

ウェブに腐食欠損を有する古桁の耐荷力試験

The Ultimate Strength Test for Aged Steel Girders with Corrosion Loss on Web.

清水 功 雄* 佐藤 徹** 林 兼 生***
Isao SHIMIZU Tohru SATOH Kaneo HAYASHI

Summary

The tested plate girder had rivet joints, and had corrosion loss on the bottom web throughout the span, due to continuous immersion in seawater for many years.

We examined the process of destruction and, by conducting a loading test, how the loss influenced the bearing strength of the plate girder.

We also investigated the nature and welded conditions of the steel members and the reliability of the corroded rivets as data for the maintenance of other contemporary aged steel girders.

This report outlines the test results.

1. まえがき

鋼桁の補強・補修工事の重要性は、近年特に注目されるところである。その設計にあたり、既設桁の耐荷力と材料の性質をできるだけ正確に把握する事が、安全上からも重要である。

鋼I桁のウェブが、腐食により大幅に断面欠損した事例はよく見かけるが、その計算による耐荷力の評価に関する報告は余りなされていないようである。

筆者らは、地盤沈下により桁位置が下がり、運河の干満によりくり返し汚れた海水中に入りし事で、I桁のウェブ下部が貫通孔を有するほど腐食したりベットI

桁を、架換工事を期に試験桁として入手した。

この昭和初期の震災復興時代に架設された鋼桁を用いて、材料の機械的性質や溶接性を調べることで、補修を行う場合の基礎資料を得た。さらに、腐食状態を観察するとともに、工場にて載荷試験を実施し、終極荷重を求める一方、ウェブの腐食断面に着目してヒズミ測定を行い、破壊に至るI桁のメカニズムを解こうとした。

本文では、載荷試験の結果までを報告する。

写真-1に撤去前の橋梁（沼海橋・東京都江東区内）の状況を示す。写真-2は撤去時の損傷状況である。サビにより層間はくりしている状況が解る。



写真-1 撤去前の状況



写真-2 撤去直後の桁の損傷状況

* 技術本部技術開発部付課長
 ** 千葉工場製造部生産技術課

*** 宮地建設工業(株)技術部技術一課

2. 試験桁の損傷状況

(1) 旧桁の寸法諸元

供用時の I 桁の諸元は、支間24.384m(80ft)、桁高は中央で1.841m (6 1/2 in)、支点上で1.473mである。斜角71°、15主桁からなる大幅員の橋梁で主要寸法を図-1に示す。

試験に用いた桁は、外側から3番目 (A桁) と4番目 (B桁) の2本である。A・B桁とも等断面であるが、斜角の影響で補剛材位置が半パネル分ずれており、載荷試験時に工夫を必要とした。旧桁の設計断面は図-2に示すように、カバープレートを用いたリベット構造である。

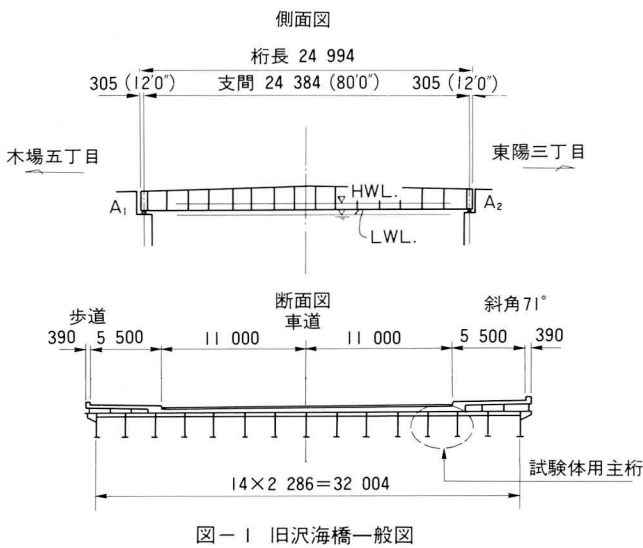


図-1 旧沢海橋一般図

(2) 損傷の状況

試験桁は海水により腐食した部分以外は、比較的健全である。上フランジとウェブ上部は塗膜がほとんど無いにもかかわらず、断面減少は見出せない。またリベットヘッドも良好な状態である。上フランジの断面を写真-3に示す。ここでは、I桁の下部に着目すると以下の様である。

(a) 下フランジ

下フランジの海水により腐食した断面を、さび落としのあとショットブラストした状況を写真-4に示す。さらにこの断面を写し取り、板厚の測定をしたものが図-3である。板厚の減少は、フランジの上面 (L型鋼)、下面 (カバープレート) とともに1.5mm~3.0mm程度である。この表面の腐食状況はアバタ状の腐食孔はなく、なめらかな断面減少になっている。この断面の状況は全長を通じて大差ない。

