

極厚SM570材を用いた小半径 曲げ加工部を有する橋脚の製作

佐々木 昇¹⁾ 鴨井 祥昭²⁾ 石川 貴雄³⁾

近年、景観への配慮のために、鋼部材の断面形状に曲線を用いることが多く、製作のために技術的検討を必要とする機会が増えている。当社でも東海北陸自動車道荏安賀高架橋北（鋼上部工）工事において、柱部コーナーが曲面となった断面においてフランジおよび腹板に板厚80mm、材質SM570の鋼材を使用した。板厚80mmの鋼板の曲げ加工および溶接施工は当社の橋梁の施工実績において初めての経験であった。

本稿は、当該工事の橋脚製作における板の曲げ加工部の溶接施工などの検討事項について報告するものである。

はじめに

荏安賀高架橋北（鋼上部工）工事は、日本道路公団名古屋建設局より発注され、駒井鉄工・高田機工共同企業体にて受注した工事である。図-1に本工事の位置図を示す。本工事の施工橋脚は、図-2に示すP13橋脚からP18橋脚の合計6基である。そのうち、P16、P17、P18橋脚を駒井鉄工が製作した。

この3橋脚のうちP17橋脚は、基本設計において隅角部で75mm（SM570材）の板厚を有していた。さらに、詳細設計において活荷重の見直しを行った結果、最大板厚が80mm（SM570材）となった。これは、道路橋示方書¹⁾（以下、道示と示す）に規定されている最大板厚50mmを超えるものである。なお、P16、P18は柱部で使用板厚が50mmとなった。

また、本工事の橋脚は柱部コーナーに外半径300Rの曲げ加工を施す計画であった。外半径300Rの曲げ加工は、設計当時（平成8年10月）の道示で許される最小外半径 $R=16t=1280\text{mm}$ （ t ：曲げ板厚80mm）より非常に小さいため、冷間曲げ加工による靱性が確保できるか検討する必要があった。新日本製鐵株式会社（以下、新日鐵）において

$R/t=300/80=3.75$ 相当の鋼材外表面に生じる平均曲げ歪みをあたえて、SR（応力除去焼鈍）処理を行うことによる靱性の改善効果の検討を行ったが、良好な結果が得られなかった。このため、新日鐵で保証できる最小外半径 $R/t=6$ を満足するように柱部コーナーの外半径を $R=6 \times 80=480\text{mm}$ と設計変更した。他のP16、P18は $R=6 \times 50=300\text{mm}$ で施工した。



図-1 位置図

1) 品質保証室 2) 大阪工場橋梁部橋梁技術課 3) 橋梁設計部東京設計課副課長

平面図

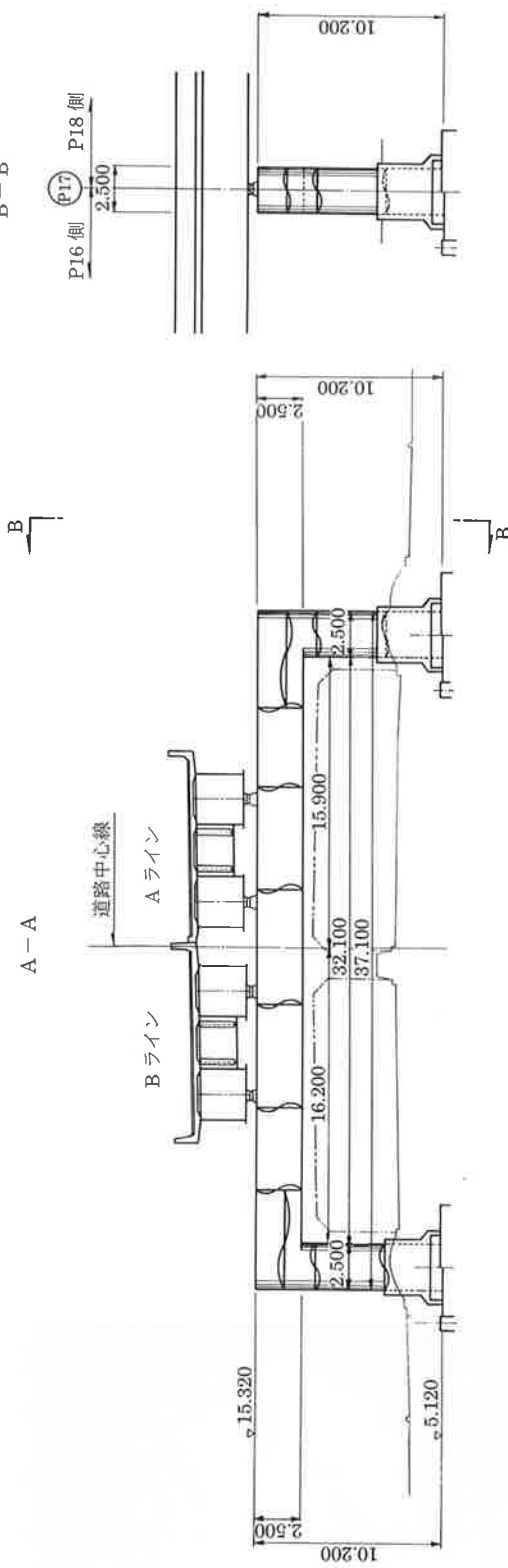
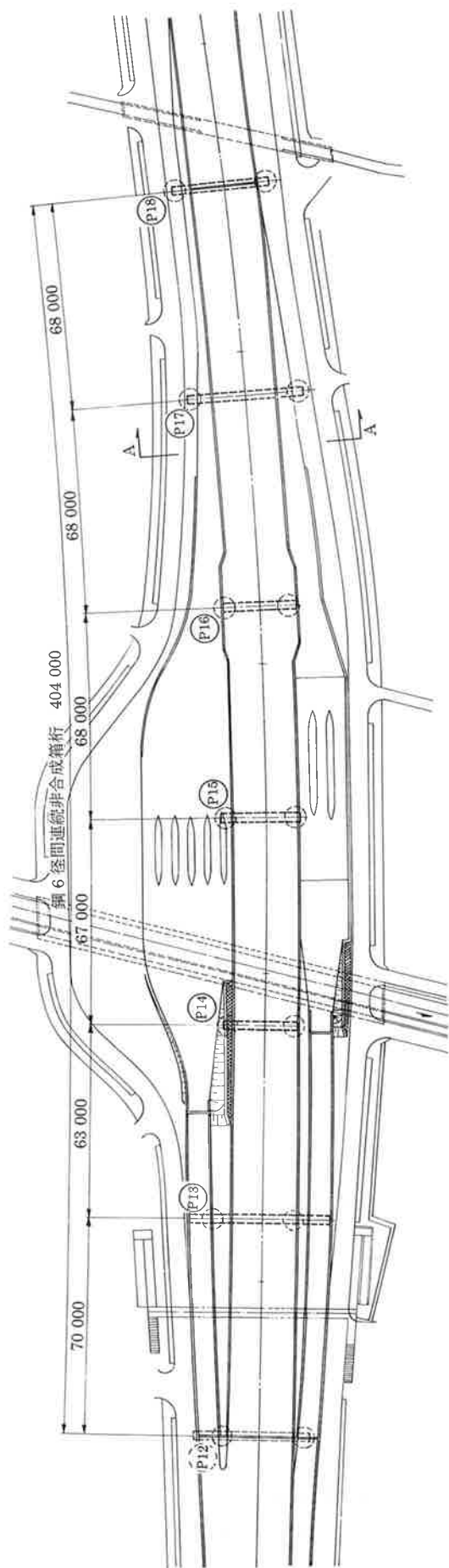


