

鋼製橋脚隅角部の板組構成と疲労き裂モード

三木千寿¹・平林泰明²・時田英夫³・小西拓洋⁴・柳沼安俊⁵

¹フェロー会員 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正会員 工修 首都高速道路技術センター 緊急補強対策室 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

³正会員 工修 首都高速道路公団 保全技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1 日土地ビル)

⁴正会員 工博 首都高速道路技術センター 緊急補強対策室 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

⁵正会員 工学 首都高速道路技術センター 緊急補強対策室 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

首都高速道路の鋼製橋脚隅角部に疲労き裂が発見され、その補修対策の検討が進められている。き裂の発見された橋脚は566脚にのぼり、この調査結果を元に損傷データベースを作成し、これを元にき裂状損傷の分析を実施した。損傷脚のうち比較的大きなき裂を有する253脚について、溶接ビードの切削を含むき裂状損傷の詳細な調査を実施し、板組み毎の疲労き裂パターン¹の分析を実施した。さらに板組み模型による溶接性の検討、施工試験による確認等を行い、板組みに起因する未溶着部である固有内在きずがき裂の発生起点となることが判明した。以上の知見に基づき鋼製橋脚の板組みとき裂パターンの関係について報告する。

Key Words: fatigue crack, steel pier, beam-column joint, weld defect

1. はじめに

近年、首都高速道路など的高架構造の鋼製橋脚の隅角部に疲労き裂が発見されている。それぞれの橋脚における疲労き裂の発生原因の詳細については調査中であるが、鋼製橋脚隅角部に発生した疲労き裂は、隅角部の溶接が部分溶込み溶接である場合のルート部や、溶接棒が届かない狭隘な部分で、溶込みが不完全な未溶着部を起点としていることが特徴である。すなわち、今までに実構造物に発見されている多くの疲労き裂は、応力条件の厳しい、溶接趾端部などの表面から発生しているのに対して、隅角部のき裂はいわゆる“内部きず”から発生することから、そのき裂が進展して構造物の表面に現れる位置、形状は従来の疲労き裂とはまったく異なっている。また、これらのき裂は内部で進展するため、内在しているきずの形や大きさによっては、表面に現れた時点では内部でかなり大きな寸法のき裂に成長している可能性が高い。

鋼製橋脚隅角部に発生する疲労き裂の検査においては、隅角部にどのようなきずが内在する可能性があるかについての十分な知識を有していることが不可欠であり、内在きずの情報なしでは、単なる溶接表面のきずであるとか、まだき裂は微細であるとかのいわゆる誤判定につながる恐れがある。首都高速

道路の橋脚での疲労き裂の発見を契機として、同種の構造物に対する点検が全国規模で一斉に始まっているが、十分な予備知識なしでの点検では不十分な結果しか得られない可能性が高く、疲労き裂の存在を完全に把握していない状況での補修は予想もできないようなき裂の不安定な伝播を誘起する恐れがある。

このような“きず”はいわゆる製作不良によるものではなく、板組みや組み立て手順、開先形状などの設計や製作での決定事項に依存することから、“固有内在きず”と呼ぶことにする。本論文は今後のこの種の構造物の点検に対する情報を提供することを目的に、首都高速道路の鋼製橋脚の隅角部の疲労き裂の点検において明らかになってきた、板組み構成とそれにより固有的に残される内在きずの関係、さらにはそこから発生する疲労き裂の特徴についてまとめたものである。

2. 角柱橋脚隅角部

(1) 板組みと固有内在きず

首都高速道路の鋼製橋脚は矩形断面の柱をもつ角柱橋脚と円形断面の柱をもつ円柱橋脚に大別される。角柱橋脚の隅角部に採用されている柱梁の板組の分

類を図-1に、代表的な板組みの模型写真を表-1に示す。ここでは隅角部の板組みパターンを3文字で標記し、1文字目は貫通するフランジ部材が柱フランジ(No.1~4)か、梁フランジか(No.5~8)を示す。また、昭和45年前後までに建設された橋脚には、隅角部の複雑な構造と溶接を避けるためにコーナーに角型鋼棒(スクエアバー)が使われている(No.9, 10)。この形式にはウェブ内にバーが控えるタイプ(SWW)とバーとフランジが側面に露出するタイプ(SFF)が存在し、1文字目をSとする。また、フランジ・ダイヤフラム交差部をエレクトロスラグ溶接で一体化した板組み(No.11)も存在し、1文字目をEで標記する。2, 3文字目のアルファベットはそれぞれ柱、梁の勝ち部材を示す。勝ち部材とは、コバ面に見える部材を示し、ウェブ勝ちの場合をW、フランジ勝ちの場合をFと標記する。以上を図-1の11パターンに、バリエーションを含め14タイプの板組みに分類した。

代表的構造ディテールで溶接が困難な部位とそこに残される可能性の高い未溶着部を図-2に示す。

WWの板組みではフランジの十字継手溶接および柱・梁の角溶接の3溶接線が交差する隅角コーナ部は、板組みと組み立て順序および作業空間から考えて、溶接施工が難しく、結果的にトンネル上の空洞が残されていることが予想される。これが、図-2で未溶着部と示される三角柱状の溶接困難部でありデルタゾーンと呼んでいる。図-3にWW板組みの溶接施工試験体の隅角部を、ウェブ内面より2mm内側でウェブに並行に切断した切断面を示す。写真ではWWのデルタゾーンに梁の角溶接のギャップが連続した未溶着が観察できる。

WFの板組みではWWと同じデルタゾーンに加えて、梁のウェブコバ面が梁フランジで覆われるため、梁フランジ端部下面の溶接が困難となり、さらに別デルタゾーンが生じる(図-2(c))。FFタイプでもWFタイプと同様のデルタゾーンを生じるが、このタイ

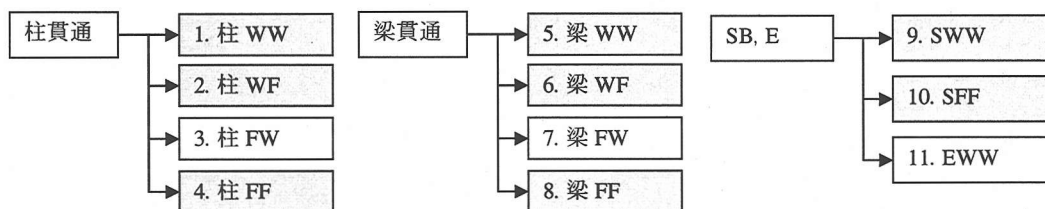


図-1 角柱橋脚隅角部の板組み分類

表-1 角柱隅角部の代表的板組み例

1. 柱 WW	2. 柱 WF	3. 柱 FW
4. 柱 FF	9. SWW	10. SFF

ブでは柱フランジが切り欠かれており、この部分には通常開先が設けられていないため、鋼材接触面が未溶着として残る。隅角部端部の3溶接線交差部では、このように溶接が不完全な部分が完成後の構造体の中に残され、しかも高い応力成分の方向と直交する場合もあり、疲労に対して最も有害な欠陥となる。

