ディテールの基礎資料をつくることを目的として、ここでは各組織 ①強い熱影響を受けたデッキプレートの母板、②定着板・デッキプレート間溶接部の溶着部、③および溶接金属部の強度特性を検討することとした。特にここで目的としているデッキプレートの板厚方向の強度を見るために、破壊起点を各組織に特定するために、各組織をねらって直径 2mm の円孔を設けた。

3. 強度特性

ここでは、本試験体の強度特性を把握するために、引張試験、シャルピーV ノッチ試験、及び疲労試験を行った。

(1) 引張試験結果

まずノッチを入れていない試験体を用いて長手方向（デッキプレートに対しては板厚方向）に引張試験を行った。表-3 に引張試験結果を示す。歪みゲージは図-3 のグラフ中に示すように、ゲージ長 10mm の塑性ゲージをデッキプレート部に貼付した。破断位置は SS400 を用いた場合も SM400A-S を用いた場合もデッキプレート位置であった。降伏点及び引張強度をみると、両者ともに十分な強度特性を示している。ここで、両試験体ともに降伏点、及び引張強度が素材の圧延方向引張強度と比較して非常に大きくなっている理由は、本試験体では 400MPa 級の鋼材であるデッキプレート（長さ 10mm、幅 20mm）をそれよりも強度の高い SM490B で挟む形になっているために拘束の影響²⁾が出ているものと考えられる。しかしながら、図-3 に示す公称応力とデッキプレート部の公称歪みとの関係を見てみると、SM400A-S を用いた場合は十分な伸び性能を有しているのに対して、SS400 を用いた場合には、伸び性能は遥かに低いことが分かる。写真-1 には破断部の破面写真を示すが、SM400A-S を用いた場合は、本試験体の形状・寸法と同等の素材試験体を用いた圧延方向引張試験で見られるような一般的な延性破面を呈しているのに対して、SS400 を用いた場合には、特異な破面を呈していることが分かる。