図-2 一断面

施工試験は、はじめに開先形状選定試験を行った。開先形状選定試験は板厚80mmの鋼板の溶接変形、溶接作業性に対する問題点を見つけ、開先形状を決めるために行った。次に工場溶接施工試験としてy形溶接割れ試験、最高硬さ試験、突合せ溶接試験を行い、供試鋼材の溶接性の確認を行った。最後に模型試験として橋脚の柱部コーナーの現場溶接を想定した試験体を作成して曲げ加工部の溶接が所定の品質を確保していることを確認した。

1. 施工試験

1.1 開先形状選定試験

(1) 試験概要

開先形状選定試験体の形状を図-3に示す。試験は、工場突合せ溶接、現場横向溶接、現場立向溶接について行った。溶接方法および溶接条件を表-1に、開先形状を図-4に示す。溶接施工性と溶接変形の確認を目的としたため、試験体の材質は実施工で使用する材質よりも低強度の材質であるSM400Aを用いた。初回試験では当社の社内標準による開先形状の試験体で行うこととした。初回試験結果において、溶接施工性に問題があるか、また変形が過大な場合には、開先形状を変更した試験体で再試験を行うこととした。開先形状選定試験状況を写真-1に示す。

(2) 試験結果

工場突合せ溶接において当社の社内標準は適用範囲が50mmまでとなっていた。板厚80mmでの開先角度、開先深さの比率を基に工場突合せ溶接の初回試験の開先形状を図-4のような両面開先とした。初回試験体は、角変形が図-5に示す角度 δ で

0.046radであり表方向に発生した。そのため、開先形状を変更して再試験を繰り返し行った結果、図-4に示す表側の開先深さを27mmとした開先形状の試験体の角変形が0.022radと最も少なかった。この試験体の開先形状は、表裏の開先深さの比率が3:7程度となる。この結果は、参考文献²⁾が

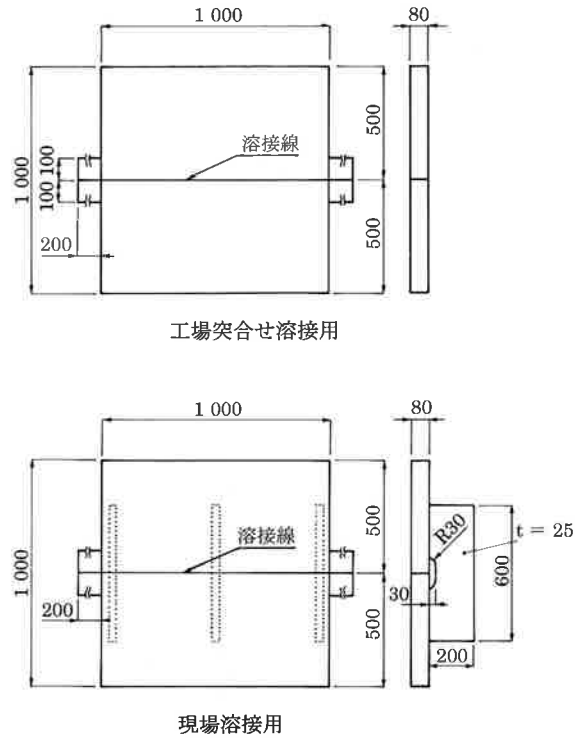
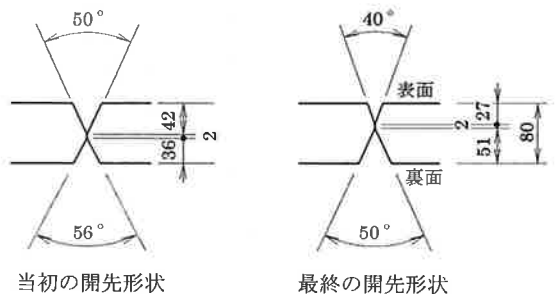
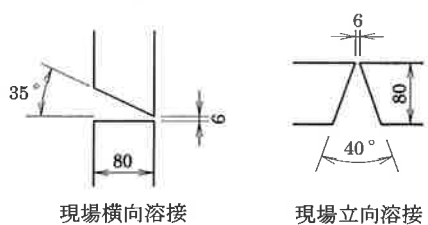