以上の考察より、角柱橋脚の固有内在キズの要因として、板組みに起因する未溶着部があり、それは、開先と板で形成される三角柱状の溶接困難な領域（デルタゾーン）、鋼板の面同士の接触部に残る未溶着部が考えられ、これら未溶着部は角柱橋脚では隅角コーナー部に集中する。これ以外に開先への溶込み不足、融合不良なども未溶着部として分類できるが、これらは固有内在キズではなく溶接欠陥と分類できる。

このような板組みに加えて、溶接ディテールについてもバリエーションがあり、これらもきずの発生様式に影響するため、さらに多様な分類となる。

図-4に隅角部の主要な溶接の開先形状を示す。隅角部の十字継手溶接について首都高速道路公団が裏ガウジングを含む完全溶込み溶接と規定したのは昭和45年前後で、それ以前は、図面上は多くの場合K開先と表示されていたが、その寸法などの詳細は示

されていない場合が多い。また、首都高速道路以外では隅肉溶接あるいは片側からの部分溶込み溶接と隅肉溶接なども採用されている。K開先が、隅肉溶接や部分溶込み溶接となっている場合には未溶着部が大きくなる。

このような隅角部の構造ディテールに対して、板厚を考慮した立体的な形状と板の組み立て手順を考えると“固有内在きず”の位置が確定できる。いずれの構造ディテールについても隅角部のコーナーには3方向からの直交する溶接線が集まり、それぞれの接合がK開先溶接で構成されているとするとさらに複雑に溶接線が交差することになる。その結果、溶接棒が届かない箇所が生じる。これらの鋼板の面状接触部やトンネル状の空洞が存在する位置は、隅角部において応力が急激に高くなる位置と一致しており、疲労に対して極めて厳しい状況といえる。突合せ溶接において通常はエンドタブなどを使用して構造体のなかに残すことを避ける溶接の端部が隅角コーナー部に集中する問題も重要である。構造ディテールおよび開先の状況からは、エンドタブを使うことのできない溶接線も多く、そのような場合は溶接始末端にしばしば発生するわれやブローホールといった溶接欠陥が残されている可能性が高い。

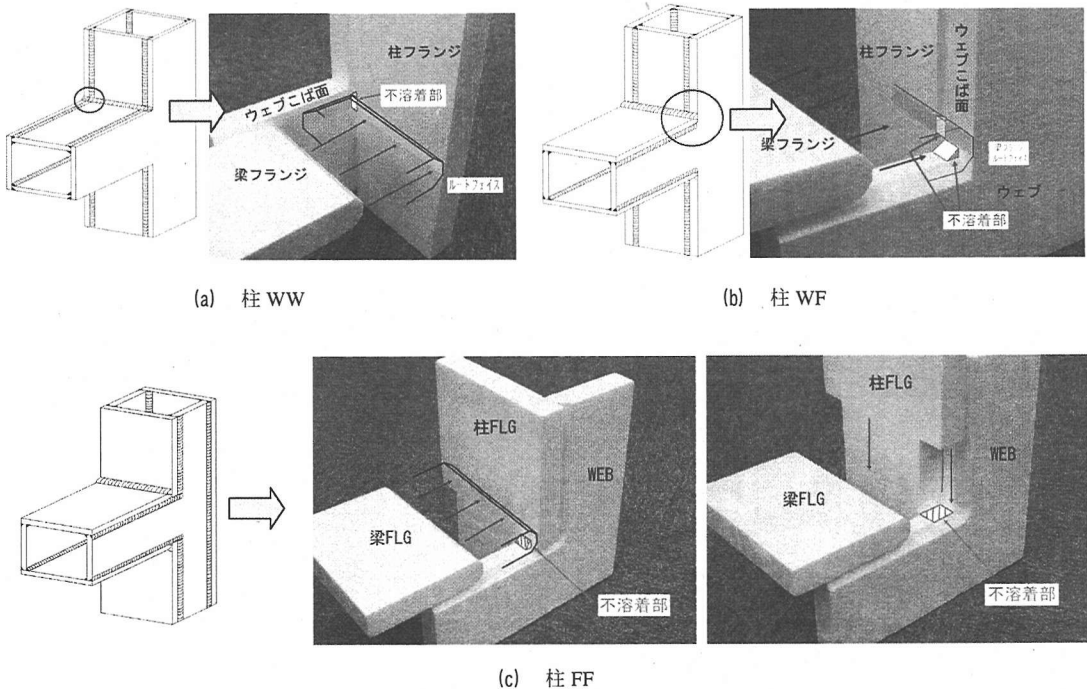


図-2 角柱橋脚隅角部の固有内在きず

(2) 固有内在きずと疲労き裂発生

首都高速道路の鋼製橋脚隅角部の全板組みについて角柱橋脚、円柱橋脚に発生する可能性のある15種類のき裂パターンを設定し、き裂状損傷が発見された隅角部での詳細調査の結果をもとに、き裂のパターン分析を実施した。き裂パターンは板組みに起因して生じる固有内在きずと疲労き裂の発生位置との関係に着目して整理を行った。表-2に角柱橋脚のき裂パターンを示す。15パターンのき裂番号は全板組共通であるが、発生位置は橋脚形状、板組により異なっ

ている。

データベースをもとに損傷箇所毎に発生したき裂のパターンを調べ、これを板組み毎に集計し表-3に結果を示した。1カ所に複数のき裂パターンが発生している場合があるため、集計したパターン総数は損傷箇所数より多くなっている。き裂マップに示したき裂パターン番号は表-2のパターン番号である。赤いき裂はデルタゾーン近傍のき裂を示している。

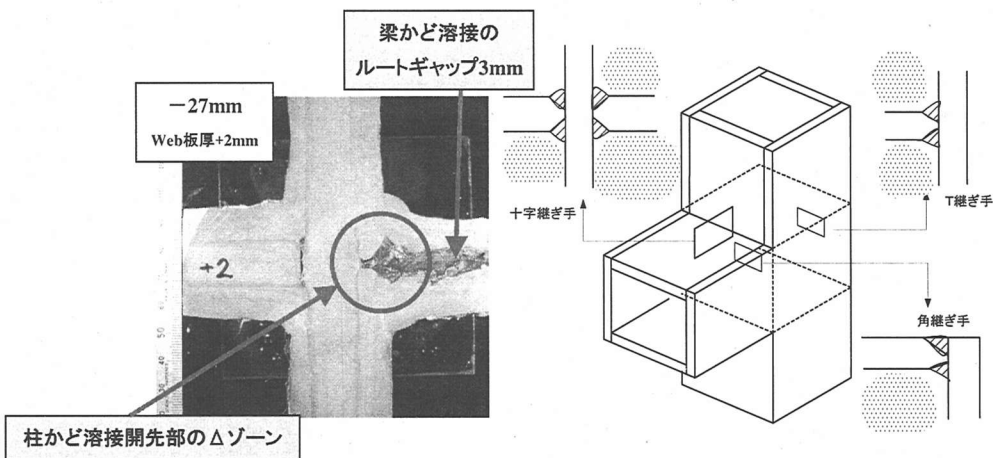


図-3 柱 WW 未溶着の分布

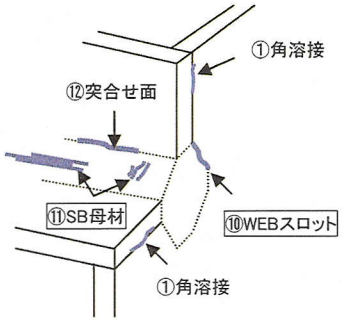
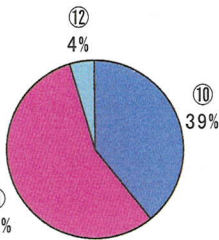

