

溶接桁の高強度ボルト継手に関する実験的研究

小 西 一 郎 *

岡 英 寿 **

序 論

近時、溶接構造物に取り入れられている高強度ボルト継手に関して、継手自体の研究は各方面でかなり実施されている。

本研究は、高強度ボルト継手を溶接プレートガーダー橋の添接に用いる場合の基礎資料を得る目的で、大型の溶接試験桁を作製し、その継手に高強度ボルトを用いた場合の静的ならびに疲労試験を行ない、継手の基本的性質を調べたもので、静荷重試験においては、その破壊荷重近くまで性状を求めた。

なお、継手におけるボルトを1対1でリベットに置き換えた溶接桁も作製し、高強度ボルト継手との比較検討を試みた。

1. 試験桁および高強度ボルト

(a) 試験桁および試験装置 試験桁の形状と寸法は図-1に示す通りである。継手は桁のスパン中央部にあり、その詳細は図-2に示した。

試験は京都大学工学部土木工学教室に設置されている構造物試験機を使用して行なった。

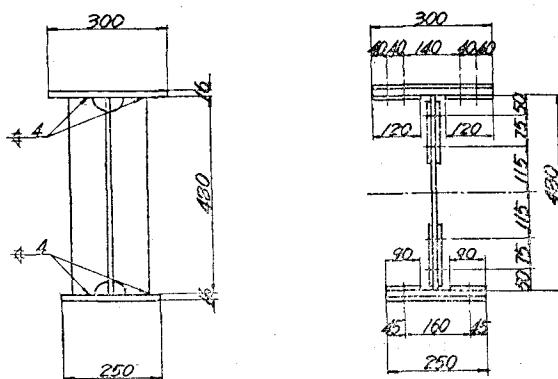
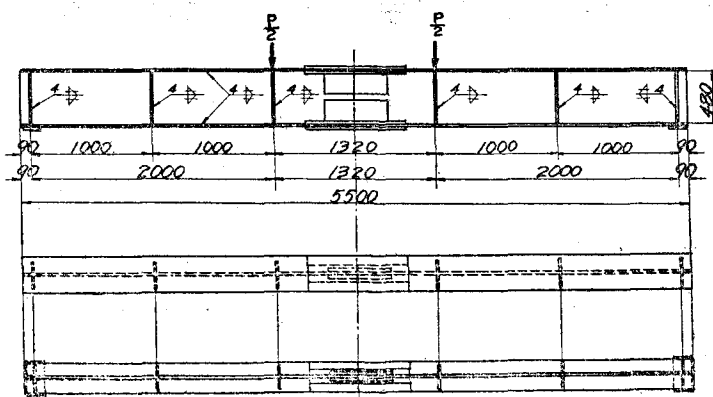
使用した鋼材はWEL-TEN 50で、その化学成分と機械的性質は表-1に示した通りである。

表-1 使用鋼材(WEL-TEN 50)の機械的性質と化学成分

機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)				
降 伏 点 (Kg/mm^2)	引張強さ (Kg/mm^2)	伸 び (%)	C	Mn	Si	P	S
32.9	50.5	28.5	0.130	1.400	0.420	0.017	0.024

* 京都大学教授 工博 工学部土木工学教室勤務

** 京都大学助手 同 上



断面図 継手部断面図
図—1 試験桁一般図

荷重は、図—1 に示したように継手部をはさんで、1320 mm の間隔で対称になるように分配桁を用いて載荷した。従って、継手部には曲げモーメントのみが生ずるから、ウェブの継手にはモーメントプレートのみを設けた。

(b) 高強度ボルト 継手には上、下フランジにそれぞれ24個、ウェブに24個計72個のボルトまたはリベットを用いた。

ボルトは22 mm 径の転造ネジのものでA、B、C、Dの4種を作製した。その化学成分および機械的性質は表—2、表—3に示す通りである。

ボルトの締付力はトルクレンチによって、締付モーメントを基準にして与えることにした。また、締付力 P_v と締付モーメント M_a を実験的に求め、両者の関係に直線を当てはめ、その勾配の平均値からトルク係数 k を求めた。すなわち関係式は、 $k = \frac{M_a}{P_v \cdot d}$ 、 d はボルトの呼径である。実験の結果 $k = 0.183$ を得た。ボルト1本当たりの締付力として24 tを必要とするの