図-3 開先形状選定試験体形状



(a) 工場突合せ溶接開先形状



(b) 現場溶接開先形状



写真-1 開先形状選定試験

図-4 溶接開先形状

表-1 溶接方法および溶接条件

溶接方法		層	溶接材料 (裏当材)	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	
工場突合溶接	サブマージアーク溶接	表	MF - 38A/US - 36	640	34 ~ 37	40	
		2以降		640 ~ 660	33 ~ 38	30 ~ 50	
		裏		1	660	33 ~ 36	30
		2以降		640 ~ 660	33 ~ 38	30 ~ 50	
現場横向溶接	炭酸ガスシールドアーク溶接片面裏波溶接	1	SF - 1(FBB - 3T)	160	24	15	
		2以降	YM - 26	220 ~ 330	30 ~ 38	17 ~ 42	
現場立向溶接	炭酸ガスシールドアーク溶接片面裏波溶接	1	SF - 1	160	24	15	
		2以降	(FBB - 3T)	220 ~ 330	30 ~ 38	17 ~ 42	

示す板厚30mm以上であれば両面の開先深さの裏側を表側より深くし、開先面積についても板厚40mm以上であるなら表側を小さく裏側を大きくするのが角変形を少なくするというものと一致した。また、この程度の溶接変形ならば、溶接を行う時に逆歪みやウエイトによって調整し、角変形がほぼ0に近い施工が可能であると考えられた。また、加熱矯正を行ってもこの程度の角変形であれば矯正可能であることが確かめられていることから、工場突合溶接の開先形状は図-4(a)に示す最終の開先形状とした。

現場溶接についての試験では、角変形が横向0.018rad、立向0.028radであった。現場溶接により角変形が発生した場合には、加熱矯正を行うことになる。しかし、現場溶接を行う段階では、溶接線周辺の拘束により工場で行う平板での突合せ溶接ほど加熱矯正の効果に期待できない。このため、角変形を減少できるよう開先角度を狭める検討をした。しかし、立向き、横向き溶接ともに現在使用している溶接機器では、溶接施工性を考慮

するとこれ以上開先角度を狭めることは無理であると判断された。したがって、開先形状は図-4(b)に示す社内標準を採用し、角変形の対策については拘束治具により抑える方法を採用した。

1.2 工場溶接施工試験

供試鋼材の溶接性および工場製作での突合せ溶接の適正を確認するため、工場溶接施工試験を行った。供試鋼材は、曲げと予熱に対する仕様を満たすために新日鐵製の強曲げ加工用予熱低減鋼60キロ級高張力鋼板 (SM570Q-H-VE20-EX)の板厚80mmとした。この供試鋼材の記号説明、および化学成分を表-2に示す。

(1) y形溶接割れ試験

y形溶接割れ試験(JIS Z 3158)を試験体温度5℃、25℃、50℃、100℃で行った。結果は各温度とも表面割れ、断面割れ、およびルート割れは認められなかった。y形溶接割れ試験状況を写真-2に示す。

(2) 最高硬さ試験

試験体温度5℃でのy形溶接割れ試験結果が良好であるので、同条件で溶接熱影響部の最高硬さ



図-5 角変形δ

表-2 供試鋼材の仕様

SM570Q - H - VE20 - EX (新日鐵仕様)

- 降伏点が最小で 450(N/mm²) 以上
その他引張・衝撃試験が JIS G 3106 SM570Q 通り
- 化学成分中の窒素が最大で 0.006(%) 以下
吸収エネルギーが最小で 200(J) 以上 (シャルピー方向 C)
- 割れ感受性組成 (P_{CM}) が最大で 0.21(%) 以下

化学成分												(%)	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	B	N	Ceq	P _{CM}	
0.7	0.24	1.24	.005	0	.38	.23	.25	.04	ppm 10	ppm 37	.41	.18	



写真-2 y形割れ溶接試験

試験(JIS Z 3101)を行った。試験結果の342HV10は、道示の許容値370HV以下を満たしている。

(3) 突合せ溶接試験

工場での突合せ溶接継手の機械的性質を確認するために、1.1項で選定した開先形状で突合せ溶接試験を行った。図-6に突合せ溶接試験体の形状を、表-3に溶接材料および溶接条件を示す。溶接方法は、サブマージアーク溶接と曲げ加工部で採用する炭酸ガスシールドアーク溶接の2種類の試験を行った。

