

既設鋼橋脚の補修溶接における ラメラティアの発生の可能性検討

三木千壽¹・富永知徳²・柳沼安俊³・下里哲弘⁴

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)

E-mail:miki@cv.titech.ac.jp

²正会員 工修 東京工業大学博士課程学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工修 首都高速道路技術センター 緊急補強対策室 (〒100-8930 東京都港区虎ノ門3-10-11)

⁴正会員 工修 首都高速道路公団 保全部 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

鋼製橋脚の隅角部に発見された疲労き裂について溶接補修を行ったところ、鋼材の内部に割れが発生した。この割れについて直接観察、板厚方向引張試験および材質面からの調査を行うことにより、古くて板厚方向特性の良くない鋼材に起因したラメラティアであると判定した。同時に、主に文献調査を行うことにより、1973年以前に建設した鋼製橋脚についてはラメラティア発生の可能性を検討すべきと判断した。特に鋼材成分中の硫黄(S)の量が0.01%以上、板厚方向引張試験での絞り値(ϕ_z)が15%以下の場合には、補修に溶接を用いる場合は特別な検討が必要である。その検討手法に関する案を示した。

Key Words : steel bridge pier, lamellar tear, welding, MnS, RAZ, Z-tension test, crack, old steels, core

1. はじめに

鋼構造物の疲労き裂の補修・補強に溶接を用いることがあるが、鋼材そのものの溶接性が悪く、溶接によって新たな損傷を引き起こすことがある。首都高速道路の鋼製橋脚の疲労損傷に対する補修溶接において、ラメラティアが発生したために、既設構造物に使われている比較的古い年代の鋼材の溶接性について検討する必要があるが生じた。ラメラティアは溶接により鋼材の内部で板厚方向に裂けるような割れが生じる現象であり、鋼製橋脚の建設の初期にかなりの数が報告されている^{1), 2)}。しかし、その後、鋼材の性能が向上したことや、発生の可能性がある部材には耐ラメラティア鋼が使われるようになったことから^{3), 4)}、ラメラティアは橋梁においては最近はあまり話題にされる問題ではなくなっていた。

ラメラティアに関する過去の研究によれば、その発生については鋼材中のS量、とくにMnSの量、および継手部の形状からの拘束度が主な支配因子となり、そこに存在する水素や応力集中が割れ発生のトリガーとなるとされている⁵⁾。

ここでは首都高速道路の鋼製橋脚の隅角部の疲労損傷に関連して実施した、既設構造物に使用されて

いる鋼材のラメラティア発生特性の検討と、補修溶接を行うための事前チェックとしての鋼材の溶接が可能かどうかの検討手順とその結果について述べる。

2. ラメラティアの発生

図-1にラメラティアの発生した補修工事の対象となった橋脚の概要を示す。この橋脚は1968年に竣工したものである。円形断面柱と箱断面梁の隅角部に発生した疲労き裂の補修工事の過程でラメラティアが発生した。疲労き裂は橋脚中の様々な箇所が生じていたが、ここでの主題であるラメラティアの発生は、梁フランジと柱の外面との間、および柱内面とダイヤフラムとの溶接に発生した疲労き裂に対する補修工事において生じたものである(図-2)。

疲労き裂の原因はその位置の柱と梁フランジおよび柱と内面ダイヤフラムとの溶接が隅肉溶接となっており、実質の溶接断面が極めて小さいことにある。したがってこの部分での疲労き裂は全て溶接ルートから発生している。そのため、まず、梁フランジと柱との溶接部の疲労き裂を除去し、その間の溶接を完全溶込みで施工した後、柱と内面のダイヤフラム