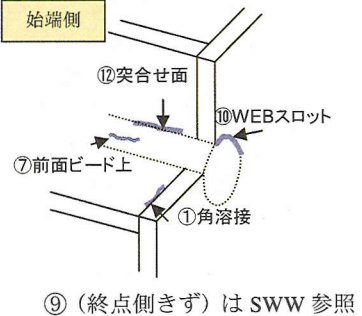
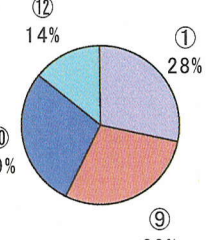

図-4 隅角部溶接の開先形状

表-2 き裂パターン番号

1	角溶接	柱梁の角溶接のき裂
2	ウェブコバ余盛	WWの板組みのフランジ前面溶接の始末端部がウェブコバにかかった部分に発生したき裂
3	Δ-角溶接	3溶接線交差部のデルタゾーンから梁または、柱の角溶接に進展しているき裂
4	Δ-WEB側	WF, FFなど板組みで、デルタゾーンからウェブ側溶接ビード表面に現れたき裂
5	Δ-FLG側	デルタゾーンから前面フランジ側溶接ビード表面に現れたき裂。デルタゾーンの領域は梁縁端からウェブ板厚の3倍程度までとしている
6	前面ビード止端側	梁柱フランジ溶接の止端側に発生したき裂。必ずしも止端き裂とは限らない
7	前面ビード中央	梁柱フランジ溶接のビード上に発生したき裂。
8	菱形ゾーン前面	円柱橋脚のウェブ貫通タイプの菱形領域を起点に発生しているき裂
9	SB 端面/レスラ端面	SWWの板組みで、スクエアバーとウェブの接触面上のき裂
10	SBWEB スロット	SFFなどで、スクエアバーがウェブを貫通する挿入孔沿いに発生したき裂
11	SB 母材	スクエアバー母材に溶接線に平行に入った線上のキズ
12	SB突合せ面	スクエアバーとフランジ部材の突合せ溶接部に生じるき裂
13	板コバラメラテア	母材板コバに発生しているラメラティア状き裂
14	突合せウェブビード	円柱突合せタイプの梁ウェブのビードに現れるき裂。
15	貫通ウェブスロット	円柱橋脚の貫通ウェブの縦方向ビード上に現れるき裂

表-3 角柱橋脚のき裂パターン

	き裂パターン	発生率	事例
① W W	<p>①角溶接 ⑤△-FLG側 ⑦前面ビード中央 ⑥前面止端側 ②ウェブコバ余盛 ⑬板コバラメラテア ①角溶接</p>	<p>角WW(123箇所213き裂パターン)</p>	<p>WW : ⑤△-FLG側</p> <p>WW : ②ウェブコバ余盛</p>
② W F	<p>①角溶接 ⑤△-FLG側 ⑦前面ビード中央 ⑬板コバラメラテア ④△-WEB ⑥前面止端側 ③△-角溶接 ①角溶接</p>	<p>角WF(46箇所78き裂パターン)</p>	<p>WF : ④△-Web側</p>
④ F F	<p>⑦前面ビード中央 ⑥前面止端側 ④△-WEB ⑤△-FLG ③△-角溶接 ①角溶接</p>	<p>角FF(54箇所85き裂パターン)</p>	<p>FF : ④△-Web側</p>
⑨ S W W	<p>①角溶接 ⑫突合せ面 ⑬板コバラメラテア ②WEBコバ余盛 ⑨SB端面 ①角溶接 ①SB母材</p>	<p>SWW(57箇所61き裂パターン)</p>	<p>SWW : ⑨SB端面</p>

<p>⑩ S F F</p>		<p>SFF(18箇所23き裂パターン)</p> 	 <p>⑩WEB スロット</p>
<p>⑪ E W W</p>		<p>EWW(4箇所7き裂パターン)</p> 	 <p>⑩EWW-WEB スロット</p>

WWタイプでは、およそ半分がデルタゾーン近傍のフランジ側に発生した亀裂を意味する“⑤△-FLG側”のき裂に分類される。前述したように隅角コーナー部の3溶接線交差部にはデルタゾーンとよばれる三角柱状の空洞が存在し、ここから応力直交方向に進展したき裂がフランジ溶接線に沿って現れたものである。

デルタゾーンの未溶着部の大きさは3溶接線の交差部近傍の開先形状により変化するが、その形状が製作メーカーにより異なっていることから、穿孔等の破壊検査以外には確認が難しい。デルタゾーンから発生したき裂は、梁縁端からウェブ板厚の2~3倍の範囲に現れ、磁粉探傷指示模様が比較的明瞭であるという特徴がある。同様の起点から進展するき裂がウェブ角溶接線に沿って現れる“③△-角溶接”も全体の2割弱発見されている。WWタイプでは十字継手溶接の始末端がウェブコバ上にかかり、この位置に溶接の余盛があるので、ここに発生する溶接欠陥“②ウェブコバ余盛り”とデルタゾーンから発生するき裂と区別が付きにくく混同しないよう注意が必要である。WWの板組ではかなりの数の疲労き裂がこの位置に発見されているが、ウェブコバ上のき裂であれば切削により消滅する可能性が高く、下にあるウェブ母材への進展を阻止するためにも早期に除去して仕上げを行うことが望ましい。WW板組みではデルタゾーン周りの損傷が全体の9割と圧倒

的多数を占めている。

WFタイプではWWタイプに見られる柱側のデルタゾーンに加え、梁の角溶接側にデルタゾーンが存在しそこからのき裂がウェブ側に現れる。④のデルタウェブ側き裂と⑤フランジ側き裂がそれぞれ全体の4割弱を占め、両者が表面でつながる場合もある。ウェブ側にはさらに③△-角溶接と標記した水平方向のき裂が進展する場合もあり、③~⑤のデルタゾーン周辺のき裂が連続し、最終的には斜めから見てコの字型のき裂が表面に現れる。WFタイプのようにウェブ側にフランジコバ面が露出した板組では、デルタゾーンから発生したき裂を溶接により完全に補修することは容易でないと考えられ、溶接は行わずき裂の除去と進展防止策、補強材の取り付けによる応力低減を組み合わせた対策が考えられている。本タイプの損傷絶対数はWWの損傷より少ないが、損傷率は高く、調査対象のWF板組みの13%に損傷が発見されている。FWタイプは板組自体が少なく、損傷事例も少ないことから割愛する。