また板の接合面は良好な状況である。

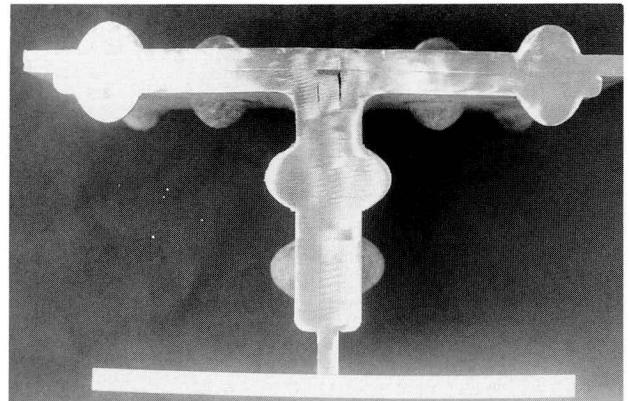


写真-3 上フランジ断面(ショットブラスト後)

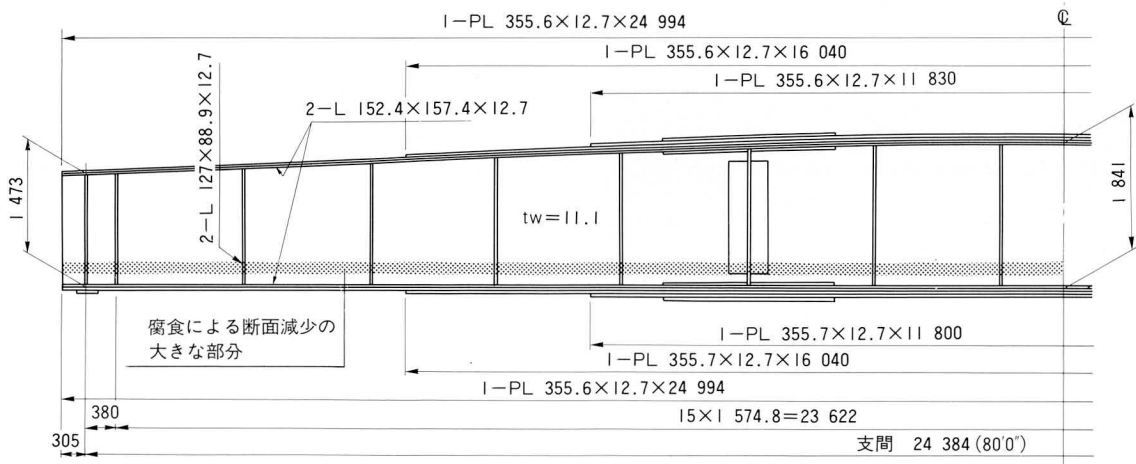


図-2 主桁寸法図

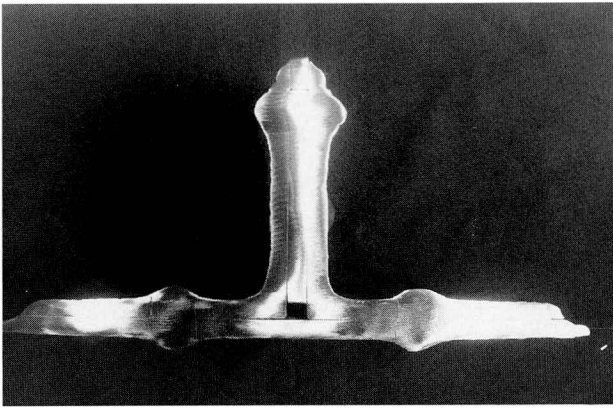


写真-4 下フランジ断面(ショットブラスト後)

剛材間のパネルは全長にわたり、腐食孔が大きく貫通しており、残っている部分も1~2mmの板厚を残す程度まで断面減少している。さらに、板の表裏とも凹凸の激しいアバタ状である。

この状況では、通常のプレートガーダーのせん断力の機構にはなっていないはずである。断面の一部を写真-6に、スケッチしたものを図-4に示す。下フランジのL型鋼から上方に10cm前後の部分で激しく腐食している様子がわかる。