予熱温度は、予熱低減鋼であり、y形溶接割れ試験および最高硬さ試験の結果より、予熱なし

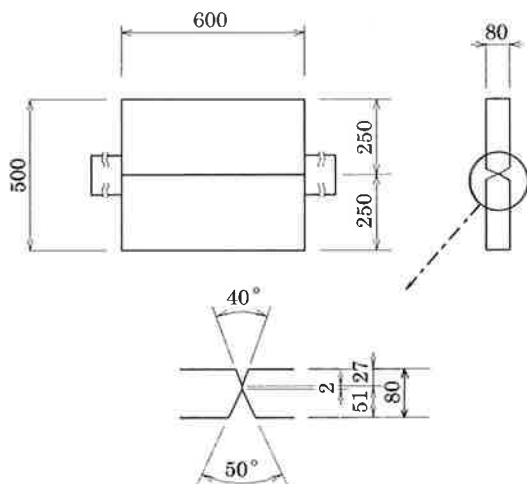


図-6 突合せ溶接試験試験体形状

(ただし、気温5℃以上の場合)での施工が可能と考えられた。したがって、突合せ溶接施工試験を予熱を行わず室温(5℃)で行うこととした。写真-3に突合せ溶接施工試験の状況を示す。

試験結果は、表-4に示すとおり、各試験項目とも良好な結果が得られた。また、超音波探傷試験の結果、合格基準の2類以上を満足することが確認された。

試験の結果、予熱低減鋼を使用することにより、予熱なしでの施工が可能であることが確認された。また、開先形状の変更による溶接欠陥発生などの溶接施工性についても問題ないことが確認された。

1.3 模型試験

試験の手順を図-7に示す。供試鋼材は、工場溶接施工試験で使用したものと同材質の鋼材を使用した。板厚80mm、長さ3100mm、幅1700mmの供試鋼材を外半径6tの曲げ加工し、ガス切断により3分割して、そのうち一つを曲げ加工部破壊試験の

表-3 溶接材料および溶接条件

溶接方法・溶接材料	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)
サブマージアーク溶接 MF-38A/US-49	条件は開先形状選定試験と同様		
炭酸ガスシールドアーク溶接 YM-60C	250	35	10 ~ 15



写真-3 突合せ溶接試験状況

表-4 突合せ溶接試験結果

溶接試験種類	引張試験 (N/mm ²)		側曲げ試験		衝撃試験 (J)				
	基準値	試験結果	基準値	試験結果	温度	基準値	試験結果 (3個平均値)		
突合せ溶接試験	サブマージアーク溶接 炭酸ガスシールドアーク溶接	570以上	650	割れの ないこと	無欠陥	-5℃	47以上	溶着金属	60.5
		656	無欠陥					熱影響部	262.0
		687	無欠陥					溶着金属	92.2
		687	無欠陥					熱影響部	252.0

ために使用した。他2つは現場溶接部の開先加工を行った後に図-8に示す試験体を組立て、溶接を行った。試験体は、曲げ加工部を含んだ実物柱部の実寸大で長さは溶接線を中心に約2 mとして、柱部断面を約4分割した程度のものでした。

(1) 供試鋼材の確認

曲げ加工した後の供試鋼材の3分の1を切断し、冷間曲げ加工後の鋼材の機械的性質を確認した。

表-5、表-6および図-9、に曲げ加工前後の破壊試験の結果を示す。引張強さ、伸びについては仕様から若干外れるものの、吸収エネルギーについては減少量も少なく十分な値であることが確認できた。