FFタイプにおいても3溶接線交差部のデルタゾーンに起因する疲労き裂が多い。FFタイプでは柱フランジのコバ周辺に未溶着部が存在する可能性がある。WF同様、損傷率が高く調査脚の18%で損傷が発見されている。

スクエアバーを隅角部に用いた脚のき裂状の損傷は、スクエアバーの母材に入ったキズとスクエアバ

一とフランジ板部材の溶接部、スクエアバーとウェブとの面接触部に沿ったキズに大別できる。母材のキズはスクエアバー表面に薄くはいる板表面に平行な直線状キズで、材料中に残る層状の析出不純物が板を裂く方向の力により口を開いた可能性もあるが、表面研削により消滅する場合が多く、今のところ構造上の重大欠陥とは見なされていない。SWWタイプでは“⑨ウェブ端面”と標記したスクエアバーとウェブ板の接触部と、“⑩突合せ面”と標記したフランジとの突合せ溶接部のルート部の未溶着を基点としたき裂は溶接部、鋼板接触面を基点としたき裂であり、それぞれ損傷の半分を占める。⑨のき裂は柱梁の角溶接を切り離す方向に進展することから、早期に進行を止める対策が必要である。SFFタイプではウェブに設けたスクエアバー用の貫通孔に沿ったき裂が発見されている。このようなき裂が作用応力の方向によりウェブ母材に進展する可能性があるため注意を要する。スクエアバーを用いた板組ではデルタゾーンのような三角形の未溶着部がなく、損傷部位は製作時のメタルタッチ面に限定できる。

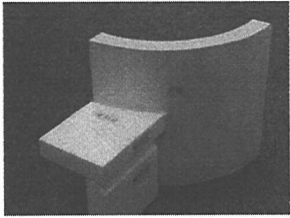
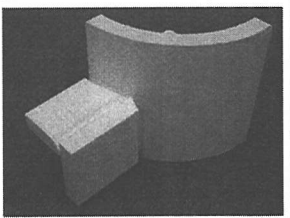
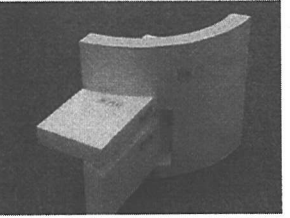
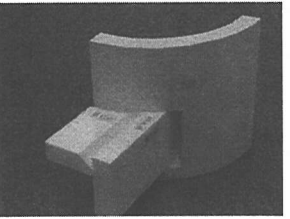
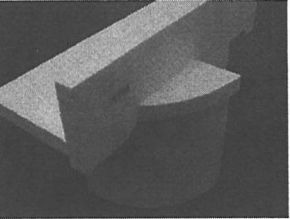
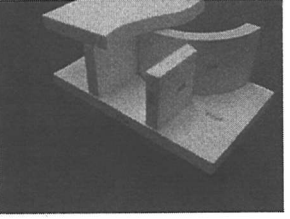
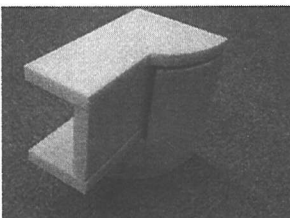
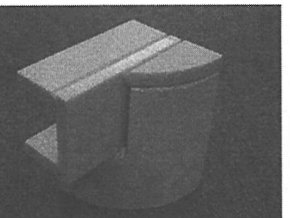
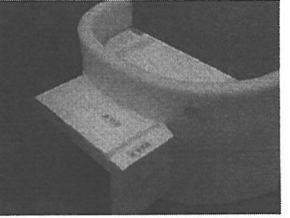
スクエアバーの代わりにエレクトロスラグ溶接を採用した板組（以下、エレスラタイプ）の場合、溶接始点付近に大きな融合不良が残されている場合があり、エレスラタイプでは溶接補修が困難なことから、ここから疲労き裂が進展すると大きな問題となる。

3. 円柱橋脚一箱断面はりの隅角部

(1) 板組みと固有内在きず

首都高速道路の損傷隅角部において、これまでに調査された円柱橋脚の板組みの代表例を表-4に示す。円柱橋脚上層部は上下フランジで異なる板組みが採用されることが多く、また、上フランジについては梁と柱のフランジが一枚の鋼板となる場合が多く、ウェブとの板組みに特殊な形式が採用されている場合がある。しかし、今のところ損傷の報告例が少ないことから説明を省略する。円柱橋脚については、板組み毎に固有な名称をつけ、一般部について

表-4 円柱橋脚の板組み例

		
15. 梁突合せ F	16. 梁突合せ W	17. 梁ウェブ貫通 F
		
18. 梁ウェブ貫通 W	19. 梁ウェブ差込 W	20. 柱貫通
		
21. 梁断面貫通 F	22. 梁断面貫通 W	23. 梁フランジ貫通 W

は表-4 に示す 9 パターンに分類した。上層梁では上フランジの板組みに変則的なパターンが存在するため、5 パターンを加え計 14 パターンの板組みに分類した (No.15~28)。

図-6 に板組みと組み立て手順から予想される固有内在きずの存在箇所を示す。円柱断面柱においても角柱橋脚の場合と同様に、板組みの構成により、様々な形、大きさの固有内在きずが残される可能性がある。柱が円形断面であることに起因した、組み立ての精度の問題と溶接施工空間の確保に関わる問題が円柱橋脚の隅角部の内在きずに大きく影響しており、固有きずの存在する割合とその大きさは角柱橋脚の隅角部に比べてはるかに大きいという特徴である。

箱断面はり幅が柱の直径より小さい場合は、はりのウェブを貫通させた構造が多い (表-4, No.17,18 構造)。この場合、円柱橋脚に設けられた梁ウェブを貫通させるためのスロットは、梁ウェブとの間に比較的鋭い角度の開先を設け、そこを埋め戻す要領で溶接施工することとなる (図-5 参照)。その場合、開先の奥まで溶接の溶込みを実現することはかなり困難な作業であり、開先先端に鉛直方向に連続したトンネル状の空洞が残される可能性が高い。このトンネル状の空洞は円柱橋脚の板厚が大きくなるほど大きくなる。また、組み立てを容易とするために大きめのスロットが開けられている場合も多く、その場合も空洞が大きくなる。また、スロットの縦方向

の工場溶接は、パイプを寝かせて施工したとすると、片側の開先面にはスラグ巻き込み、融合不良が生じやすい。さらに、この構造ディテールの柱内部の貫通された梁ウェブと柱から形成される、図-5 でウェブと円柱に挟まれた三日月形の空間はきわめて狭く、溶接作業性は劣悪であり、場合によっては柱中心側からの片面溶接とならざるを得ず、梁ウェブと柱と