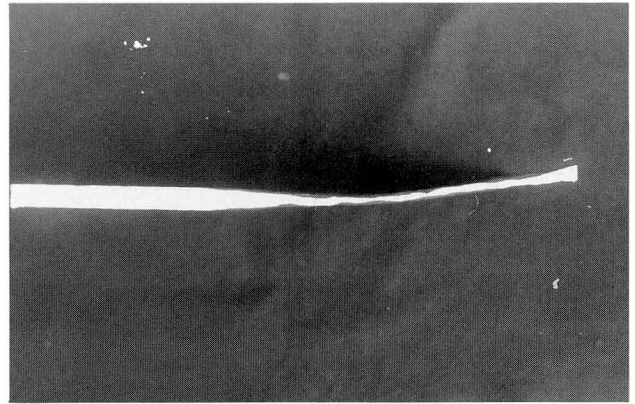


写真-6 ウェブ腐食部の断面

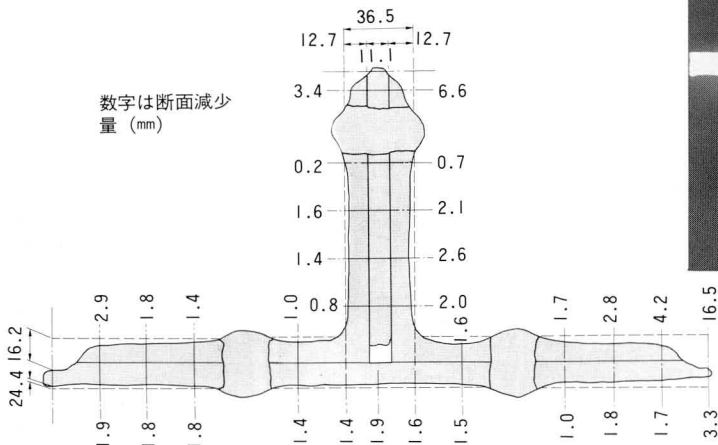


図-3 腐食による断面減少(下フランジ)

(b) ウェブ

腐食が最も著しかったのが、ウェブ下端のL型鋼の上約20cmである。写真-5に見るように、L型鋼の垂直補



写真-5 ウェブの腐食状況

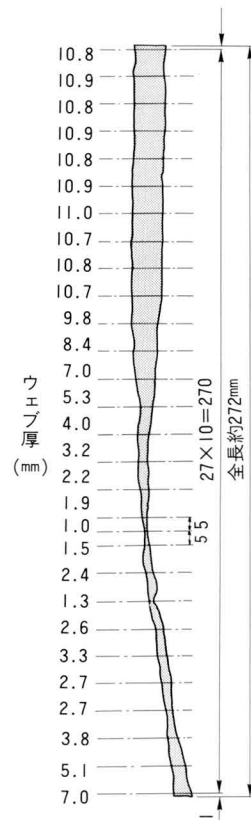


図-4 腐食による断面減少(ウェブ下部)

(c) 垂直補剛材

写真-7のように、補剛材（2-L127×88.9×12.7）のウェブ直角部分は下部で断面が無くなる程であるが、ウェブ付の辺は断面減少は2～3mmである。

(d) リベット

リベットヘッドは、写真-7のように花の咲いたようなサビの状態で、ハンマーによりほとんどヘッド部分が落ちる。サビ落しを行いショットブラスト後の状態を写真-4に示す。このように、リベットヘッドの部分はエッジに3mm、高さで5mm程かかっているにすぎない。

本橋の場合は、このような状況にもかかわらず、リベットのゆるみは発見できなかった。このように、リベット本来の支圧継手としての機能は、ヘッドの腐食にもかかわらず、特に危険はないようである。



写真-7 補剛材下部とリベットヘッドの腐食状況

(3) 使用鋼材の性質

使用鋼材は、L型鋼が八幡製鐵製として解っている他は、板材は不明であった。そこで、機械的強度試験と、化学分析により鋼材の性質を調べた。

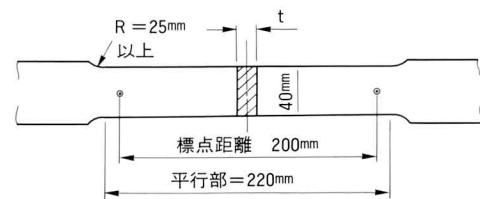
(a) 鋼材の機械的性質

比較的健全な部分のウェブと上フランジから採取した板材を試験片に加工して引張試験と衝撃試験を実施した。

素材の引張試験は、ウェブ（ $t = 11.1\text{mm}$ ）と上フランジ（ $t = 12.7\text{mm}$ ）について図-5の試験片によった。

試験結果は表-1に示すように、降伏点 $26.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 、引張強さ $40\sim 41\text{kg}/\text{cm}^2$ でJIS G 3101のSS41の規格 $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上、 $41\sim 52\text{kg}/\text{cm}^2$ 、伸び 17% 以上に比べて引張強さがやや下まわるもののほぼSS41に近く伸びも良好である。

衝撃試験は、 0°C について行った。試験結果は表-2のようであり、SS41の場合は規定はないが通常SM41の



ウェブ $t = 11.1\text{mm}$ ($7/16\text{in.}$)
フランジ $t = 12.7\text{mm}$ ($1/2\text{in.}$)

図-5 素材・引張試験片

表-1 引張試験結果

試験片記号	断面積 ($\text{mm} \times \text{mm} = \text{mm}^2$)	降伏点又は耐力		引張強さ		破断位置	伸び (%)
		(kg)	(kg/mm^2)	(kg)	(kg/mm^2)		
F	$12.7 \times 40.1 = 513.3$	13 700	26.7	20 550	40.0	B	29
W	$11.1 \times 40.1 = 449.1$	11 950	26.7	18 500	41.2	B	25
参考*	SS41 $t < 16$	25以上		41~52			17以上