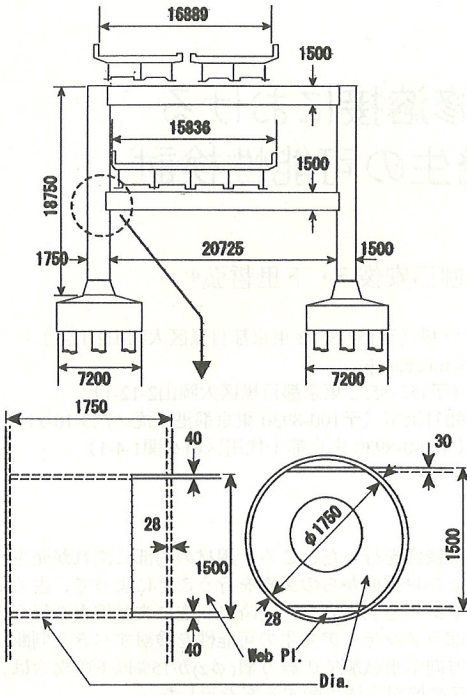


図-1 対象橋梁の概要

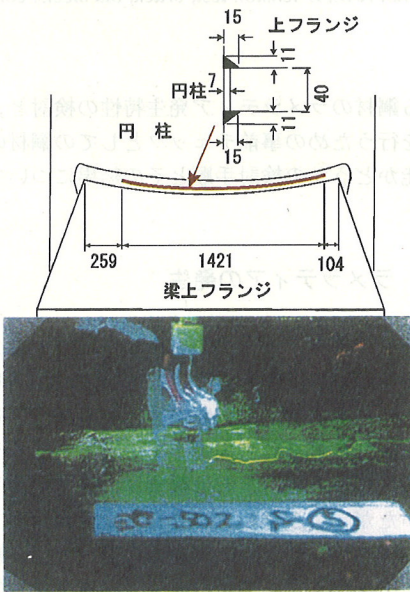


図-2 き裂発生部詳細

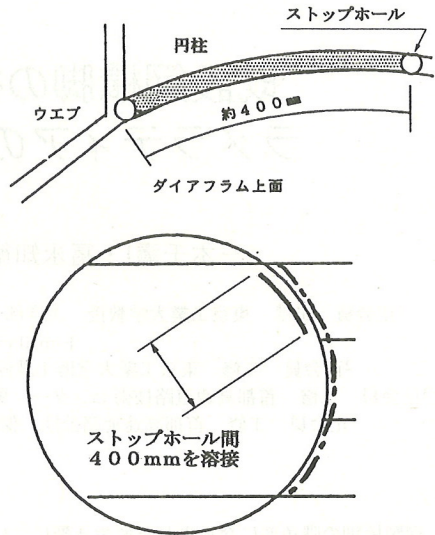
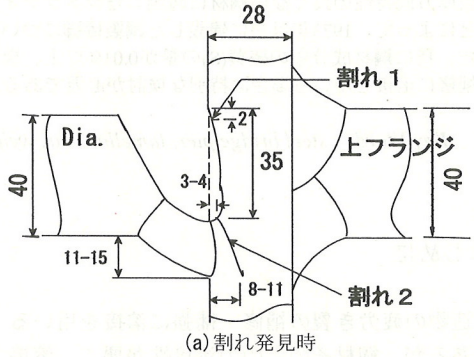
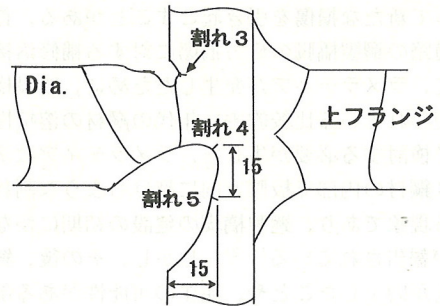


図-3 溶接施工範囲



(a) 割れ発見時



(b) 割れ除去を試みた状態

を同様に完全溶込み溶接とする計画であった。溶接は、溶接部に内在しているき裂が溶接変形に伴って進展しないよう溶接部にあけたストップホール間を、約400mm程度の長さごとに実施した。しかし、フランジ梁側の溶接を終了して、ダイヤフラム側ウェブ近傍での溶接実行時(図-3)、下面側(先行側)終了後に上面側からガウジングを作業を行っている

き、ビードのルート部近傍での割れの、長さ約100mm程度のもので複数発見された。

確認後、除去可能なものはグラインダーで除去し、深いものについてはストップホールを割れの両端にグラインダーを用いて形成したうえで、上面の溶接を行い、さらに割れの内在している下面側のガウジングを行った。しかし、ガウジングによって割れは

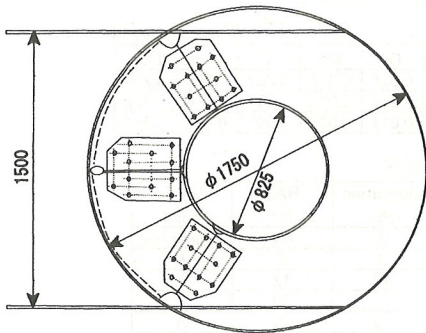


図-5 ダイアフラム切断状況

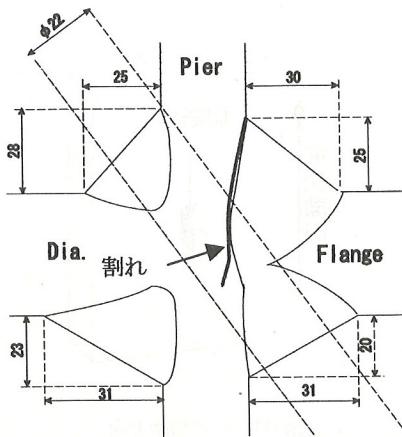


図-6 超音波探傷結果

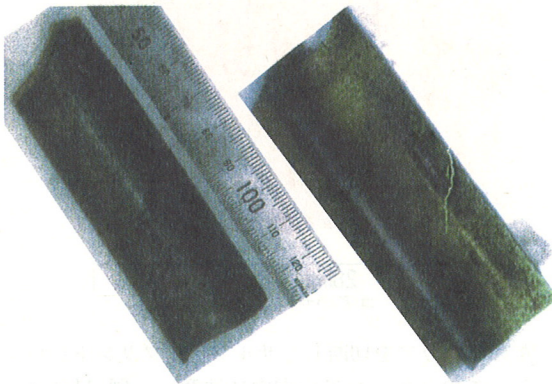


図-7 橋脚から採取したコア

瞬間的に消えるが、その付近にすぐに新たな割れが発生するという現象(図-4)を2~3度繰り返した。

そのため、拘束力を減少させるために、図-5に示すようにダイアフラムを分割して溶接を行った。これによって、溶接中の割れ発生はおさまった。しかしながら、溶接作業後に超音波探傷試験で検査を行ったところ、柱の母材内の割れを発見した。