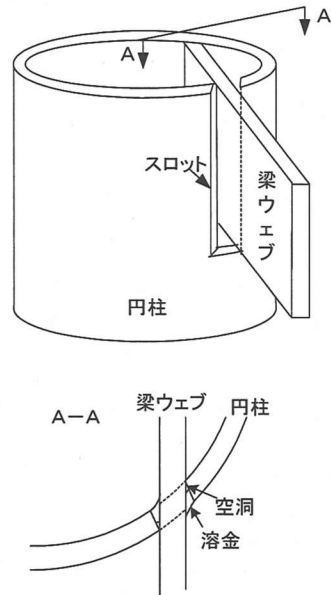


図-5 ウェブ貫通スロット

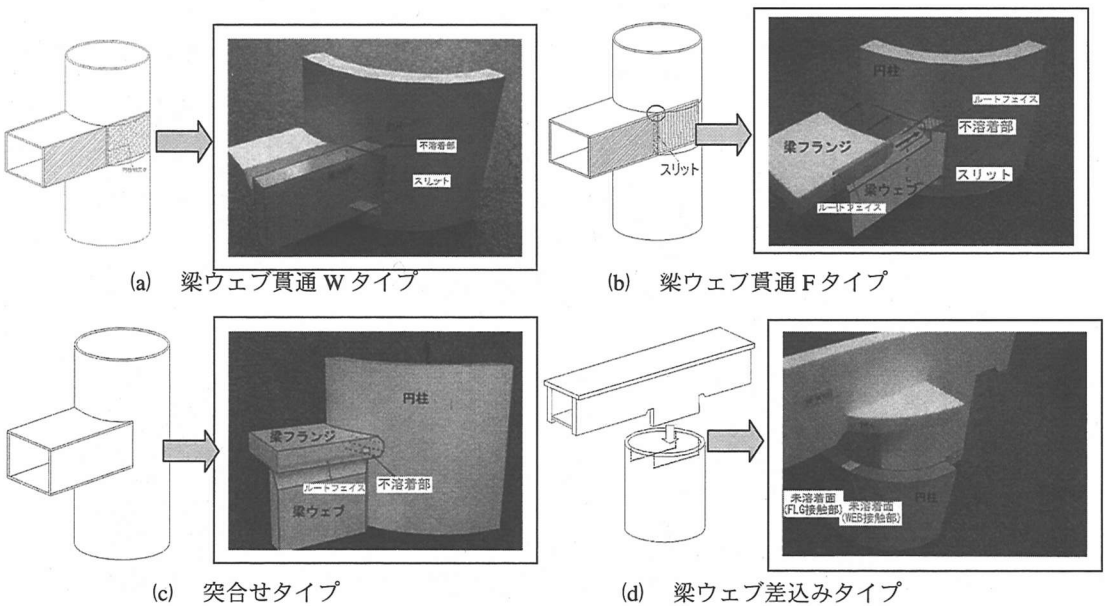


図-6 円柱橋脚の固有内在きず

の溶接については良好な品質は期待できない。

この構造ディテールでは貫通ウェブの上下のコバ面と柱との溶接も十分な溶込みが得られていないことが予想される。スロットのサイズの精度と組み立て手順にもよるが、パイプとウェブの交差部の下側では、ウェブコバとパイプは菱形形状の領域で鋼材同士が接触し、外側からの隅肉溶接のみが可能となる。スロットを有した円形橋脚に特有なこの未溶着部を「菱形ゾーン」と呼ぶこととする(図-6(a), (b), 図-5 A-A 参照)。この結果、最も応力の集中する箇所に大きい未溶着面を残すことになる。また、スロット上側は大きなギャップが残された部分に隅肉溶接で蓋をする状態になり、大きな空洞が残される可能性が高い。

また、梁フランジと柱面との間には隙間が残されることを想定して製作される場合もあり、その際には梁フランジに開先がとられず、フランジのコバ面と柱面の間には隙間が残されたまま隅肉溶接されている場合もある。

貫通ウェブタイプで梁フランジ勝ちの構造では(表-4, No.17)、隅角コーナー部で溶接線が複雑に交差し、特に菱形ゾーンの前方に梁のウェブ・フランジ接合部のデルタゾーンが存在し、更にこれに梁の角溶接のルートが連続した未溶接ゾーンが残される可能性が高く、これがき裂の起点となる可能性が高い。

梁断面が円柱に突合せて接合される構造ディテール(表-4, No. 15, 16)は、現在でも標準的に採用される板組構造である。この構造については貫通ウェブタイプに固有の貫通スロットの空洞は存在しないが、コーナー近傍の固有内在きずの存在については貫通ウェブタイプ、あるいは角柱 WF などの構造ディテールと同様である。また、梁ウェブと円柱との溶接については作業空間と完全溶込み K 開先溶接に対する作業性から、溶込み不良を生じる可能性はあり、特に突合せ面のうち、梁断面のコーナー部にはデルタゾーンが存在し、き裂の起点となる恐れがある(図-6(c))。

梁フランジが円柱を貫通する構造ディテール(表-4, No. 23)も少数ではあるが存在する。このディテールでは貫通フランジとパイプのスロットは隅肉溶接に近い場合があり、柱の外側ではフランジとスロットのコーナーの付近、および柱内面のコーナーに溶接作業が困難な部分が存在する。

表-4 の No. 19 のように、梁が円柱の上に載せられた形の梁ウェブ差込構造もある。この場合は梁ウェブを切り欠いて円柱に差込んで接合されているが、

この切欠いたウェブのコバ面と円柱との接点には、未溶接面が残されやすく、また、円柱と梁フランジの溶接において、円柱と梁ウェブの交点で溶接の方向、姿勢が短い区間で2度変化することも溶接の品質確保上、問題である。橋脚によっては、この周辺の溶接をすべて隅肉溶接として設計しているものもあり、ここで述べた未溶接面の存在や溶込みの不十分な継手の問題はさらに厳しくなる(図-6(d) 着色部)。この形式の橋脚において橋梁上部構造を受ける横梁はウェブ4点で柱パイプと接合されるが、鋼材同士が均等に接触できず梁ウェブとパイプコバには隙間が残されるはずである。この結果、板コバ接触点では活荷重による圧縮力は隅肉溶接で伝えられることになり、疲労上の弱点となる。

表-4 の No. 20 の構造ディテールは箱断面桁と円柱を直結する場合に採用されている。柱は箱断面桁の下フランジを貫通し、上フランジに突き合わされている。箱断面桁の下フランジと円柱橋脚の間のギャップは円柱が真円でないこともあって、規定値以内で一様に保つことが困難であり、かなりの隙間がある状態で溶接されている可能性が高い。構造体によってはこの溶接は隅肉溶接で設計されており、この溶接の実のど断面寸法は極めて小さいことも予想される。柱内部に設けられているダイアフラムと円柱あるいはフランジとの間の溶接に関する不具合の可能性はその他の構造ディテールについて指摘してきたことと同様である。