F：フランジ W：ウェブ * JIS G 3101

表-2 衝撃試験結果

試験片記号	板厚 (mm)	試験温度 ($^\circ\text{C}$)	吸収エネルギー($\text{kg} \cdot \text{m}$)	
			各値	平均値
F	12.7	0	1.6	1.8
			1.8	
			1.4	
W	11.1	0	2.2	3.0
			4.5	
			2.2	

2.8は確保できるので、靱性はやや低い。

(b) 鋼材の化学成分の分析試験

試料はウェブ、フランジおよびL型鋼から各 $25 \times 50\text{mm}$ を採取した。分析する成分は主に溶接性を調べる目的から、C、Mn、P、Sの4成分とした。分析結果は表-3に示すように、参考値のSS41、SM41に比べて見ると、L型鋼のCが相当上まわっている他は溶接性に悪影響を与える要素はない。

表-3 化学成分分析結果

試料名	記号	分析成分			
		C %	Mn %	P %	S %
鋼材	F	0.18	0.43	0.011	0.028
	W	0.17	0.46	0.020	0.038
	L	0.32	0.65	0.020	0.034
参考	SS41	—	—	0.05以下	0.05以下
	SM41 A	0.23以下	0.57以上	0.04以下	0.04以下

3. 鋼材の溶接施工性

古桁の補修・補強では、ウェブへのスミ肉溶接を必要とする場合が多い。ここでは鋼材の溶接性を調べるため

に、最高硬さ試験により溶接熱影響部の硬さを測定し、溶接性を判定した。また十字すみ肉溶接・引張試験により、溶接部の強度を測定した。

(1) 最高硬さ試験

ウェブより採取した試験片に、低水素系溶接棒 (S-16) と特殊系溶接棒 (SM-50G) によりビードを引き図示の位置での最高硬さ (Hv) を測定したものを図-6、7に示す。この両図よりHvの分布を見ると、熱影響部のHv値が溶接金属部より高くなるような形状は示していない。

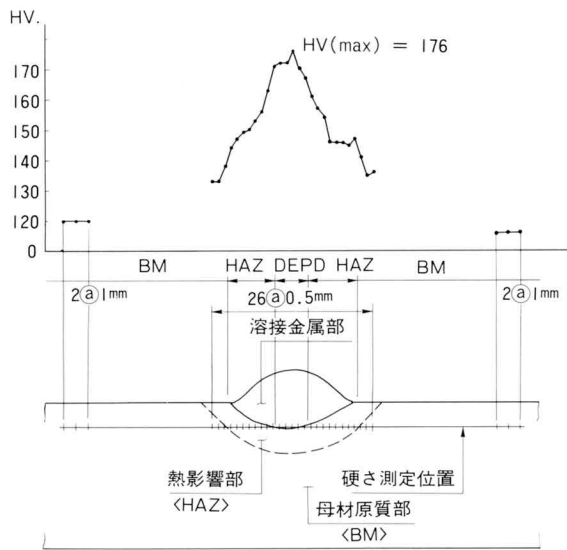


図-6 最高硬さ試験結果(低水素系)

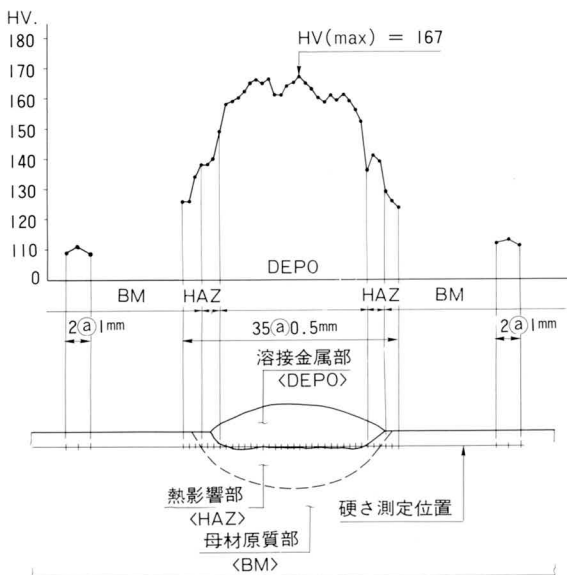


図-7 最高硬さ試験結果(特殊系)

これらの結果から、ウェブの鋼材の溶接性は低水素系溶接棒を用いる事により特に問題はない、と判断できる。

(2) 十字すみ肉溶接継手・引張試験

図-8の試験片により引張強度を測定した。試験は、古桁に新材 (S S 41) をすみ肉溶接する状態を想定し、図のAの材料を試験桁より採取した鋼材、Bを新材 (S S 41) とした。引張試験結果を表-4に示すように、低水素系溶接棒によるビードを機械仕上げした場合でも母材で破断した。このすみ肉溶接サイズは、いずれものど厚の合計が母材厚を上まわらない事から、すみ肉溶接による施工性は問題ないと言える。