図-6は超音波探傷試験により推定された内部割れの発生状況である。発生状況的にこの割れはラメラ

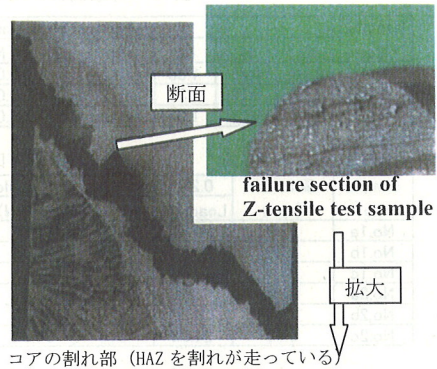


図-8 割れ面の観察結果

ティアと推定されたが、最終的に割れをラメラティアと判定するためには、割れ面の直接観察を必要とするため、その目的で図-7に示すようなコアを対象箇所から抜き出した。このコアに対してまず磁粉探傷を実施したところ発生している割れの状況は超音波探傷試験での評価結果と良い一致を示し、鋼母材の広い領域に割れが認められる。

図-8にこのコアの割れ面のSEMによる観察結果を示す。ラメラティアの典型的な破面であるフラットな面とそれをつなぐステップ面から構成されている。さらに破面の成分分析からは、ラメラティアの主要原因の一つとされている⁶⁾鋼材の介在物であるMnSの存在が認められた。

また対象橋脚から別途採取のコアを用いた、化学成分調査結果および板厚方向引張試験結果を表-1と表-2に示す。板厚方向引張試験は、図-9に示すようなコアの両側に摩擦接合でつかみ部を接合して製作した試験体によるものである。この試験によって得られるコア部の ϕz (しぼり値=断面減少率)は、①構造製造時の溶接入熱による温度の影響、②周囲の拘束の影響(1軸の試験であり3次元的な応力状態を再現していない)、③水素による影響、が考慮できていないため、あくまで間接的な評価法ではある

表-1 対象橋脚に用いられた鋼材の化学成分

sample No.	chemical composition(mass %)											parameters	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	V	Ceq	Pcm	
No.1	0.16	0.29	1.36	0.012	0.012	0.017	0.04	0.018	0.012	0.003	0.406	0.242	
No.2	0.17	0.29	1.36	0.012	0.010	0.017	0.04	0.018	0.012	0.003	0.416	0.252	
No.3	0.17	0.29	1.35	0.012	0.009	0.016	0.04	0.017	0.012	0.003	0.414	0.251	

表-2 板厚方向引張試験結果

sample No.	diameter (mm)	0.2% offset load		tensile stress		elongation (%)	RAZ (%)	break point
		Load(kN)	N/mm ²	Load(kN)	N/mm ²			
No.1a	9.99	26.81	342	27.89	356	3	0.2	connection
No.1b	9.99	28.34	362	39.78	508	12	8	A
No.1c	9.99	27.57	352	40.13	512	10	12	A
No.2a	10.00	26.49	337	39.41	502	18	20	A
No.2b	10.00	26.39	336	40.16	511	10	19	A
No.2c	9.99	24.92	318	36.84	470	6	10	A