(2) 疲労き裂の発生と進展

表-5 に円柱橋脚に発生したき裂のパターンと代表的な疲労き裂の写真を板組み毎に示す。

円柱橋脚のき裂パターンを見ると、デルタゾーン、菱形ゾーン前面など角柱橋脚で目立った隅角コーナーの疲労き裂に比べ、梁フランジ、ウェブと柱の突合せ溶接のき裂の割合が多いという特徴がある。この原因として、梁と柱との間にギャップを生じやすいという問題、角柱橋脚との梁の応力分布の違いがあると考えられる。

突合せタイプの損傷き裂の位置は、梁のコーナー部と、柱-梁フランジ溶接部の2つに大別され、両者の割合はフランジ勝ち(以下、Fタイプ)の場合で4:6、ウェブ勝ち(以下、Wタイプ)では3:7程度あり、隅角部コーナーのデルタゾーンから離れたフランジ十字溶接部の損傷の割合が角柱に比べ大きくなる。

コーナー部のき裂についてはフランジ側の損傷(⑤△-フランジ側)が全体の20%程度と多い。梁の

表-5 円柱橋脚のき裂パターン

	き裂パターン	発生率	事例
⑮ 梁突合せF		<p>丸-梁突合せF(27箇所34き裂パターン)</p>	<p>⑦前面ビード中央</p>
⑯ 梁突合せW		<p>丸-梁突合せW(9箇所12き裂パターン)</p>	<p>⑤Δ-Flg 側 (下フランジ側)</p>
⑰ 梁ウェブ貫通F		<p>丸-梁ウェブ貫通F(14箇所20き裂パターン)</p>	<p>③Δ-角溶接</p>
⑱ 梁ウェブ貫通W		<p>丸-梁ウェブ貫通W(1箇所3き裂パターン)</p>	<p>⑧菱形ゾーン前面</p>

	き裂パターン	発生率	事例
⑱ 丸 梁 ウェブ 差込 W		丸-梁ウェブ差込W(31箇所40き裂パターン) 	 ⑧菱形ゾーン前面
⑳ 丸 柱 貫通		丸-柱貫通(58箇所58き裂パターン) 	 ⑦前面ビード中央

フランジ・ウェブと柱の3溶接線交差部には角柱橋脚同様、デルタゾーンが残ることは避けられず、き裂はこれを起点としたルートき裂と考えられる。(図-6(c)参照)。梁突合せFタイプではウェブコバ側のき裂(④Δ-WEB側)が15%程度みられるが、梁突合せWタイプではこれがないが、縦方向き裂が発見されており、⑭梁ウェブビードき裂として分類されている。梁W勝ちタイプでは、き裂が梁のコーナーを起点として、ウェブに沿って縦方向に進展し、④と⑭のき裂の区別が明確にできない。ウェブの溶接品質は梁ウェブの開先角度に大きく影響されることから、マクロエッチング等により溶接ビード形状を観察することが損傷原因の調査として有効である。一般的には梁ウェブの溶接は梁外側に片側開先をとり、内側からは隅肉で溶接されており、梁と柱の接触ラインに沿ってルートフェースが残され、特に梁フランジとウェブの溶接線交差部の溶接品質が悪い場合が多い。

柱フランジの十字溶接のき裂は、趾端側付近にできている場合でも梁フランジと柱のギャップを起点とするルートき裂、ボンド部に沿った溶接割れを起点とした疲労き裂である可能性がある。梁ウェブ貫通タイプでは3溶接線交差部のき裂が圧倒的に多く、前述したデルタゾーンに起因するき裂に加え貫通ウ

ウェブと柱スロット上下の鋼板面接触部にあたる菱形ゾーンを起点とするものも多い。Fタイプでは全損傷の25%を占める“Δ角溶接”と標記したき裂は菱形ゾーンから進展したもので、Wタイプでいう“菱形ゾーン前面”と同一起点と考えられる(図-6(b)参照)。Fタイプではこのき裂はフランジ・ウェブの角溶接を切断する形で進展するが、板組理解がないと見逃される恐れがある。④ΔWEB、⑤ΔFLGはデルタゾーンから進展したき裂と考えられ、角柱橋脚FFと同様のき裂パターンを示す。ウェブ貫通Wタイプは事例数が少ないがウェブ貫通Fで言及した3溶接線交差部の典型的なき裂が発見されている。

ウェブ差込タイプは、“⑧菱形ゾーン前面”と標記したウェブコバとパイプの交点の溶接の疲労き裂が7割を占め、残りが下フランジの十字溶接の疲労き裂である。後者については梁内のダイヤ、リブなどが存在し、パイプの面外剛性が高い部分にき裂が発生しやすい。

柱貫通タイプではパイプと梁フランジの接合部ビードにき裂が生じている。柱とフランジの間には製作上ある程度のギャップが残るが、これがき裂発生に影響していると考えられる。上部工の荷重は箱内のダイヤフラムによりパイプに伝えられていることから、構造的にはリダンダンシーがあるが、パイプ