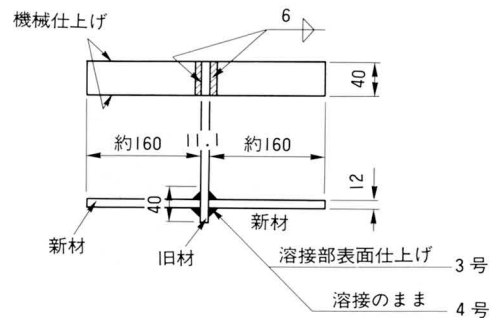


図-8 十字すみ肉溶接継手・引張試験片

表-4 十字すみ肉溶接・引張試験結果

試験片記号	脚長×長さ <mm×mm=mm ² >	最大荷重 <kg>	引張強さ <kg/mm ² >	破断位置	備考
S 1	7.8×40.0=312.0	*21 100	* 44.0	*母材	母材断面積480.0mm ²
S 2	8.1×40.0=324.0	*20 950	* 43.6	//	//
S 3	6.6×40.0=264.0	*20 950	* 43.6	//	(ビード・機械仕上げ)
S 4	7.2×40.0=288.0	*20 900	* 43.5	//	//
M 1	7.7×40.0=308.0	17 100	38.9	溶接部	
M 2	8.0×40.0=320.0	16 900	35.9	//	

4. 載荷試験

前述したような桁の損傷状況から、通常のプレートガーダーのように、フランジの局部座屈あるいはウェブの座屈により最終耐荷力を示すのではなく、別の破壊形状を示すであろう事が予測されたが、その荷重をどの程度に想定するかは予測がむずかしい。

筆者らは、フランジの状態と、補剛材がL型鋼でありラーメン構造的な挙動も合わせて考えられる事から、フランジ直応力で、降伏点2700kg/m²程度を想定し、荷重200tを一応の目安として以下の試験用治具を準備した。

(1) 供試体

(a) 支間の設定

前述したように、旧沢海橋は支間24.384m、斜角71°の並列桁橋である。主桁断面は3種類あり、歩道部、車道部および旧都電部（現在は車道）に分かれている。今回は車道部の主桁を用いた。

旧橋の解体時には、作業の時間的な制約と輸送上の安全性から、桁端近くで切断して吊上げた桁を、さらに両端1.5m程を切断し桁長20mとして工場へ搬入した。桁の吊上状況を写真-8に、また吊上直後の桁の腐食状況は写真-2に示した通り表面はボロボロの状態であった。

試験桁は、支間に100 t以上の反力が予想されるので、中央載荷点と端支間に溶接により補剛材を新設した。桁の状況から、支間18.327mとして、補剛材位置を決定した。また、中央載荷点は、中央パネルの局部座屈を起さないように約500mmの間隔で2点載荷とした。試験桁の諸寸法を図-9に示す。



写真-8 試験桁の吊上状況

(b) 測定位置

試験は主桁のフランジ直応力と、ウェブの挙動を主な着目事項としているので、フランジには1軸ゲージを外側に各2枚、ウェブは補剛した中央パネルの隣のパネルと、端部に近いパネルの表裏に各々3軸ゲージをはりひずみを計測した。

ゲージの貼付位置は、図-10のようになる。

特に、ウェブの下側の3軸ゲージ貼付位置は、腐食の進行した位置を選定した。このため板の凹凸が大きく、曲面による誤差が生じる事が予想されたが、表裏である程度キャンセルする事を期待した。これは、ウェブ下部の断面が極端に少いか、完全に孔になってしまっていることの影響をできるだけ測定しようと考えたからである。