表-3 引張試験結果

デッキプレート	YP [MPa]	TS [MPa]	破断部
SS400	385	495	デッキプレート
SM400A-S	415	520	デッキプレート

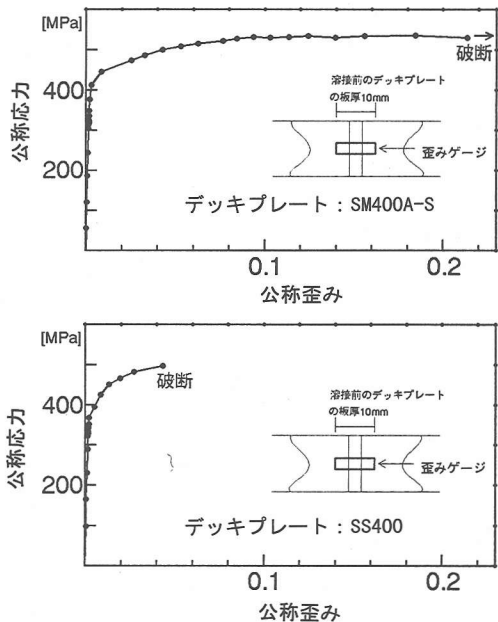


図-3 引張試験結果：公称歪みー公称応力

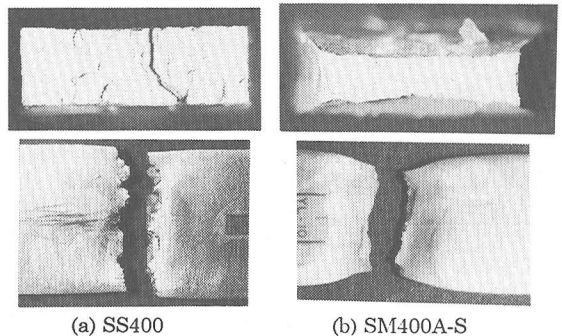


写真-1 引張試験による破断状況

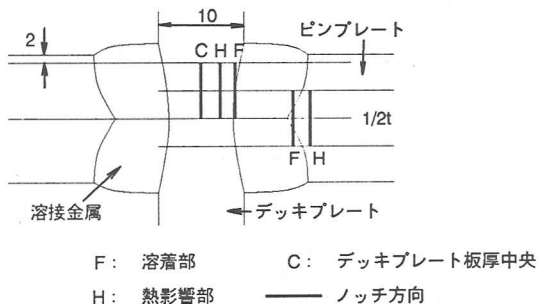


図-4 シャルピーVノッチ試験の対象位置

(2) シャルピーVノッチ試験結果

次に本ディテールの切欠きじん性値を調べるために、図-4に示す各部位（デッキプレート中央、デッキプレート側のHAZ、溶着部、及びピンプレート側の溶着部、HAZ）を対象にして、そこにノッチを入れることによりシャルピーVノッチ試験を行った。デッキプレート中央部、デッキプレート側のHAZ、溶着部の試験では、応力の作用方向はデッキプレートの板厚方向となるようにした。また併せて、比較のために、SS400及びSM400A-Sについて素材の板厚方向のシャルピー衝撃試験を行った。ここで、素材のシャルピー試験片は、板（素材）の表裏にφ22、長さ120mmの棒（S35C）を圧接し、それから板厚方向衝撃試験片を削りだして製作している。この際、圧接による熱影響は鋼材の表層から2mm程度と考えられ、素材の試験結果に圧接による熱は影響していないものと考えられる。表-4に素材の、表-5に溶接ありの試験体を用いたシャルピー試験結果を示す。デッキプレートとしてSM400A-Sを用いた場合には、デッキプレート中央部、デッキプレート側のHAZ、溶着部ともに十分な破壊じん性値があることが分かる。一方、デッキプレートとしてSS400を用いた場合には、デッキプレート側の溶着部で吸収エネルギーが22J程度（3体の試験体の最低値）である以外は、HAZやデッキプレート中央部の吸収エネルギーはそれぞれ6J、4Jであり、非常に低いじん性値しか有していないことが分かる。また、デッキプレート中央部の結果と、表-4に示す素材試験体の結果を比較してみると、SM400A-Sの場合、溶接により殆ど吸収エネルギーが低下していないことが分かる。SS400の場合は、溶接のない素材試験体の場合でも同様に非常に低いじん性しか有しておらず、本実験からは溶接による熱影響が靱性に影響しているかは定かではない。

(3) 疲労試験結果

本ディテールに含まれる各組織の疲労強度を検討するために疲労試験を行った。本研究では、ノッチなし試験体の疲労試験を行うだけでなく、本ディテールの中の各部位（デッキプレートの中心部、デッキプレート側の溶着部、溶接金属部、ピンプレート側のHAZ）に円孔ノッチを設け、疲労き裂の発生位置を特定することにより、各部位の疲労強度の検討を行った（図-5）。疲労試験は、繰り返し引張载荷

表-4 シャルピーVノッチ試験結果（素材）

		(vEo, J)	
SS400		SM400A-S	
7,6,6,6,7		129,123,94,98,168,149	
ave 6		ave 127	

表-5 シャルピーVノッチ試験結果（本試験体）

		ノッチ位置		
鋼種		溶着部	HAZ	C
P. P	SM490B	109,93,91	90,95,103	-----
D. P.	SS400	27,22,24	8,6,8	4,5,8
D. P.	SM400A-S	140,177,125	111,135,59	119,109,149

D. P. デッキプレート P. P. ピンプレート

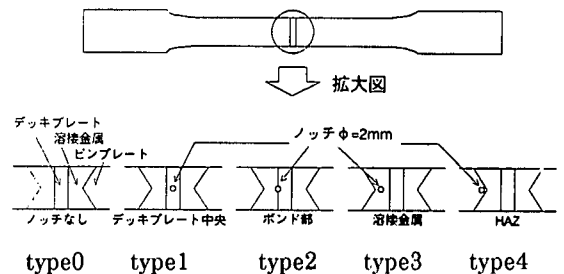


図-5 疲労試験体のノッチ位置

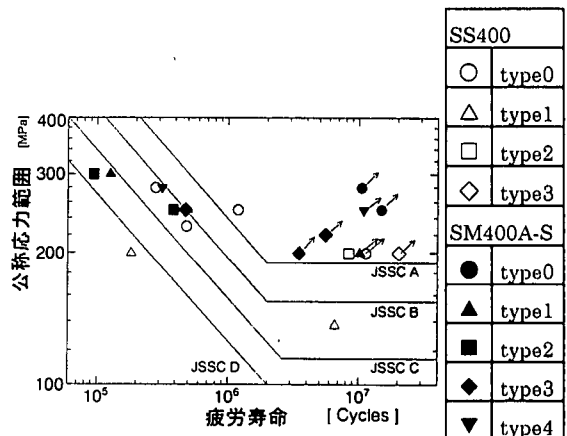


図-6 疲労試験結果

により行い、最小応力は20MPaとした。

疲労試験結果を図-6に示す。まず、type0の試験体についてSS400とSM400A-Sとを比較してみると、SM400A-Sの方は疲労き裂の発生は見られず、SM400A-Sを用いた本ディテールが十分な疲労強度