(2) 溶接条件

溶接方法は、炭酸ガスシールドアーク溶接の片面裏波溶接とし、予熱を行わず、室温(15℃)で

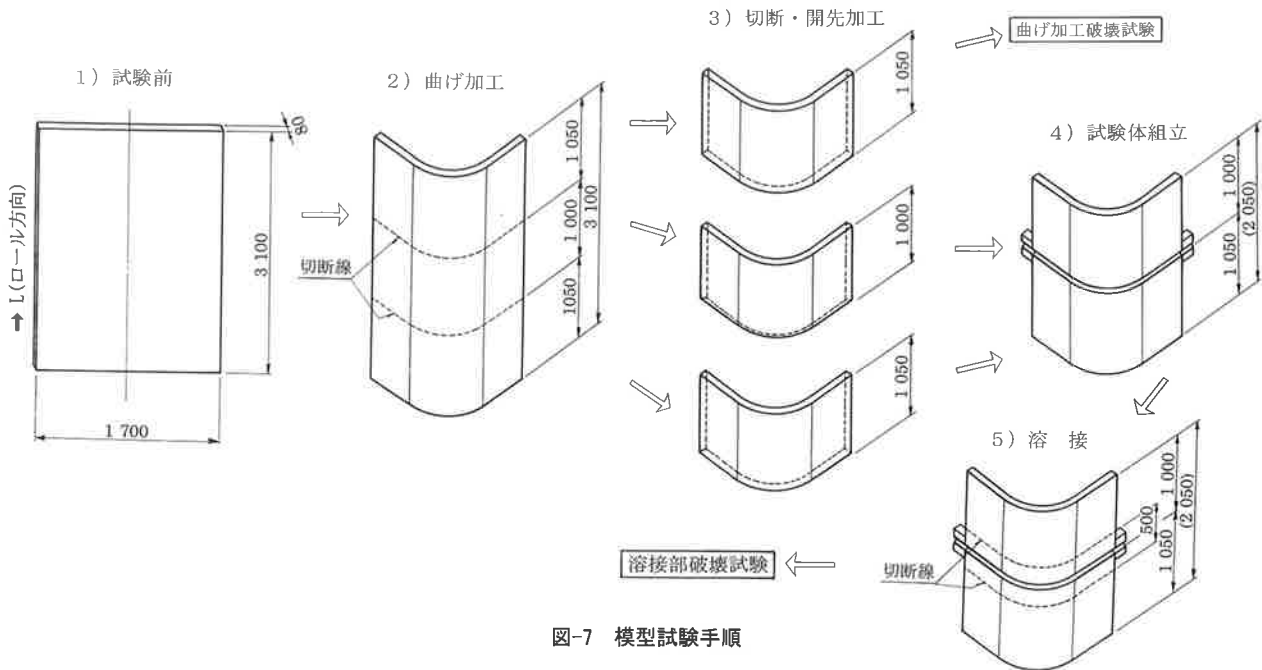


図-7 模型試験手順

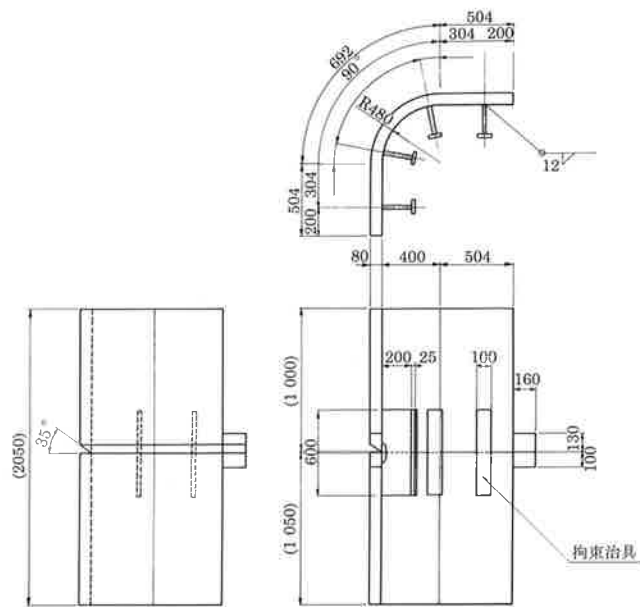
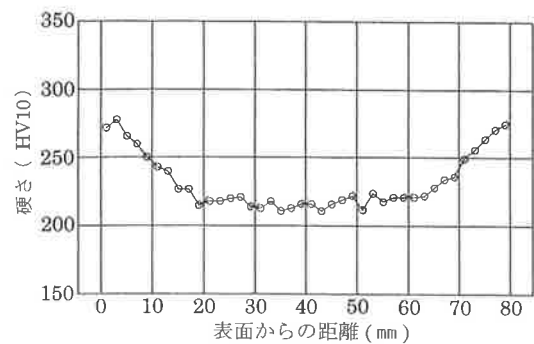
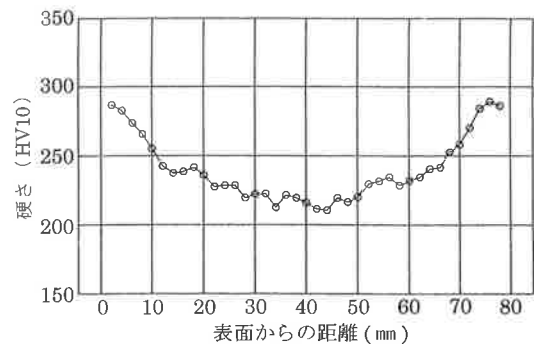


図-8 模型試験試験体形状



(a) 曲げ加工前



(b) 曲げ加工後

図-9 曲げ加工前後の断面硬さ分布

表-5 供試鋼材引張試験結果

板厚 (mm)	試験片	位置	方向	曲げ加工前			曲げ加工後		
				降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
80	JIS4号	表面 近傍	L	657	722	26	737	777	19
				653	719	26	718	773	19
		t/4	L	591	674	27	679	737	20
				592	673	27	689	739	19
仕様		t/4	L	≥ 450	570 - 720	≥ 20			

表-6 衝撃試験結果

板厚 (mm)	試験片	位置	方向	温度 (°C)	吸収エネルギー (J)							
					曲げ加工前				曲げ加工後			
					個々		平均		個々		平均	
80	JIS4号	t/4	L	-5	299	309	289	299	286	292	293	290
仕様					≥ 200							

試験を行った。溶接材料を表-7に、開先形状を図-10に示す。

(3) 試験結果

1) 溶接試験

溶接完了後の試験体の曲げ加工部から溶接部の引張試験、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験およびマクロ試験の試験片を採取した。

引張試験および側曲げ試験は試験片を2体採取し、シャルピー試験片は、鋼板の表裏からそれぞれ板厚の4分の1の深さで、溶着金属中央、ボンド部、熱影響部中央、熱影響部境界の4箇所を採取した。結果をそれぞれ表-8、表-9に示す。