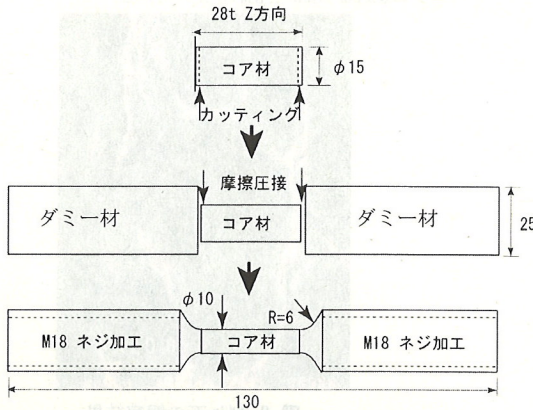


図-9 コアを用いた板厚方向引張試験体

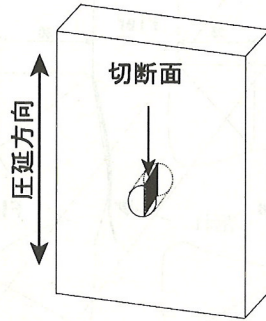


図-11 コア切断方向

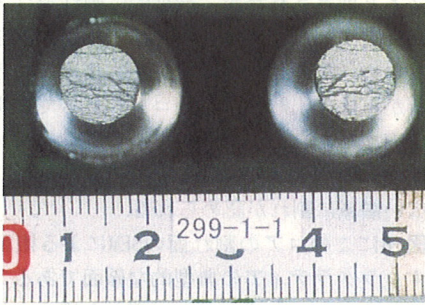


図-10 板厚方向引張試験の代表的な破断面

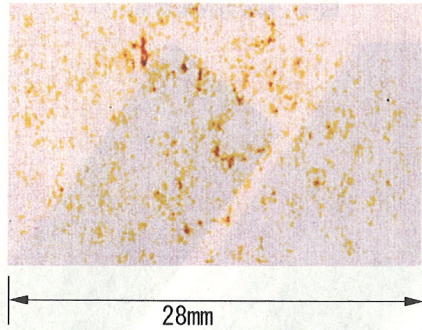


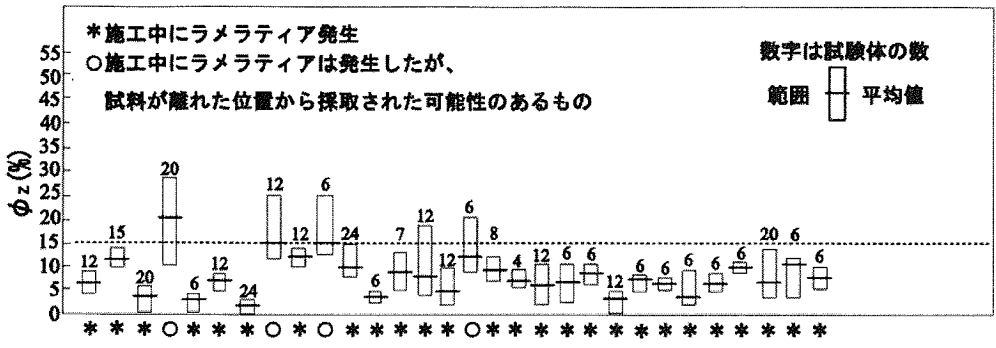
図-12 コアのサルファープリント

が、比較的ラメラティア発生特性と相関の良いパラメータである⁵⁾。なお、コア部の径を10mm以上とすれば、得られる ϕ_z のばらつきが小さくなることが既往の研究⁵⁾において確認されている。

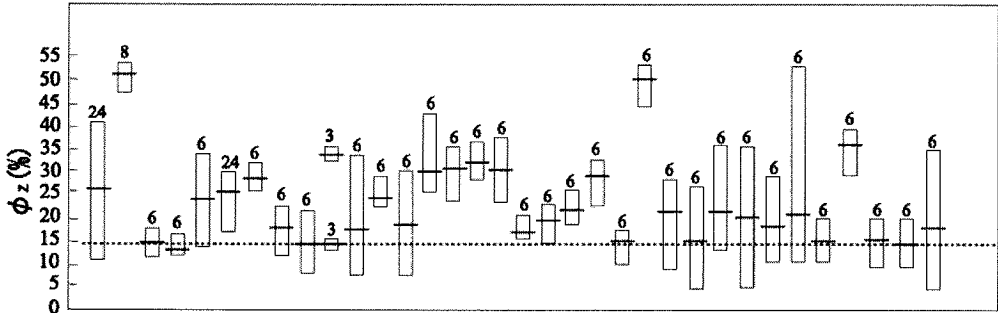
この表-1から、硫黄(S)の量は重量比約0.01%と、現在の鋼材と比較しても極端に高くはない値を示しているが、板厚方向引張試験の結果では絞り値で10%を下回る著しく低いものがあったことがわかる。代表的な破面を図-10に示すが、現在の品質の良い鋼材と比較すると破断面での伸びが著しく小さいことがわかる。

MnSの鋼材断面内板厚方向での分布状況を調べる

ために、コアを切断してサルファープリントを取った。このとき、コアの方向に注意し、図-11に示すように観察する切断面が圧延方向となるように注意しなければならない。これはMnSは柔らかい介在物であるために、圧延方向にヒモ状に伸ばされるため、圧延直角方向に切断してしまうとMnSは点状にしか見えなくなってしまうからである。しかしながら、通常、表面からはどちらが圧延方向かを知るのは困難である。そのため、構造での板取りが明確で、確実に圧延方向が判断できる場合以外は、表面に対しての2方向でコアを切断するのがよい。図-12にコア切断面でのサルファープリントを行った結果を示すが、



(a) ラメラティアが発生した場合の ϕ_z



(b) ラメラティアが発生しなかった場合の ϕ_z

図-13 ラメラティアの発生した構造の鋼材と、発生しなかった構造の鋼材

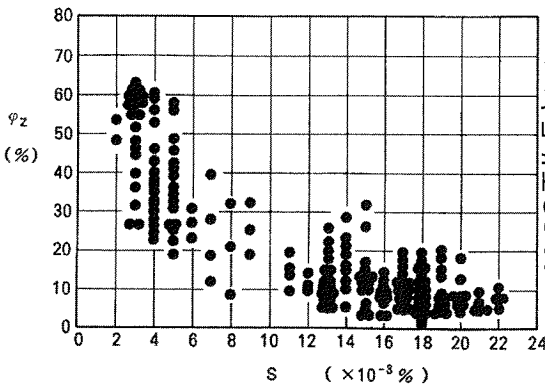


図-14 ϕ_z と S 値の関係

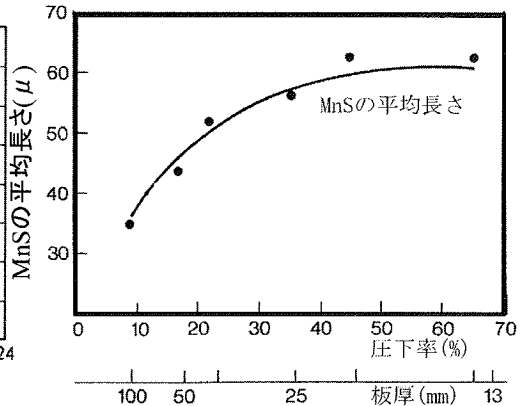


図-15 MnS 寸法と板厚の関係

サルファーは切断面全体に広く分布している。つまり、中央偏析はないため、この鋼材が C C 鋼（連続铸造法による鋼）ではなく I C 鋼（造塊法による鋼）であるということを示している。