を有していることが分かる。一方、SS400 を用いた場合には幾つかの試験体で破壊が生じた。本試験体は JSSC 疲労設計指針⁹⁾では疲労強度等級 B 等級と定められているが、SS400 を用いた type0 試験体は JSSC の C 等級を満足している程度であり、非常に低い疲労強度しか有していないことが分かる。SS400 を用いた type0 試験体の破面からは疲労き裂の起点となる部位は観察されず、引張試験で破断した試験体の破面と同様の特異な破面を呈していた。破面観察については後述する。

同様に type1 の疲労試験結果を比較してみると、SS400 の疲労強度は SM400A-S と比較しても非常に低くなっていることが分かる。

type2 では、SS400 の方が、SM400A-S よりも疲労強度が高くなっていることが分かる。しかしながら、type2~4 の疲労強度は、円孔縁での応力集中を考慮すると妥当な疲労強度であると考えられる。

4. 破面観察

(1) 破面観察

SS400 をデッキプレートに用いた場合、引張試験、及び疲労試験による破断部が特異な破面を呈していた。ここでは、走査型電子顕微鏡(SEM)により、破面観察を行い、この特異な破面の特徴を把握することを試みた。

写真-2~写真-4 には、疲労試験による type0~type2 の破断部の写真を示す。写真-2 からは明らかな疲労き裂の起点部は観察されず、写真-1 の引張試験による破断部同様特異な破面を示している。一方、type1 及び type2 では疲労き裂は円孔ノッチ縁から発生している。type1 の円孔ノッチはデッキプレート中心部に設けられており、type2 の円孔はデッキプレート側の溶着部に設けられている。SM400A-S を用いた type1、及び type2 の場合、ある程度疲労き裂が進展した後、最終的に破断しているが、破断部の疲労き裂以外の部分に着目してみると、引張試験による破面や、type0 の疲労試験による破面と同様な破面を呈している。また type2 の破面を見ると、疲労き裂は、荷重方向に直角方向に進展しているが、特異な破面を有する部分はデッキプレート中央部に向かって進展していることが分かる。

これらの特異な破面は、延性破面や脆性破面とは異なり、ラメラテア (lamellar-tearing)^{4)~9)}に近い

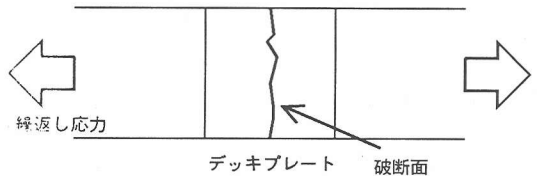
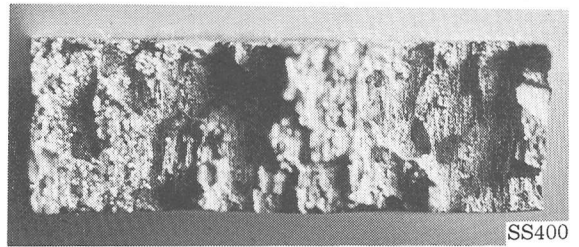


写真-2 破面観察結果 (type0-SS400 のみ)