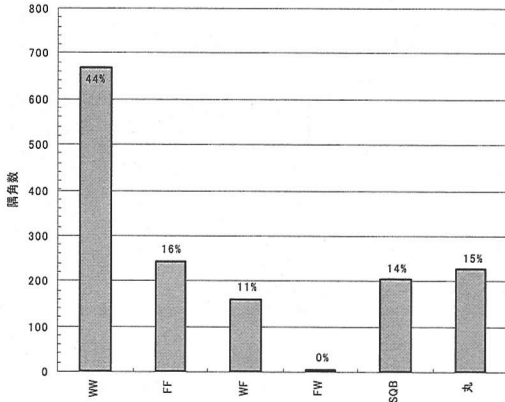


図-7 板組み別損傷数

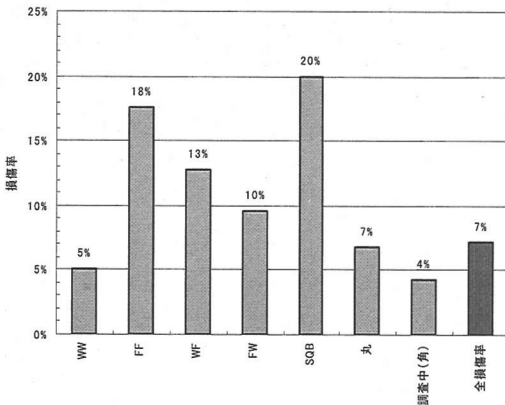


図-8 板組み別損傷率

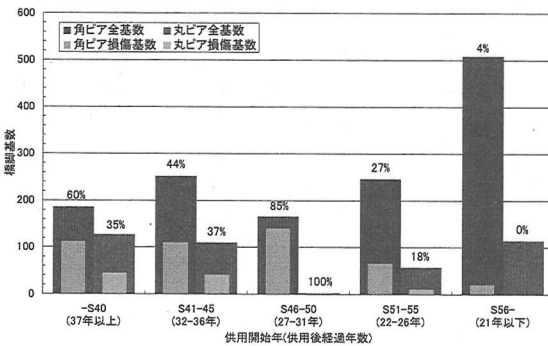


図-9 損傷数の年代変化

とダイヤフラムの溶接にき裂を進展させないように注意が必要である。

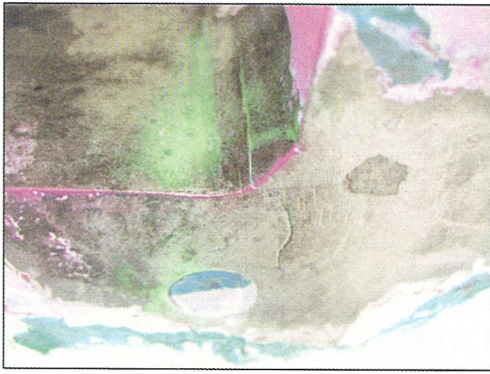
4. 損傷状況

(1) 損傷状況の分析

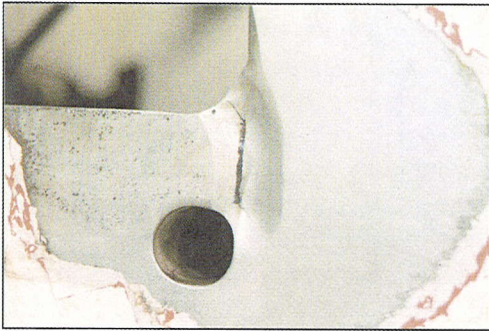
首都高速道路には 2000 基強の鋼製橋脚が存在し、その内分けは角柱橋脚が 79%、円柱橋脚が 21%を占めている。損傷の調査は隅角の 1 溶接線につき起点側、終点側の 2 カ所とカウントしており調査箇所数は約 22000 になる。このうち平成 10 年度以降の点検調査により、なんらかのき裂が発見された損傷箇所数は 1584 であった。損傷を橋脚の板組み毎に分類した結果を図-7 に示している。これを見ると WW タイプの損傷数が多いが、板組み毎の損傷率（損傷箇所数／全箇所数）で整理すると図-8 に示すとおり、梁と柱のフランジのコバ面が表面にでる FF、梁フランジコバが出る WF タイプの損傷率が高いことがわかる。損傷率には板組み以外に供用期間、交通量も影響するはずであるが、供用年代別に板組み毎の損傷率を調べても同様の傾向が見られることがわかっている。損傷率を平均すれば 7%となる。損傷脚数の年代変化を図-9 に示す。損傷箇所が 1 カ所であれば損傷脚として計上するため、脚の損傷率は箇所数で整理した場合に比べ大きくなる。損傷箇所数は新しい橋脚ほど少なくなるのは当然であるが、昭和 46-50 年代供用の橋梁の損傷率が非常に高い。45 年度以前の古い脚には FF タイプ、スクエアバーをはじめとする現在では少ない様々な板組み形式が見られ、これらの損傷もこの時代に集中している。スクエアバーの損傷については母材キズ（表-3⑨、⑩参照）が大半を占め、これらのきずは軽い研削により消滅する場合が多い。全平均では矩形断面橋脚が 33%、円形断面橋脚は 24%、全橋脚で 31%の脚に損傷がある。

(2) 角柱 WF タイプの損傷例

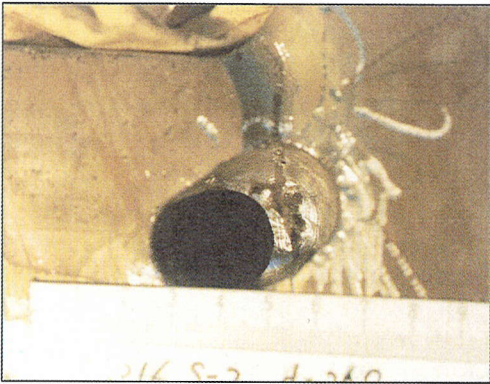
本損傷は WF タイプの梁の上フランジ側隅角コーナー部に発生した亀裂であり、デルタゾーンのフランジ側、ウェブ側（図-10(a)）に磁粉探傷の指示模様があった。隅角部に補強材を取り付けた後、き裂をウェブ側より 4mm 切削すると、図-10(b) に示すように梁フランジのコバ面が現れた。フランジの開先は小さく、ルートフェースから発生したき裂がウェブに進展したことが確認できた。またウェブの切欠き部から母材内に進むき裂が発見され、応力集中箇所の未溶着部の危険性があらためて認識された。さらにウェブを掘り進むと図-10(c) に示すようにフランジ下側の開先下の未溶着（デルタゾーン）と内なき裂が確認された。



(a) 磁粉探傷結果



(b) 切削4mm



(c) 切削26mm, Web板厚貫通
 図-10 WFタイプき裂の切削

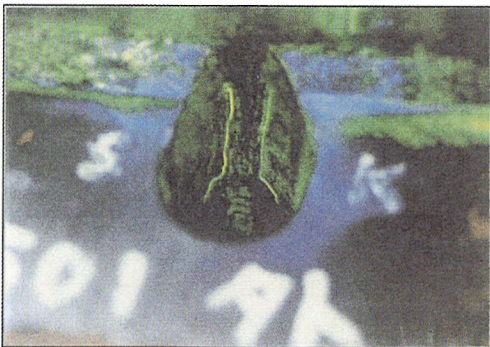
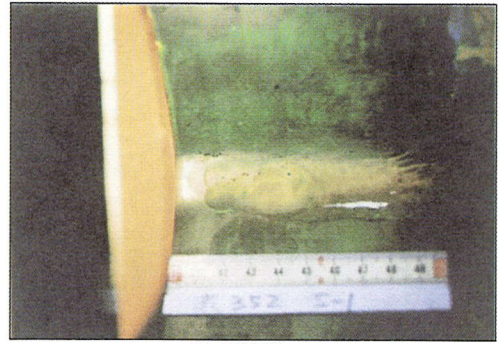
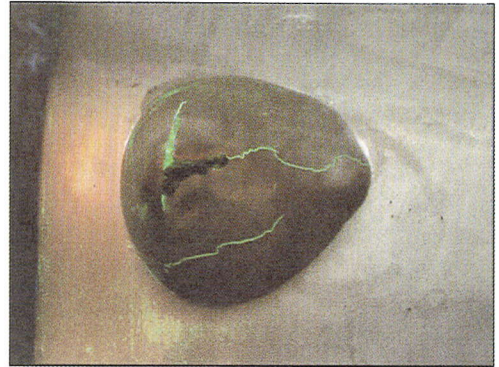