3. 鋼材の性能に関する歴史的考察

(1) ラメラティアの発生

図-13は実際の鋼構造の製作において、ラメラティアの発生した鋼材と発生しなかった鋼材について、

その板厚方向引張試験により得られた絞り値(ϕ_z)との関係であり、1974年に整理されたものである⁷⁾。この図から、ラメラティアが生じた場合は、鋼材の板厚方向引張試験の絞り値の平均が15%以下の場合がほとんど全てであることがわかる。逆に、生じなかった場合は、平均値が15%以上の場合がほとんど全てであることもわかる。

図-14は実際に工場で生産された鋼材についての、絞り値(ϕ_z)と硫黄(S)の含有量の関係であり、ここでS量は板全体での平均値に相当するタンディッシュで計測された値、また、絞り値(ϕ_z)は生産さ

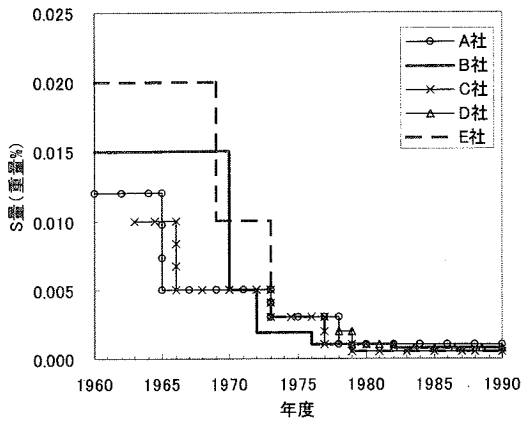


図-16 S値の年代的変遷

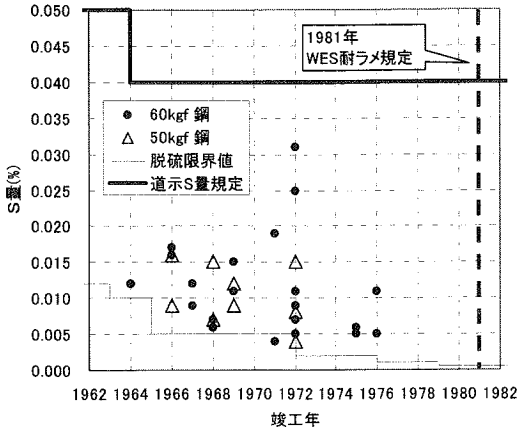


図-18 S値と竣工年

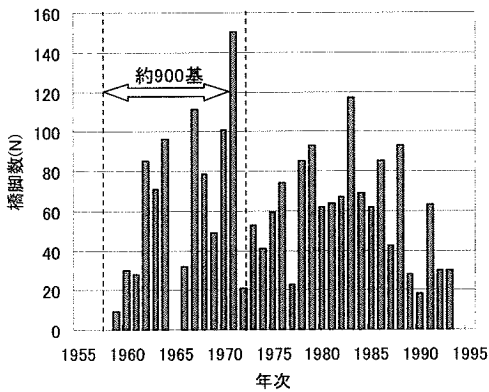


図-17 首都高鋼製橋脚の建設数と建設年

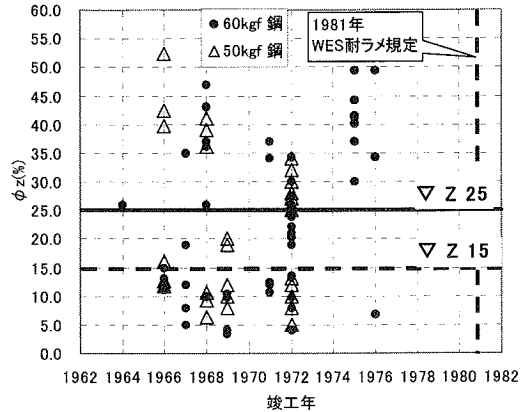


図-19 絞り値(ϕ_z)と竣工年

れた板から取られた試験体5本の平均値である⁵⁾。この図から、S量が0.01%を超えると絞り値(ϕ_z)が15%を下回ることが多くなることがわかる。さらに、図中の点がS量0.01%を境に、二つのグループを作っていることがわかるが、これは製鋼段階で脱硫を行った場合と、行っていない場合の違いである。ただし、このデータは1974年当時のものであり、この後、1978年にCa添加という技術が実用化され、その導入以降は、S量が0.01%を超えても十分に大きな絞り値(ϕ_z)を確保できるようになっている。Ca添加によって鋼材中の硫黄(S)が形成する主な介在物であるMnSの寸法が小さくなるために、硫黄(S)含有量が同じでも鋼材の絞り値(ϕ_z)はより高くなる。図-15に鋼材中のMnSの長さ³⁾と板厚の関係を示す。板が薄くなると圧下率が上がり、MnSの平均長さが大きくなる。そのため板厚が小さくなると ϕ_z が悪化するリスクがあり、注意を要する。