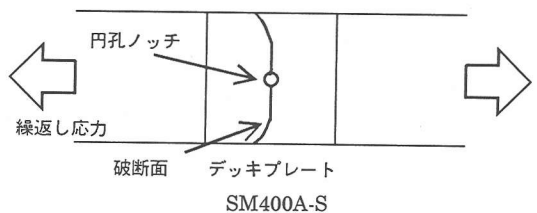
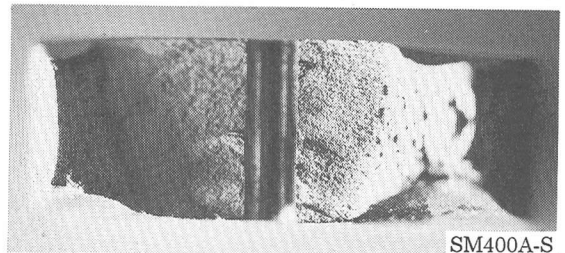
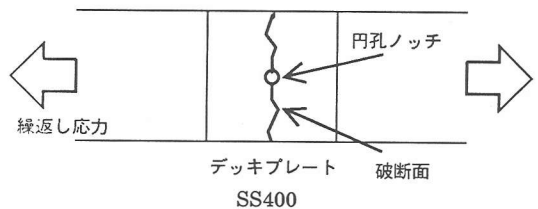
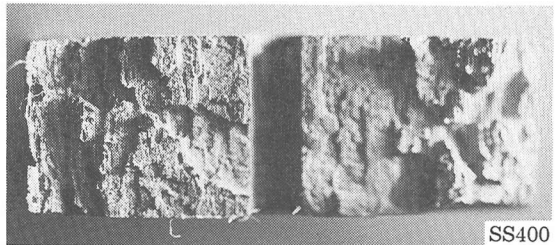


写真-3 破面観察結果 (type1)

破面を呈しており、破面にラメラテア破面の特徴であるテラスやウォール部が見られ、段階状に引き裂かれたような形状を呈している。ラメラテアは、溶接の冷却過程における大きな板厚方向の熱収縮力により、鋼材内に含まれる、圧延時に圧延方向に薄く引き延ばされた非金属介在物（マンガンMn系の硫化物など）と地鉄の境界が剥離し、進展し（テラスの形成）、それらが結合すること（ウォールの形成）により生じ、破断に至るために、段階的な破面を呈することになる。このラメラテアの発生には、その発生機構からもわかるように非金属介在物の存在が必要である。本研究で用いたSS400のS含有量は0.007%であり、このS量が z 方向の外力によりラメラテアのような破面を形成する原因になっていると考えられる。一方、このラメラテアの発生はS量を制御することにより、大きく抑制されることが知られており、SM400A-SはS量を制御し0.002%まで低減させた耐ラメラテア鋼材であり、このような破面を呈さなかったものと考えられる。

この特異な破面のSEMによる観察結果を写真-5に示す。同図には、SM400A-Sをデッキプレートに用いた場合の、引張試験結果による破面のSEM観察結果も併せて示す。

SS400をデッキプレートに用いた場合の引張破面には、写真-5からも分かるように、3種類の破面が混在している。最も多い破面形態は写真-5(a)に示される、試験体板厚方向と直角に伸びた簧の子状の破面で、この破面はディンプルの一種で、変形の少ない延性破面と考えられる。またこの破面上には、倍率3000倍のSEM像から、極めて薄いフィルム状の異物に覆われていることが確認される。写真-5(b)に示す第二の破面は結晶粒界が脆性的に割れた破面であるが、この形態の破面は、全破面上に占める割合は非常に小さいものであった。第三の破面形態は、写真-5(c)に示すディンプル状の延性破面であり、観察された破面の中では最も塑性変形の大きな部分ではあるが、全破面上に占める割合は第二の破面同様それほど大きくない。写真-5(d)には、SS400をデッキプレートに用いた場合のtype-0の疲労試験による破面を示すが、その破面形態は引張試験による破面とほぼ同様の破面形態を示していることが分かる。

これらに対して、写真-5(e)には、SM400A-Sをデッキプレートに用いた場合の引張試験による破面のSEM観察結果を示すが、全面、ディンプル状の延性

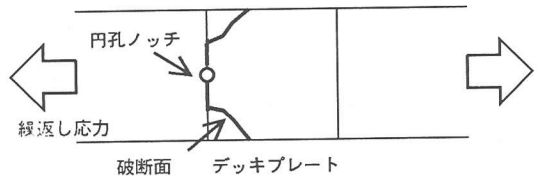
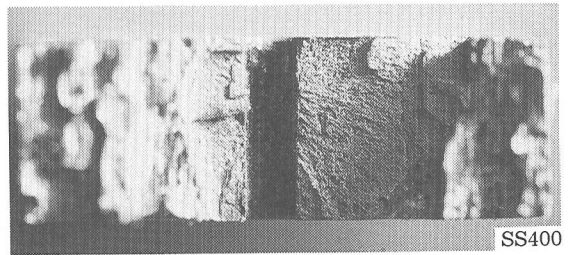