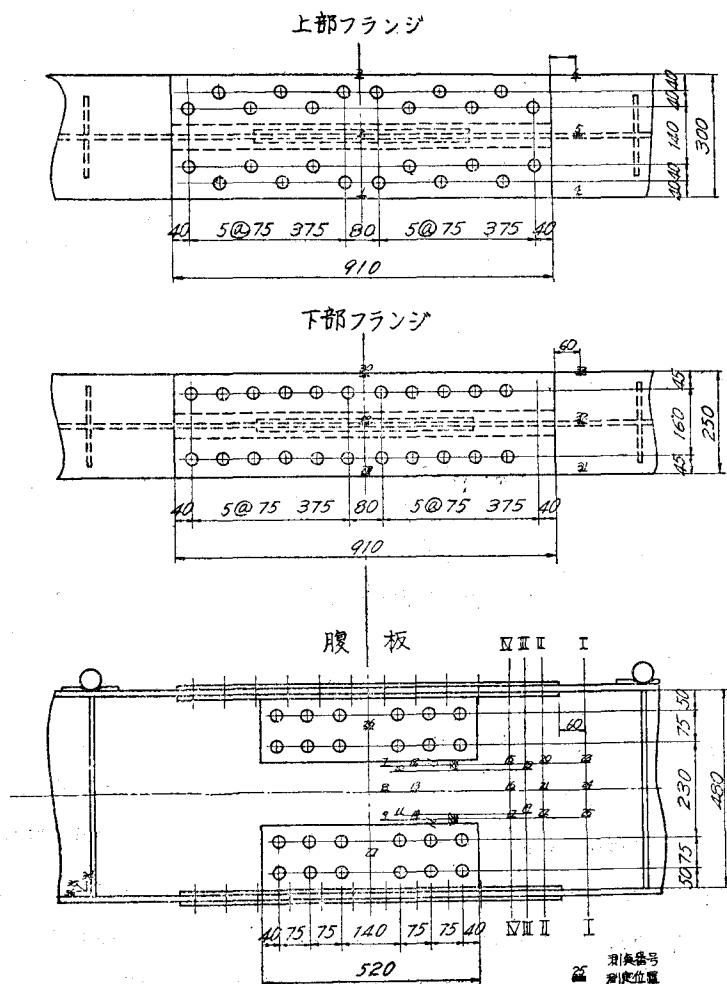


図-2 継手部詳細図

表-2 ボルトの化学成分 (%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	Al	
									※	※※
A	0.50	0.34	0.96	0.009	0.011	1.15	0.14	—	0.020	0.012
B	0.41	0.31	0.90	0.002	0.012	0.95	0.10	—	0.019	0.011
C	0.43	0.35	0.74	0.010	0.010	1.20	—	0.248	0.018	0.011
D	0.43	0.28	0.88	—	—	0.95	—	0.20	—	—

※ Sol ※※ in Sol

表-3 ボルトの機械的性質

鋼種	引張強さ (Kg/mm^2)	降伏点 (Kg/mm^2)	伸び (%)	絞り (%)	シャルピー衝撃値 (Kg-m/cm^2)
A	109.5	104.6	16.8	53.3	4.5
B	110.7	99.0	15.8	52.0	12.0
C	113.3	103.4	15.3	48.0	12.0
D	107.0	97.0	20.4	56.8	—

で、上式から M_0 としてすべてのボルトに一樣にトルク 97 Kg-m を与えた。この締付力により、ボルト応力断面積で計算すると $8,000 \text{ Kg/cm}^2$ の応力が発生することになるが、これは D 種ボルトの降伏点の約 82 % である。従って締付けに伴うねじりを考慮すると、ボルトネジ部の外周ではほぼ降伏点附近にあることが推定される。

2. 静荷重試験

(a) 静荷重試験の概要 静荷重試験は高強度ボルト桁 2 本、リベット桁 2 本計 4 本について行ない、(i) スパン中点のたわみ (ii) 下フランジ継手のずれ (iii) 継手各部のひずみなどを測定した。(iii) はボルト桁 1 本に対しては、ひずみ分布の一般的傾向を知るため、上下フランジ表面および側面、ウェブ、モーメントプレートなど各点に総数 84 個の電気抵抗線歪計を設け、また他の 1 本のボルト桁に対しては、とくに中立軸の位置を吟味するため、主として継手部のウェブ各点に総数 36 個の電気抵抗線歪計を設けて測定を行なった。(ii) の測定に当っては、フランジ主板と添接板とに鋼球を打込み、contact 歪計を用いて鋼球間の距離変化を測定した。上記 2 本のボルト桁に対応せしめて、2 本のリベット桁についても同様の測定を行なった。また、試験荷重としてはボルト桁で 90 t、リベット桁で 80 t とし 5 ~ 10 t ごとに測定を行なった。本論文では、主として問題点の多い、桁の下フランジについて論ずることとする。