試験結果は、引張試験が最小650N/mm²(規定値570N/mm²以上)、シャルピー衝撃試験では最

表-7 溶接材料および溶接条件

溶接方法	姿勢	溶接材料 (裏当材)
炭酸ガスアーク溶接	横向	1層 SF-60(FBB-3T)
片面裏波溶接		2層以降 MG-60

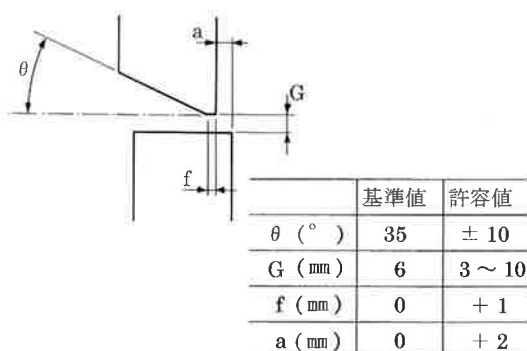


図-10 溶接材料および開先形状

小119J(規定値47J以上)と、道示の判定基準を満たす結果が得られた。また、側曲げ試験結果も亀裂はなく良好な結果であった。

溶接部のマクロ試験を行い、硬さ分布を計測した。写真-4にマクロ試験片を、図-11に硬さ分布の結果を示す。鋼板の裏側表面より2mm深さのボンド部で最大294HV10が計測された。この硬さは曲げ加工前に比べると約20HV10硬くなっているが、道示で規定されている溶接部最高硬さ370HVを満たしている。

なお、超音波探傷試験の結果、合格基準の2類以上を満足することは確認された。

表-8 溶接部引張試験および側曲げ試験結果

試験片	引張試験 (N/mm ²)		側曲げ試験	
	基準値	試験結果	基準値	試験結果
No. 1	570 以上	650	割れの	無欠陥
No. 2		656	ないこと	無欠陥

表-9 溶接部衝撃試験結果

試験温度	採取位置	吸収エネルギー (J)				
		1	2	3	平均	規定
-5 °C	UD	149	149	149	149	47
	UB	244	216	216	225	
	UH	201	206	206	204	
	UM	201	113	226	180	
	LD	149	104	104	119	
	LB	216	211	158	195	
	LH	254	249	249	251	
	LM	135	149	144	143	

補足) 試験片採取位置を示す記号

U : 表から t/4 B : ボンド部
L : 裏から t/4 H : 熱影響部中央
D : 溶着金属中央 M : 熱影響部境界

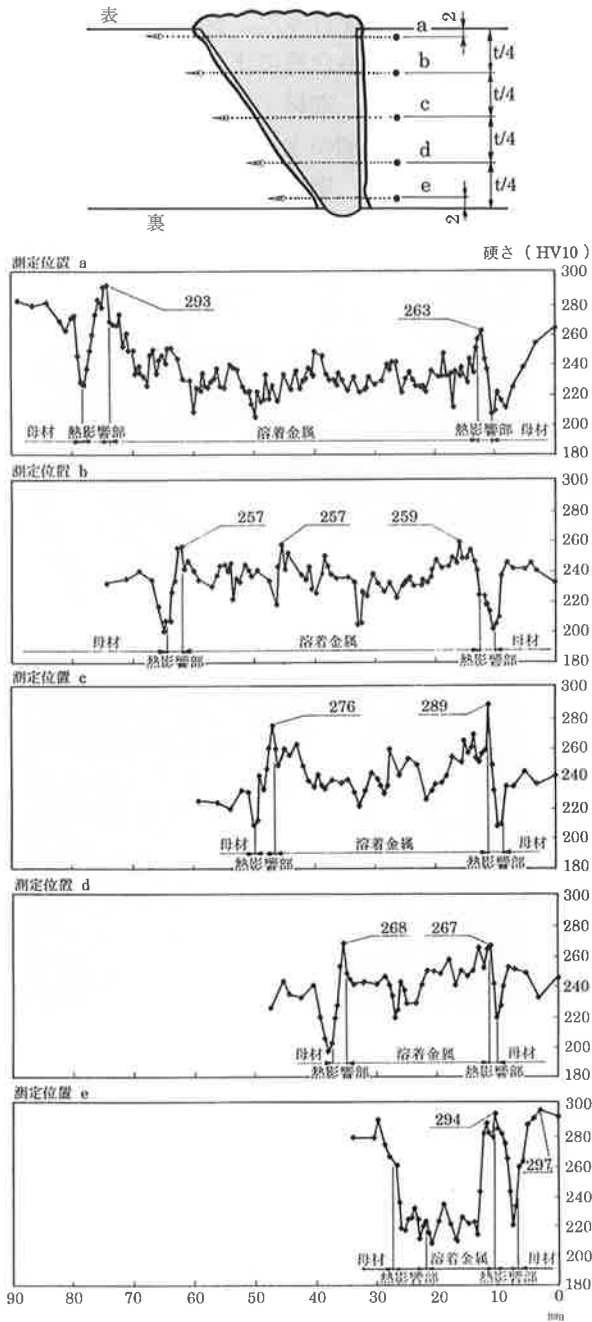


図-11 硬さ分布

2) 変形試験

試験体の変形量を計測するための計測点を図-13に示す。

①横収縮量

横収縮を計測した結果、標点距離980mm, 280mmで差がなく、平均が約1.6mmであり、最大がどちらの標点距離も2.6mmという結果であった。実際の施工では溶接による縮み代の設定を2mmとすればよいと考えられる。横収縮量計測結果を図-12に示す。

②角変形

角変形計測の結果を図-13に示す。変形量は最大で評点距離 1980mmで2.4mmであった。折れに関しては拘束治具の影響が大きいと考えられる。実際の施工では縦リブの配置も含めて、試験体と同じ程度の間隔で拘束治具を取付ければ良いと考えられる。