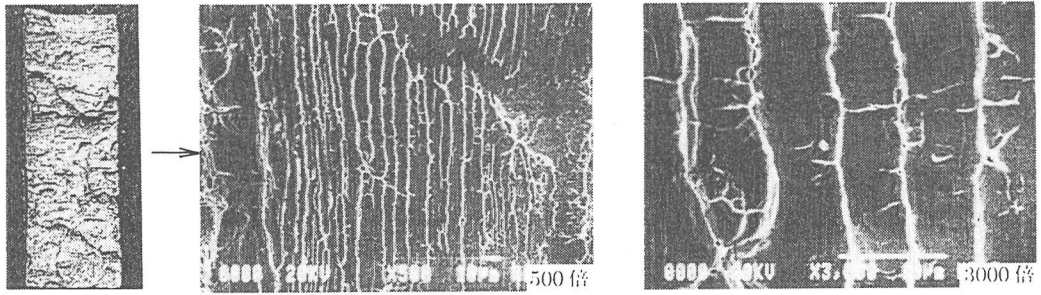
写真-4 破面観察結果(type2-SS400のみ)

破面で、かなりの塑性変形が進行していることが分かる。

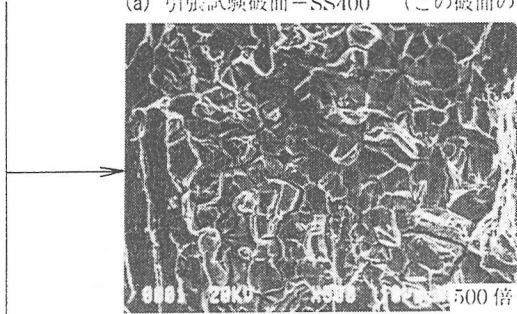
これらのSEM観察結果から考察すると、SS400をデッキプレートに用いた場合の破面形態はむしろラメラテアの破面形態に酷似している。従って、引張試験では、ラメラテアの発生機構と同様の破壊現象を、疲労試験では、繰返し作用する板厚方向の応力により、介在物と地鉄の間の剥離部が進展、合体することにより最終的には破断に至ったものと推測される。同様にSS400をデッキプレートに用いたtype1, type2の場合も、それぞれの試験体に設けた円孔ノッチから疲労き裂が生じているが、破断面の疲労き裂以外の部分の観察結果をみると、type0の試験体と同様の破面形態を呈していることから、type1, type2の試験体の疲労試験による最終的な破断は、疲労破壊というよりはむしろ、疲労き裂が進展することによる断面減少により、デッキプレート部の残り断面に作用する板厚方向応力が大きくなり、最終的には引張試験やtype0の疲労試験と同様な破断過程を辿ったと考えられる。

(2) 成分分析

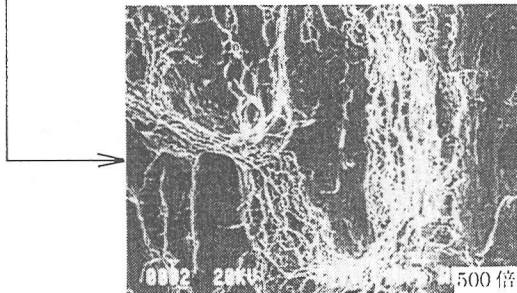
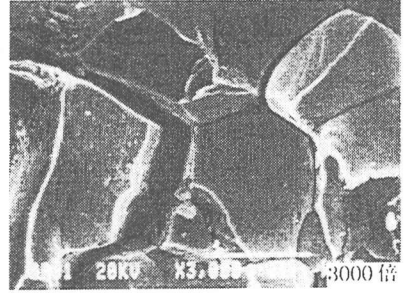
SS400をデッキプレートに用いた試験体の引張試験、疲労試験による破面のSEM観察結果から、破面の殆どの部分は、薄いフィルム状の異物に覆われていたことは、前述したが、この異物の成分を特定するために、EPMA面分析による成分分析を行った。写真-6にはSS400をデッキプレートに用いた場合の引張試験による破断面のEPMA面分析結果を示す。