図-16はわが国の鉄鋼5社における鋼材の製造過程におけるS量の低減の能力の限界値を示す⁸⁾。会社により時期は異なるが、鋼材中のS量の下限はこの1970年前後の時期に急激に低下している。このよう

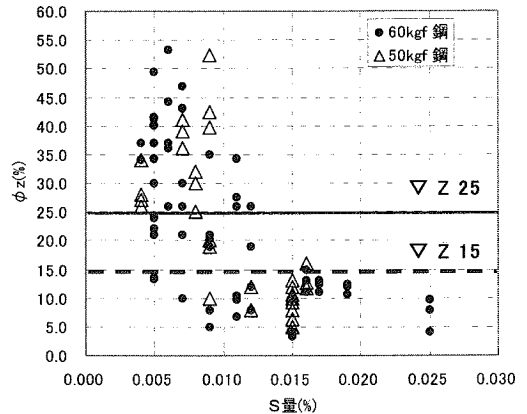


図-20 S値と絞り値(ϕ_z)

なS量の低減は鋼材の連続鋳造化において不可欠であったことによる。この図より、1973年ごろまでに生産された鋼材についてはラメラチアの発生可能性があるS量0.01%以上のものが含まれている可能性が高いことが明らかである。

図-17に首都高速道路における鋼製橋脚の建設年

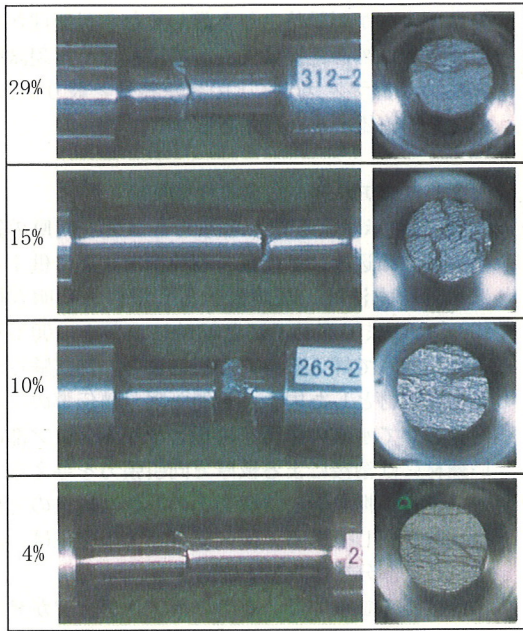


図-21 Z方向引張試験結果

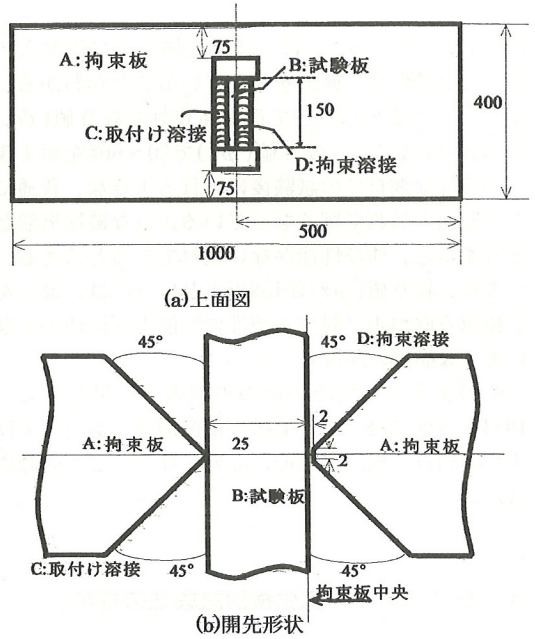


図-22 窓枠拘束試験体

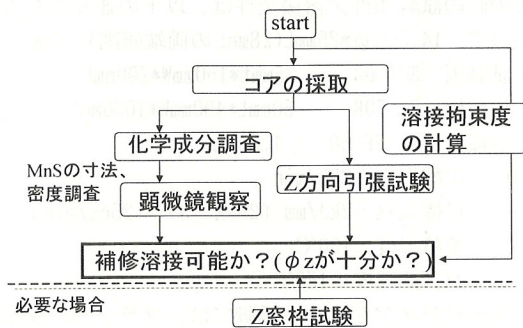


図-23 溶接補修検討案

とその数を示す。橋脚の約50(%)近くにあたる900基程度が1973年以前に建設されている。これらの橋脚の補修において溶接を使用する場合にはラメラティアについて十分な検討が不可欠である可能性がある」と判明した。

(2) 実橋から採取したコアによる調査

実際に首都高速道路のき裂が発生した橋脚から採取したコアを検査して得られたS量を、その竣工年について50kgf級鋼と60kgf級鋼に分けて整理したものを図-18に示す。また、同じ図にS値の低減限界と道路橋示方書の基準値の推移も示している。これより、多くのサンプルではそれぞれの年代においては脱硫の限界値に近いS量であり、その時代においてはむしろ良好といえる鋼材が使われていたことが理