図-14 円柱フランジ十字溶接ルートの未溶着



(a) 切削前 MT



(b) 切削後 MT

図-11 WWタイプき裂の切削結果

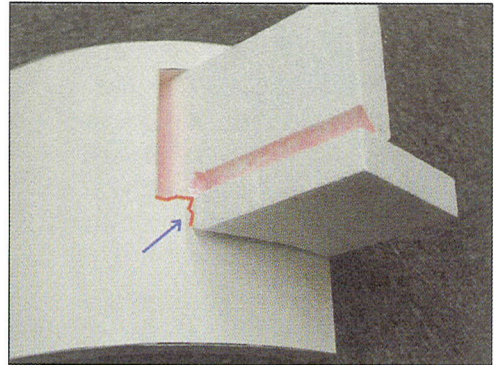


図-12 円柱梁ウェブ貫通タイプの損傷箇所

②磁粉探傷試験結果



図-13 円柱梁ウェブ貫通タイプの損傷

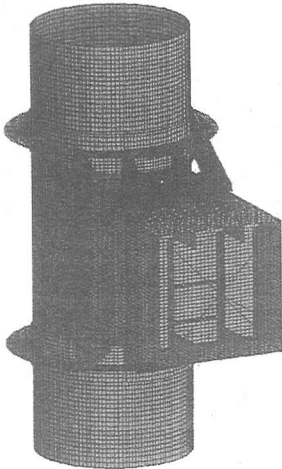


図-15 丸ピア隅角部補強構造

(3) 角柱 WW タイプの穿孔例

WW タイプの板組みの隅角部のデルタゾーンのフランジ側に発見されたき裂写真を図-11 に示す。き裂中央部分を図-11 (b), (c) に示すように切削することにより溶接内部に生じた空隙よりき裂が進展したことが確認された。実働応力が高い隅角部の応力集中箇所であり補強材による応力低減を行った上で、内部の未溶着部の確認を行う計画である。

(4) 丸ピアウェブ貫通 F タイプの損傷例

円形断面の橋脚に梁のウェブを貫通させるタイプでは、柱とウェブの交差部のスロットが疲労き裂に対して弱点となる。図-12, 13 に示す隅角コーナーには、スロット下端の水平方向き裂と下フランジのデルタゾーンから進展した縦方向のき裂が合体している。水平方向き裂の先端を窄孔すると、き裂は菱形ゾーンにつながる。また、フランジの十字溶接ビード上にもき裂が発生しており、穿孔により、部分溶込み溶接の未溶着部からき裂が進展していることが確認できた(図-14)。

十字溶接部のき裂を除去し完全溶込み溶接への改良を試みたが、補修溶接により柱の板内にラメラテアが発生した。溶接時にダイヤフラムの一部を切断して拘束度を下げたにもかかわらずラメラテアが発生した。これにより、補修溶接に先立つ材料確認の重要性が認識されたが、本工事では溶接を中止し、溶接ビードにストップホールを設け、支圧ボルトにより補強部材(図-15)を取付け応力低減を図った。

5. まとめ

首都高速道路隅角部での損傷を受け、これまでの損傷調査結果をデータベースし、その損傷パターン、原因の分析を進めた結果、以下の知見が得られた。

- (1) 板組みによりデルタゾーン、母材同士の接触部などの溶接金属が溶込みにくい部位があり、これらを固有内在きずと称した。
- (2) 隅角部のき裂はわれなどの溶接欠陥、あるいは固有内在きずを起点とする場合があるが、溶接が良好でも固有内在きずが残る場合が多くこれを起点として疲労き裂が進展する可能性が高い。
- (3) 3 溶接線が交差する隅角部コーナーはデルタゾーンに加え、応力集中が高いこと、溶接線始終端であることから溶接欠陥が入りやすく、疲労き裂が集中しやすい。
- (4) 板組み毎に内在きずの位置が異なり、これがき裂の発生率に大きく影響する。FF, WF の板組みのき裂発生率は WW の 3 倍近くに達している。
- (5) 丸ピアでは部材組み立て精度上の理由から固有内在きずの存在する可能性が角柱に比べ格段に大きい。
- (6) 隅角部の疲労強度を明確にするための検討が続けられているが、実橋においては内在きずの範囲が整理しきれておらず、その影響が大きいことから強度の推定が難しい。

本報告では鋼製橋脚隅角部のき裂損傷パターンについて板組み、固有内在きずに着目してまとめたが、疲労損傷の補修補強において、疲労強度、発生応力の現状値をしり、コントロールすることが必要であり、このために実橋の隅角部の応力測定、隅角部試験体の疲労载荷実験が続けられている。しかし、隅角部の疲労強度については確認できていない点が多い。この大きな原因として疲労強度はデルタゾーンを始めとする固有内在きずに影響されるが、その分布形状とき裂起点の予測が難しいこと、更に固有内在きずが残された隅角部では、板組みによらず低い応力でき裂が発生しており、寿命と応力に相関を見だし難いという問題がある。

内在きずから進展したき裂は表面に表れた時点では内部で広範囲に広がっている。き裂の補修においては疲労き裂自身、あるいはその先端を除去することは当然としても、固有内在きずについても対処を検討する必要がある。補修補強法を決定する際には板組みの違いによる未溶着部の位置とき裂の分布を

的確に把握することが必要であり、本研究で使用したような損傷データベースによるパターン化が有効と考えられている。

謝辞：本報告は首都高速道路の緊急点検の結果をもとに分析を行ったもので、データの提供、整理に協力を頂いた首都高速道路公団、首都高速道路技術センター、橋梁メーカーの方々に感謝の意を表します。また、1999年当時、隅角部の疲労き裂に対し関係者の問題意識を喚起し、先導して頂いた首都公団の青木、桑野、下里氏、その後の調査、補修補強検討に尽力頂いた関係者の方々に敬意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 2) J.W.Fisher 著，阿部英彦，三木千壽監訳：鋼橋の疲労と破壊，建設図書
- 3) 鋼構造物接合資料集成(3) (溶接接合 (鋼橋)) 技報堂出版，1983.5
- 4) 森河久，下里哲弘，三木千壽，市川篤：矩形断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労き裂の調査と応急対策，土木学会論文集，No.703/ I -59，pp.177-183，2002. 4

(2002. 11. 29受付)

BEAM-COLUMN CONNECTION DETAILS OF STEEL PIER AND THEIR FATIGUE DAMAGE MODE

Chitoshi MIKI, Yasuaki HIRABAYASHI, Hideo TOKIDA, Takuyo KONISHI and Yasutoshi YAGINUMA

Fatigue cracks were found in beam-column connections of steel piers in the Metropolitan Expressway, and examination of retrofitting measures for these cracks has been proceeded. Total of 566 out of 2200 columns are found to have cracks in the connections. Detailed investigations of the damaged piers including opening of damaged weld bead, investigation of fabrication sequence were carried out with the piers which had comparatively large cracks. Starting point of cracks were turned out to be characteristic internal flaw which contain un-welded cavity and metal-touch zone in most cases. A damage database was constructed based on these investigations and fatigue damage modes of the steel pier are examined based on it.