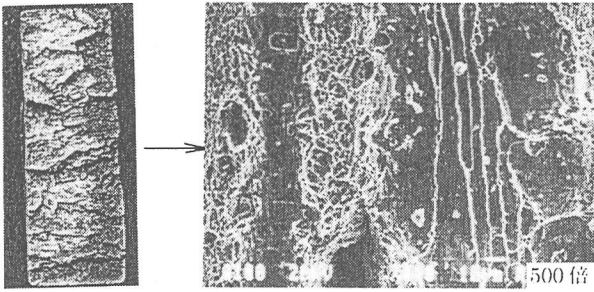
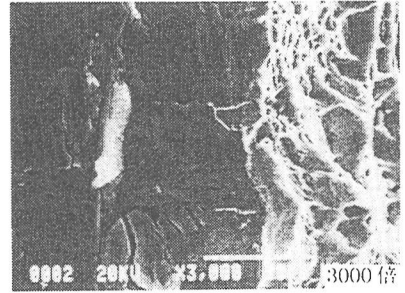
(a) 引張試験破面-SS400 (この破面の大部分を占め、表面にフィルム状の異物が存在)



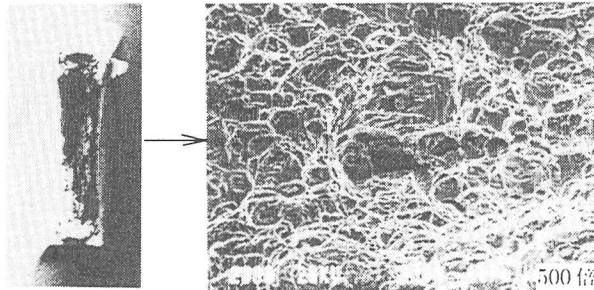
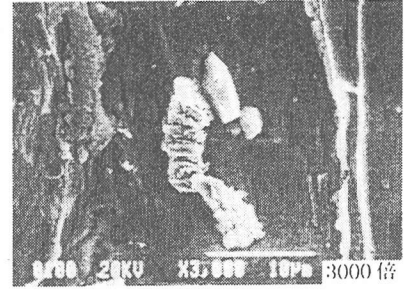
(b) 引張試験破面-SS400



(c) 引張試験破面-SS400



(d) 疲労試験破面-SS400-type0



(e) 引張試験破面-SM400A-S

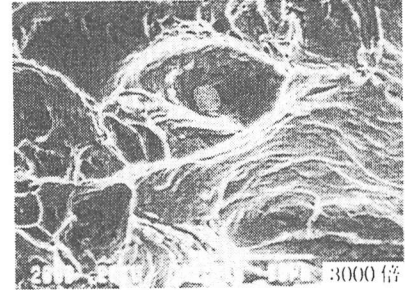


写真-5 SEMによる破面観察結果

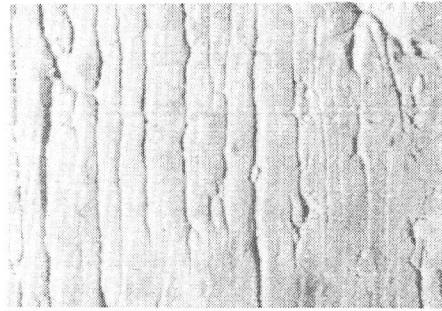
Mn及びSともに、EPMA面分析では、写真中で白く表示されている部分に存在していることを示している。写真より、破断部には、MnとSが島状に多数存在しており、また、両者は全く同じ位置から検出されていることから、MnSの形で存在していることが分かる。これより、SEM観察により見られた、フィルム状の異物はMnSであることが確認された、このフィルム状のMnSがラメラテアに非常に酷似した特異な破面を生じて破断した原因であると考えられる。

5. 結論

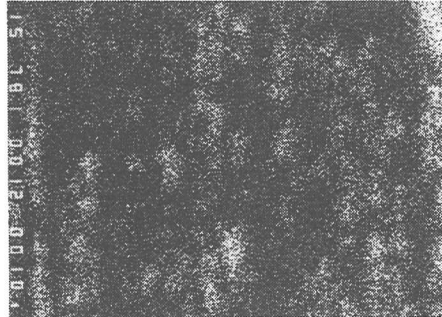
以上の検討から以下の結論を得た。

- 1) SS400を中板に使用した場合、板厚方向に応力が作用した場合、伸び性能が非常に小さいことがわかった。また中板の破壊じん性値、疲労強度が非常に小さいことが分かった。
- 2) SS400を中板に使用した場合、その引張試験、疲労試験による破面は、ラメラテアと酷似した破面形態を呈していた。また成分分析の結果からも、破面上にはマンガン系の硫化物(MnS)の偏析が見られ、ラメラテアの発生機構と同様な破壊機構を呈したことが推測される。
- 3) 一方、SM400A-Sを中板に使用した場合、その中板の板厚方向の引張特性、伸び性能、破壊じん性、疲労特性ともに十分なものであることが分かった。