解できる。しかし、1970年代前半でのいくつかの鋼材では著しくS量の高いものが見られた。しかしながら、それでも道路橋示方書で規定されているS量の上限值より十分に低く、基準値と実際の状況が乖離していたと言える。このとき、50kgf級鋼と60kgf級鋼では有意な差は無い。

図-19には絞り値(ϕz)と竣工年の関係を示す。図中のZ25、Z15の線はそれぞれ鋼材の耐ラメラティア仕様において要求されている伸び性能を示している。この図より、1973年以前の鋼材では、かなり絞り値(ϕz)が15%を下回る場合が多い。しかし、逆に1973年以降の鋼材はほとんどが15%はもちろん、25%も超えた絞り値(%)を示しているため溶接に対して十分な強度を持っていると予想される。図-20には、この調査された鋼材についてS量と絞り値(ϕz)の関係を示している。S量が0.015%を超えると、ほとんどの場合は絞り値が15%以下となる。S量が0.01~0.015%の範囲では約50%程度は15%以下となる。また、特にS量の多い0.02%以上の領域となると、絞り値(ϕz)は10%もない領域にあり、このような鋼材は板厚方向に大きな引張の発生する溶接に供するには適していないと言える。

図-21に数多く実施されたコアによるZ方向引張試験のうち典型的なケースとして、絞り値(ϕz)が29%、15%、10%および4%の場合の4種類の試験後の試験片の断面と側面を示した。ただし、それぞれの供試材の板厚は同じではない。これより、まず、絞り値

(ϕz)が小さいほど、はっきりと横方向に筋が入ったような階段状の断面を示していることがわかる。また、ここで示した中では最も良好な絞り値(ϕz)が29%の場合でも、絞り値(ϕz)で50~60%を示す現代の良好な鋼材での試験後に見られるような、普通に見て断面が絞れて細くなっているような破壊形態と比較すると、伸び性能がない鋼材であると言える。つまり、絞り値(ϕz)が15%以下というのは、ほとんど板厚方向引張に対する塑性変形能力が期待できないような品質の鋼材である。

このように、実際の橋脚の調査の結果からも、1973年以前に竣工した橋脚の補修溶接にあたっては十分な調査と検討が事前に必要になることが確認された。

4. ラメラティア発生検討試験法の提案

(1) 検討手順案

ラメラティアの発生特性の検討には図-22に示す、JIS Z 3159-1993に準拠して作られた窓枠拘束試験が用いられてきた。しかし既設橋脚からこの試験に必要な大きさの150mm×200mmの寸法の供試鋼材を採取することは容易なことではない。そのために、既設橋脚から比較的容易に採取できるコアを用いた窓枠拘束試験を提案する。この試験によりラメラティアの再現を行い、後述の判定法の基準となる絞り値(ϕz)の基準や、ラメラティアを生じにくい溶接方法の検討などに用いることを考えている。ただし、個々の工事でのラメラティア発生可能性に関しては、このような大形試験を毎回行うのは不合理であり、簡易的な溶接可能性判定法が必要である。

そこで、図-23に既設橋脚の補修溶接におけるラメラティアの防止を目的とした鋼材の溶接可能性の検討手順の案を示す。この検討は、鋼材の製造年がはっきりしており、しかもミルシートから明らかにS量が低く、十分に溶接性が良好と確実に判別できる場合には適用しない。

ここまで示した古い鋼材に対する知見を活用し、コアによって得られる絞り値(ϕz)とS値および、顕微鏡により観察される組織の状況を用いて、補修溶接時のラメラティアを防止することを試みる。

このとき、基準となる絞り値は15%が最も有力であるが、これまでのデータは新設時の結果から得られたものである。しかし、補修溶接においては新設時よりさらに拘束が増し、再熱により鋼材の強度や靱性も劣化してしまうことが予想されるため、この

基準値自体が新設時よりも厳しくなる可能性がある。そのため、補修溶接に先立っては前述の再現試験を実施して、ラメラティアの発生特性と絞り値(ϕz)の関係を確認する必要がある。

(2) コアを用いた窓枠拘束試験

図-24に示すように、用意したコアを同厚の鋼材の中にはめ込み、その板を窓枠拘束試験に供する。はめ込む方法は、試験板として用いる孔明き板を200℃程度まで温めるのと同時にコアを-100℃程度まで冷却して挿入する。これにより、熱試験板全体を古い鋼材とした場合と可能な限り熱伝導の状況を同様として水素の影響を再現しながら、コア部の古い鋼材には溶接による板厚方向引張力を与えることができる。拘束板と溶接開先の形状は従来の窓枠拘束試験と同じである。ラメラティアの発生は、試験後にコア部分を切断して確認する。

溶接施工試験では、実際にラメラティアが発生した状況を再現するため、図-1に示した橋脚から採取したコアを用いて試験板を作成して溶接を行った。その時の試験条件/溶接条件は、以下の通りである。