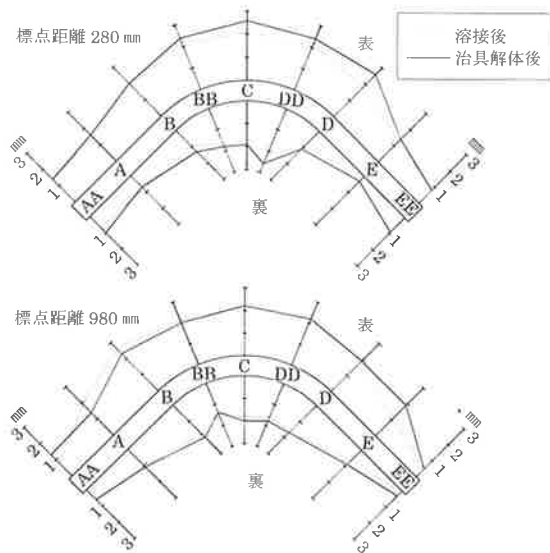


図-12 横収縮量

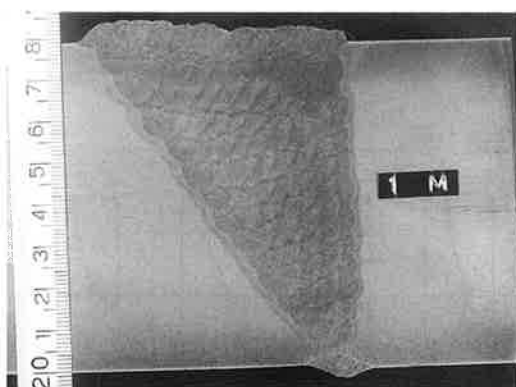


写真-4 マクロ試験片

2. 製作について

(1) 材 料

P16, P17およびP18橋脚では、板厚50mm以上の鋼板を多く使用している。前記施工試験において良好な結果が得られたことから、50mm以上の鋼板にはSM570Q-H-EX(新日鐵製)仕様の鋼板を用い、さらに曲げを施す鋼板にはVE-20仕様を付加した。

(2) R部の加工

R部の曲げ加工精度は、部材、仮組立の精度および現場施工に大きく影響するため高い精度管理を行った。作業工程は、図-14に示す。

曲げ加工は、3000tonおよび5000tonプレスで行った。曲げ加工後、曲げによる伸びやねじれが起因する寸法誤差を調整するため度型を使用し、R止まりや基準線の修正を行った。その後、二次切断および現場溶接開先加工を行いR部の精度を確保した。写真-5に曲げ加工状況、写真-6に曲げ加工部の開先加工状況、写真-7に曲げ加工部の野書状況の写真を示す。

(3) 組立・溶接・仮組立

大組立は、断面寸法に留意し慎重に行った。特に現場溶接継手部の断面形状を確保するため、図-15に示すような、形状保持材を継手付近に取付けた。溶接は、フランジと腹板のシーム溶接を先に行い、シーム溶接による収縮後、シーム付近のダイヤフラムの溶接を行い変形や溶接割れを防止した。写真-8、写真-9に大組立およびシーム溶接の状況写真を示す。

溶接完了後、歪矯正を行い、柱の鉛直度、部材寸法および現場溶接部の諸寸法を確保するため部

材端面の機械切削を行った。現場溶接部のルートギャップを確保するために下端面をガス切断で開先加工を行った後、部材下端のメタルタッチ部を先に切削し、反対側の上端面を切削し部材長を確保した。仮組立は、現場溶接部ルートギャップを確保し、さらに全体の寸法を管理しながら行った。