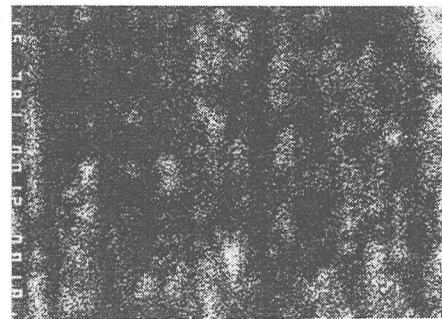
従来、鋼床版デッキプレートにはSS400が用いられていたが、道路橋示方書の平成6年の改訂によりデッキプレートにはSM材が用いられることとなった。今回の研究のきっかけになったハンガー定着ディテールは、デッキプレートの板厚方向に力を伝達するディテールであり、従来の鋼材使用の原則とは異なった鋼材の使用をしていることや、設計時に想定していなかった原因でき裂がデッキプレートに板厚直角方向に進展することも考えられるので、安全を考えてS量を制御したSM400A-Sを用いている。S量をどの程度に制御すれば十分な性能が得られるのか、またS量と耐ラメラテア鋼のしぼり規定との関係などについては今後の課題である。



SS400
引張破面
780倍



Mn
二次
電子像



S
反射
電子像

10μm

写真-6 EPMA面分析結果

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京工業大学創造プロジェクト研究都市基盤施設研究体「高性能鋼の橋梁への利用研究会」の諸委員の方々には、度重なるご指導を頂きましたこと、ここに深謝致します。

参考文献

- 1)道路橋示方書・同解説：社団法人日本道路協会，1994.
- 2) Holt, J.M.: Effect of Specimen Type on Reduction-of-Area Measurement: Through-Thickness Tension Testing of Steel, ASTM-STP794, pp.5-24, 1983.
- 3) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1994.
- 4) GRAHAM W. OWENS and BRIAN D. CHEAL: STRUCTURAL STEELWORK CONNECTIONS: Butterworths, 1989.

- 5) Domis, W.F.: Stud Welding of Prolongations to Plate for Through-Thickness Tension Test Specimens: Through-Thickness Tension Testing of Steel, ASTM-STP794, pp.59-69, 1983.
- 6) Stotz, R.C., Berry, J.T., Anctil, A.A. and Oppenheimer E.D.: Characterizing the Through Thickness Properties of Ultra-High-Strength Steel Plate: Through-Thickness Tension Testing of Steel, ASTM-STP794, pp.70-86, 1983.
- 7) Wilson A.D.: Comparing the Effect of Inclusions on Ductility, Toughness, and Fatigue Properties: Through-Thickness Tension Testing of Steel, ASTM-STP794, pp.130-148, 1983.
- 8) Structural Welding Code - Steel : American Welding Society, 1992.
- 9) ラメラテアとその対策 : 新日本製鐵株式会社, 1992.

(1997. 4. 30 受付)

PERFORMANCE OF WELDED JOINT UNDER THICKNESS-DIRECTIONAL STRESS CONDITION

Chitoshi MIKI, Fauzri FAHIMUDDIN, Kengo ANAMI, Harukazu OOHASHI
and Fumitaka MACHIDA

Considering the improvement of steel properties, it will become important to use new detail where stresses are applied in steel thickness direction for rationalization of steel bridge structures. In this study, considering the welded anchor detail of hanger cable of suspension bridge, which connect pin-plate to deck-plate of steel orthotropic deck, thickness direction properties of steels are studied from some points of view, such as static strength, fracture toughness and fatigue strength. In addition, effects of chemical composition of steel, especially of sulfur, are discussed. As a result, using SS400 for deck-plate has very low strength and has much possibilities to characteristic fracture mechanism which is very similar to lamellar-tearing. On the other hand, using SM400A-S which control amount of sulfur has good behavior.