- ・コア 14.5mm ϕ *25mmL(28mmLの両端研削) 5個
- ・試験板 SM490B 25mmt*150mmW*200mmL
- ・拘束板 SM570B 50mmt*400mmW*1000mmL
- ・溶接ワイヤ SF-60 1.2mm ϕ
炭酸ガス：25L/min
目標入熱：2kJ/mm (280A 30V 25cm/min)
予熱温度：100℃
バス間温度：150℃

ラメラティアが生じた橋脚では、フランジの板厚は40mm、そしてフランジと柱との溶接は50kgf級の溶材を用いていた。つまり、この窓枠施工試験では、拘束板の板厚が50mmで溶材が60kgf級と少なくとも拘束力の面からは実施工時よりも厳しい条件を設定した。

図-25に試験後、発見されたラメラティアと見られる割れのRTでの写真を示す。5箇所のコアのうち、1箇所でラメラティアが発生している。再現試験としてはまだ確度が低い状態であるため、今後、改良を加える予定である。

5. おわりに

新設時のラメラティアの問題は、耐ラメラ鋼材の開発により既に終わった問題である。しかしながら、補修時のラメラティアは、鋼材で解決することが不

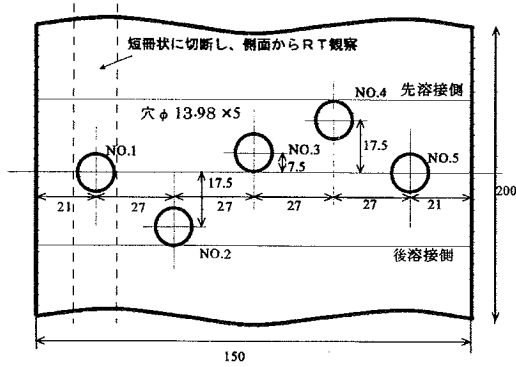


図-24 コアをはめこんだ拘束板

可能な問題であり、主に溶接技術による新しいアプローチにより解決されるべき新しい問題であると言える。

現在、この補修時の耐ラメラティア溶接技術は開発中であるが、その確立まではしばらく、鋼製橋脚の補修工事において、溶接の使用には慎重を期する必要がある。特に本論文にて示したように、1973年以前の鋼材については補修計画の立案に先立って、使用されている鋼材の成分および板厚方向引張特性の検査を実施する必要がある、特にそれによって得られたZ方向引張試験での絞り値(ϕ_z)が15%の以下のときは、溶接による補修は当面避けることが望ましい。

参考文献

- 1) JSSC生産性分科会工作基準小委員会、極厚高張力鋼溶接研究班: 大型溶接構造物の溶接割れに関する研究その3 多層溶接の割れ—大型橋梁部材のレ形かど継手を対象として、日本鋼構造協会誌, Vol.11, No.116, 1975.

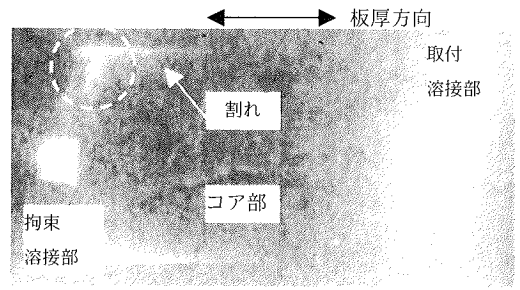


図-25 RTで発見されたラメラティア

- 2) 日本鋼構造協会, 鋼材倶楽部編: 鋼構造接合資料集成(3) 溶接接合(鋼橋), 技報堂出版, 1983.
- 3) JSSC: 新しい構造用鋼材とその諸特性, pp.66-83, 1981
- 4) 新日本製鐵: ラメラティアとその対策, 新日本製鐵パンフレット, Cat. No.AC116, 1998.
- 5) 井上直志: 鋼板の介在物, 偏析に起因する溶接割れの防止に関する研究, 大阪大学博士論文, 1988.
- 6) JSSC安全性分科会 材料小委員会 ラミネーション文献調査班: 鋼板のラミネーションについて(文献調査), 日本鋼構造協会誌, Vol.3 No.21, 1967.
- 7) Farrar, J.C.M., Ginn, B.J. and Dolby, R.E.: *The use of small-scale destructive tests to assess susceptibility to lamellar tearing*, Proc. International Conference "Welding in offshore structures", pp.96-113, 1974.
- 8) 雀部実: 製錬技術の進歩と不純物元素の低減, 西山記念技術講座, 143-144回 pp.1-105, 1992.5.

(2002. 12.16 受付)

A STUDY ON LAMELLAR TEAR RISK OF STEEL BRIDGE PIERS RETROFIT WELDING

Chitoshi MIKI, Tomonori TOMINAGA, Yasutoshi YAGINUMA and Tetsuhiro SHIMOZATO

Cracks inside steel plates were found under the retrofit welding of steel bridge piers. By Z-direction tension tests using cores from the piers, the analyses of chemical compositions, and direct microscopic observations, the cracks were proved to be lamellar tear cracks, which are due to old and bad property steels. Also, by paper researches on old documents, it is found that there are risks of lamellar tear for piers, which were constructed before 1973. Especially for steels having sulfur more than 0.01% and RAZ less than 15%, careful examinations must be than to use welding for retrofitting works. A basic plan for the examination is proposed in this paper.