写真-5 曲げ加工



写真-6 開先加工

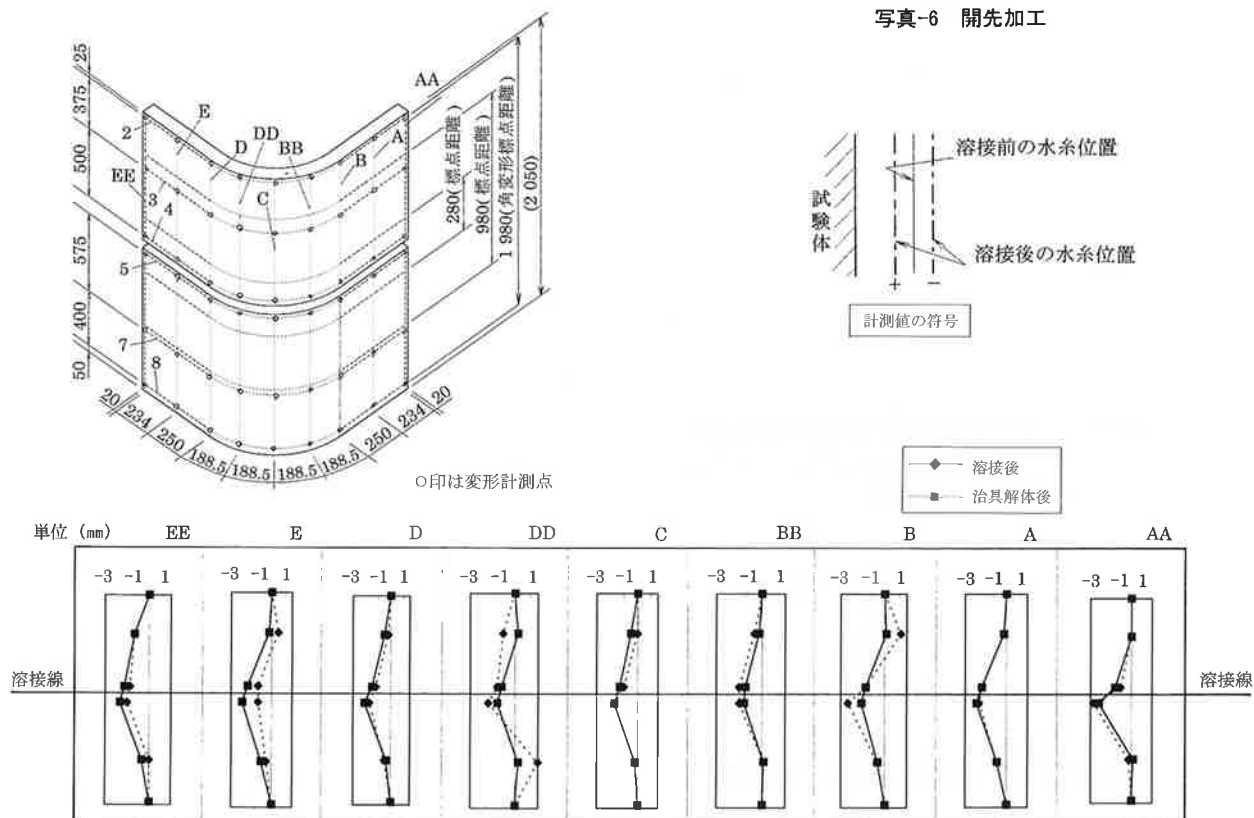


図-13 角変形量



写真-7 けがき

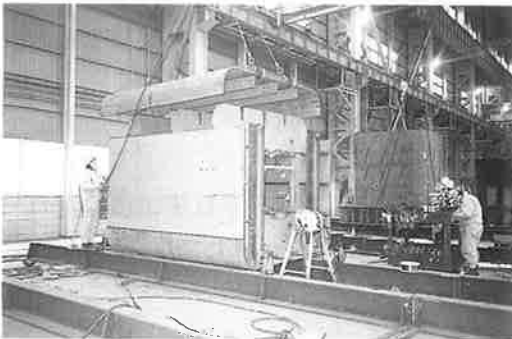


写真-8 大組立

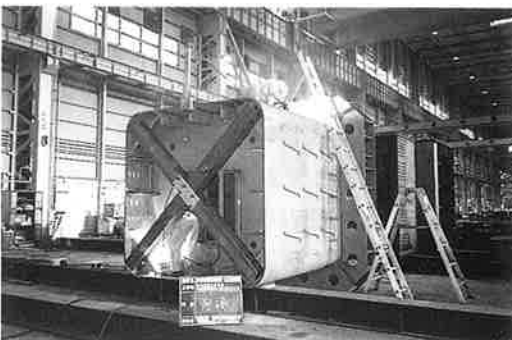


写真-9 シームの溶接

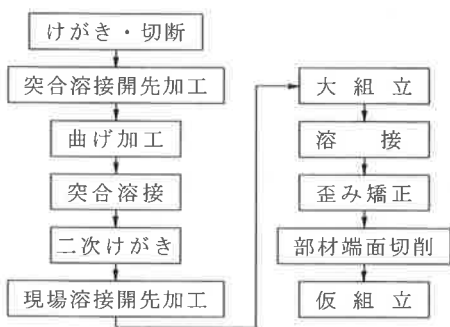


図-14 作業工程

あとがき

本工事の橋脚は、道示で許される最小内半径15tより非常に小さい外半径6tであるため、曲げ加工部の靱性が確保できるか懸念された。しかし、

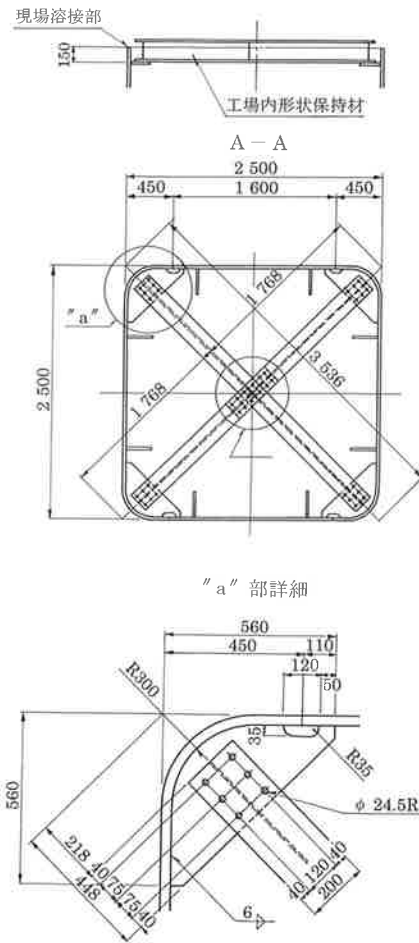


図-15 形状保持材の取付

施工試験で靱性が確保されていることを確認でき、かつ板厚80mmの極厚の溶接による変形量データを取ることができた。

また、本橋脚での製作方法が良好な結果であったことから、今後、同様の極厚の製品の製作でも適用できることが確認できた。

最後に、本工事の橋脚の製作にあたり、施工試験のデータ採取などの多大なご協力を頂いた新日本製鐵株式会社の関係者に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I 共通編, II 鋼橋編), 1994.2.
- 2) 神近亮一：「溶接歪みとその防止対策」, 溶接技術, 1996.5～7.