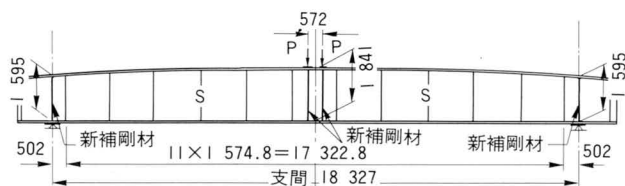


図-9 試験桁寸法図

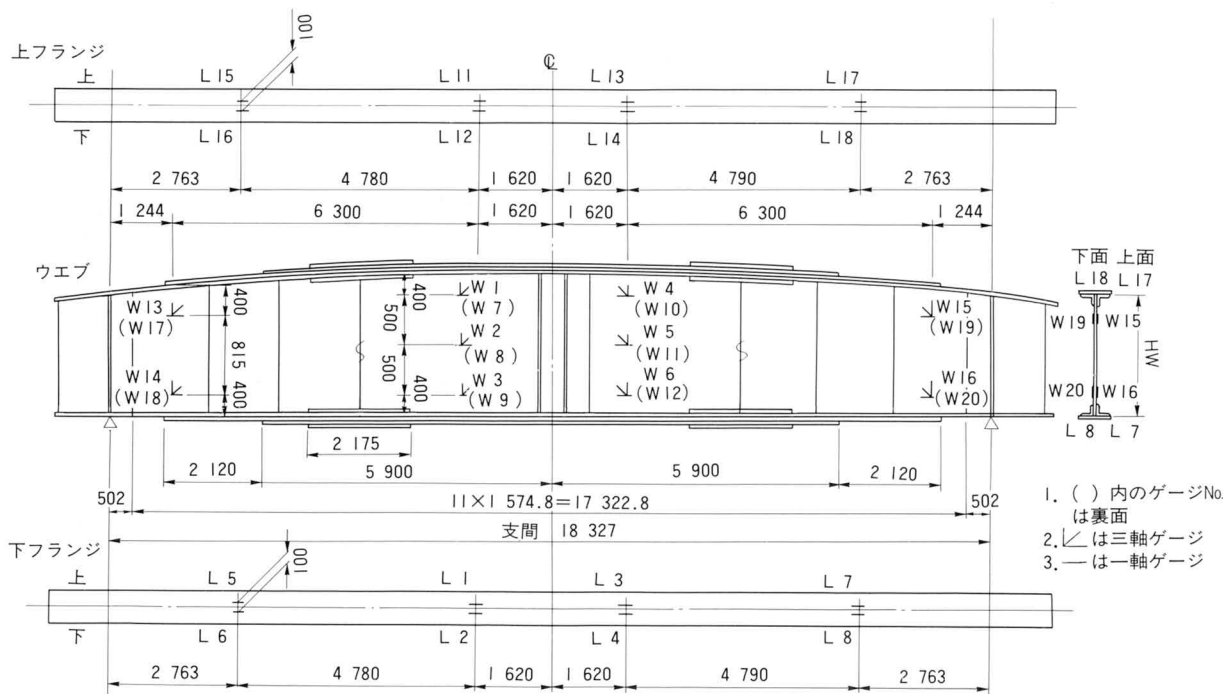


図-10 ひずみゲージ貼付位置

(2) 試験設備

載荷荷重200 t以上を想定した事で、試験は工場内のコンクリート床上に図-11のような横置の載荷治具を作り試験した。横置きにした事で、桁の横倒れ防止用フレームを十分に配置できたので、安全に試験できた。ここでの問題は、反力桁も荷重に応じてたわむことで、ジャッキのストロークが長くなるが、合計たわみ量100mm以下に対して、ストローク200mmを用いることで対応した。また、桁と架台間のセリにより初期値にもどりにくい心配があったが、初期のキャリブレーションで十分スムーズな動きを示し、測定に影響は生じなかった。

使用ジャッキは、200 t・ストローク200mm型2台を電動ポンプに連動させて用いた。ジャッキはあらかじめ、



写真-9 試験設備

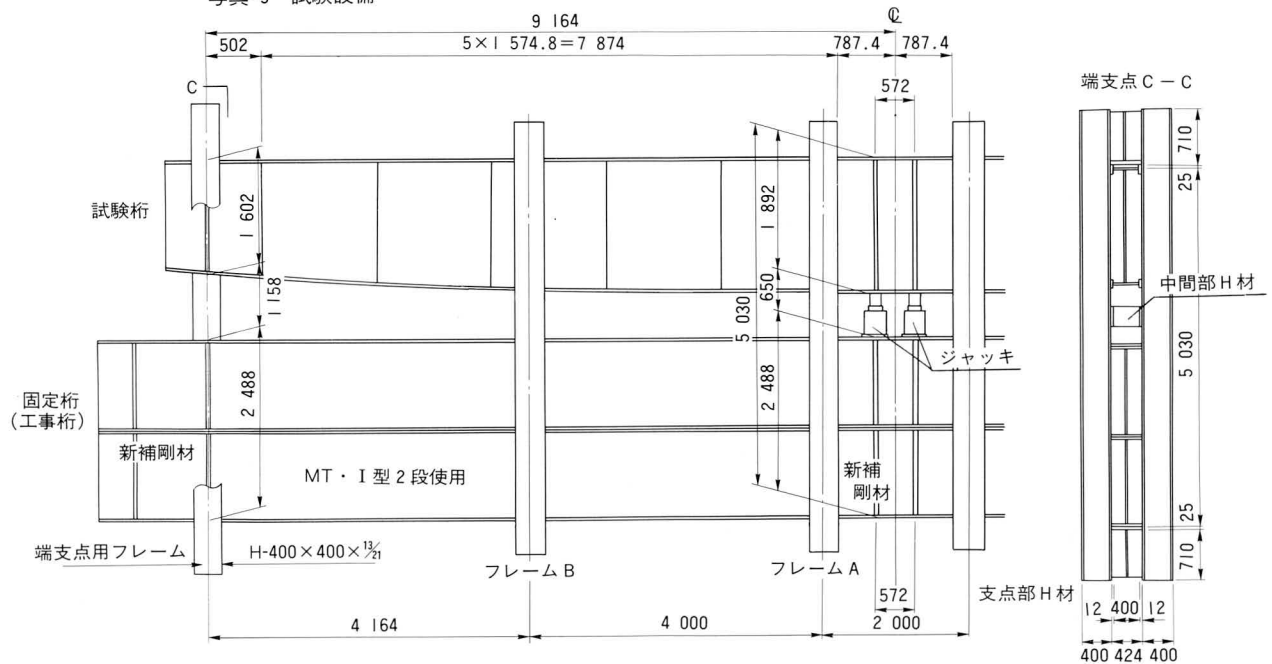


図-11 耐荷力試験設備図

アムスラーを用いてキャリブレーションを行いゲージの読みの誤差を確認した上で使用した。(写真-9)

(3) 試験の状況と結果

試験は、荷重を①0 t→20 t→0 t、②0 t→20 t→40 t→0 t、③0 t→20 t→40 t→60 t→0 tのくり返しを行いながら20 tずつ増やし荷重-ひずみの直線性と桁の状況を見ながら試験荷重を増加させた。

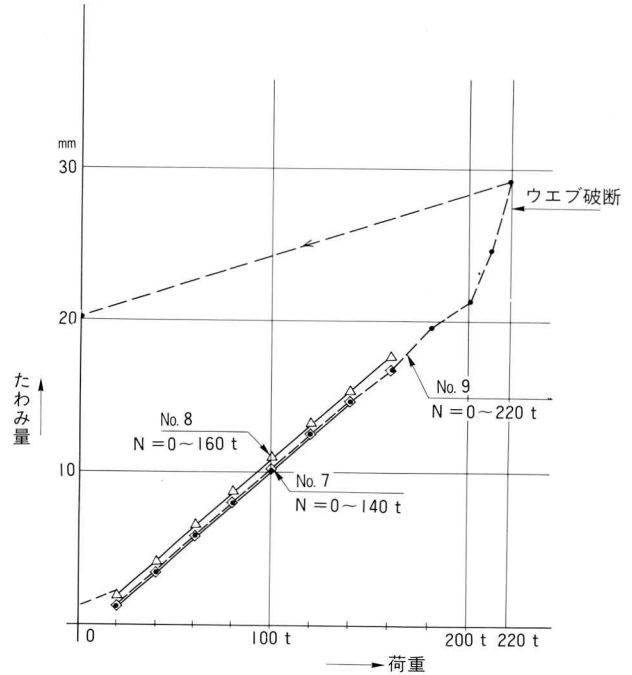


図-12 支間中央部のたわみ量

A桁では、⑨の0 t→20t→……→200t→210t→220tの時、220tの直前で端パネルのウェブ下部の孔あき部が、バーンという音を伴って水平方向に破断した。

この時点のU 1～U 4の平均応力は1907kg/cm²、L 1～L 4の平均応力は1852kg/cm²である。中央部の荷重一たわみを図-12に、フランジの荷重一ひずみを図-13・14にまた、ウェブの主応力分布を図-15・16に示す。

特にウェブの主応力分布は、ウェブの上下端で大きく異なり、下端は方向・大きさとも通常のプレートガーダーとは異なる興味ある結果を得た。

また、B桁では、240 tを超える耐力を示したが、桁撤去時に、フランジを変形させた影響により、ウェブの破断より前に、上記のフランジ部が局部座屈した。

ここでは、水平方向に破断したA桁について報告する。

(4) 破断の形状

破断後のウェブの状態を写真-10に示す。このように端部1パネルの補剛材間のウェブが完全に水平方向に切断された形となっている。

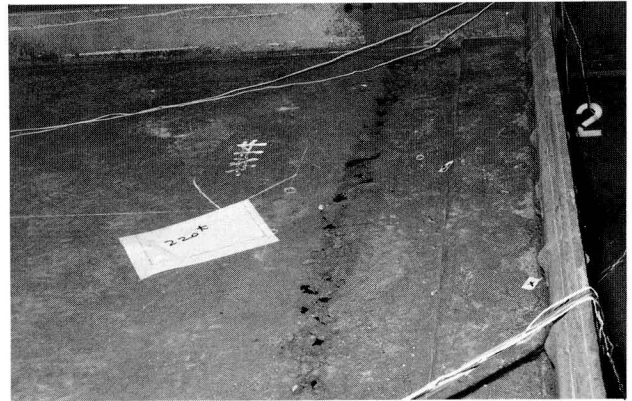


写真-10 破断後のウェブの状態

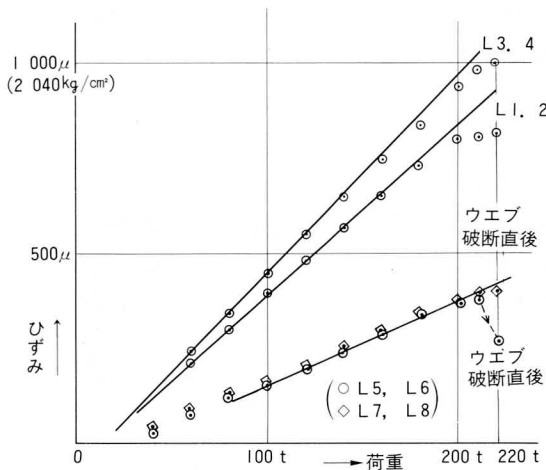


図-13 荷重-ひずみ図(1)下フランジ

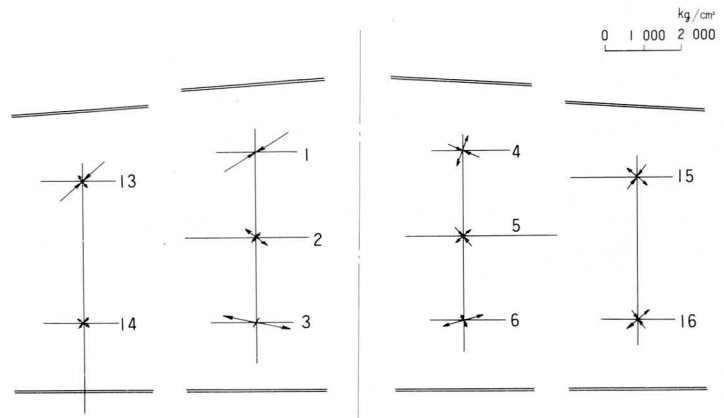


図-15 ウェブの主応力(P=140 t)

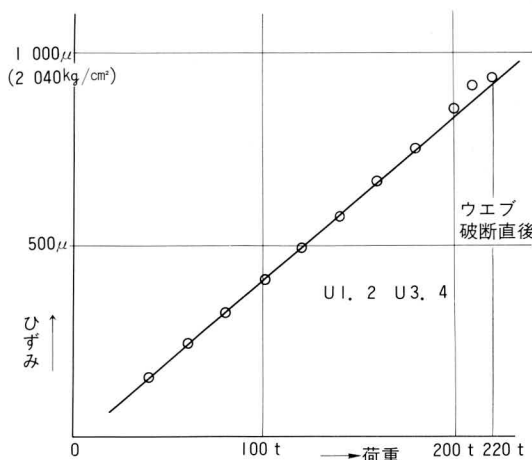


図-14 荷重-ひずみ図(2)上フランジ

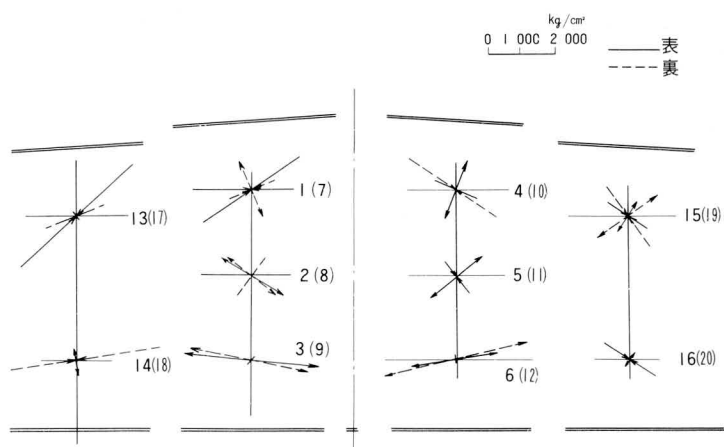


図-16 ウェブの主応力(P=220 t 破断直後)

この時のウェブのフレは最大30mmになり、除荷しても、中央部の変位は25mm残っていることから、桁が完全に破断されたことが解る。

5. 考察

以上の試験結果をまとめると、この昭和初期の桁について、

- 1) 鋼板はウェブ・フランジとも、強度、化学成分とも現行のSS41材と大差なくSS41相当材として扱ってさしつかえない。
- 2) L型鋼については、試験片が採取できなかったこともあり、強度試験は実施しなかったが、特に強度が落ちるとは考えられない。
- 3) 溶接性については、最高硬さ及び成分分析の結果から、低水素系溶接棒を用いるかぎり特に新材(SS41)と同じ扱いで良い。ただし、L型鋼への溶接は、Cが多く事前に施工試験が必要である。
- 4) リベットの耐久性については、改めてその継手性能の信頼性の高さを認識した。今回の試験について言えば、ヘッドがさびていても当面安全性には問題ないと言える。
- 5) 耐荷力は、本試験のようにウェブに広い範囲に、

断面欠損部を持つ場合でも、リベット桁の場合には許容応力度程度では、安全であると考えられるが、破断に対する安全率が低下しており、破断がウェブの水平方向に突然生じて、耐力が急激に落ちるような破壊を生じているので、そのメカニズムの解明に尚研究が必要である。

6. あとがき

今回の報告は、昭和初期の古桁の耐荷力を算定する上で必要となる、鋼材の基本的性質と溶接性を調べ、破壊時の主桁応力を調べた。

さらに、解析上から破断のメカニズムについて検討中なので別稿にて発表する予定である。

本試験にあたり、東京都の関係者の各位には助言と協力をいただいた。また、試験について宇都宮大学の阿部教授には、適切な指導をいただいた。紙上を借りて深謝する次第である。

〈参考文献〉

- 1) 竹名・川上・浅川・阿部；経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度、鉄道技術研究報告No.1339
- 2) 阿部・中村；鋼鉄道橋の耐荷力計算、橋梁と基礎 1974年10月