(b) スパン中点のたわみ 測定はダイヤルゲージにより行ない、測定結果は図-3 に示した通りである。図のようにボルト桁においては荷重が約 50 t、リベット桁では約 40 t までは、荷重とたわみ量との間にはほぼ直線関係が成立し、それ以上では荷重の増加とともにたわみは急激に増大している。ボルト桁はリベット桁に比較して各荷重段階ごとにたわみは約 10 % 少ない。スパン全体にわたり等断面溶接桁と考えて計算したスパン中央におけるたわみ量は、荷重 50 t の場合、曲げモーメントによるたわみが $B = 2.1 \times 10^{-6} \text{ Kg/cm}^2$ として 11.00 mm であり、せん

断力によるたわみは $G=0.81 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ として 0.70 mm となり、合計 1.70 である。これに対しボルト桁では 1.133 mm の実測たわみ量を得てほぼ一致している。一方リベット桁の実測値は 1.254 mm で計算値より約 10% 大である。

(c) 下フランジ継手のずれ 下フランジ主板の突き合せ部分において、ダイヤルゲージを用いて主板間の変位量を測定した結果を図-4に示す。図-4の測定結果より、変位量はボルト桁の方がリベット桁よりも小さく程度である。しかし、この変位量は下フランジ主板間のずれ量ではなく、厳密には下フランジ継手の伸びと、摩擦による変形量およびずれ量との合計値である。従って実際の主板間のずれ量は、図-4に示した値よりも多少小さい値となる。

つぎに、下フランジと添接板がいかなる相対変位を生じているかを調べるため下フランジに鋼球を打ち込み(測定長 20 mm 、角度 30°)、contact 歪計を用いて主板と添接板にまたがる斜め方向の鋼球間の変位量を測定し、各位置における変位量の水平方向成分をボルト桁、リベット桁について求めた。ボルト桁の場合、この変位量は上述のように各種変形量の合計値である。すなわち、ボルト桁下フランジと添接板に打込んだ鋼球の相対位置は、図-5のように最初(a)の状態にあったものが、載荷後(b)または(c)のように変化する。このいずれの状態になるかは測点の位置および荷重の大きさによって定まる。

ずれの機構およびずれ量を求めるための理論は省略し、実験の結果について述べる。

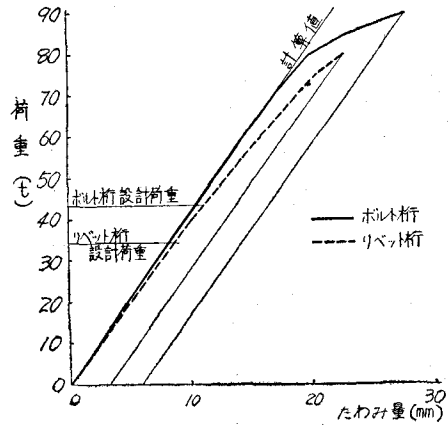


図-3 荷重—桁スパン中点たわみ線図

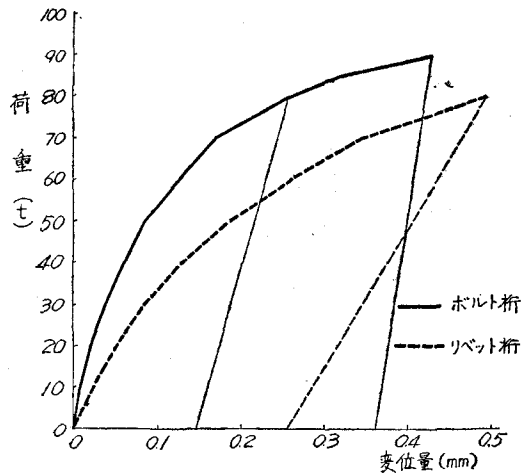


図-4 Fフランジ継手主板間の変位
(標点距離 7.5 mm)

変形量はボルト継手の方がリベット継手よりもはるかに少なく、ボルト桁の方が剛であるといえる。しかし、継手において実際に問題になるのは、ボルト継手では摩擦による変形量またはこれにずれ量を加えた量である。

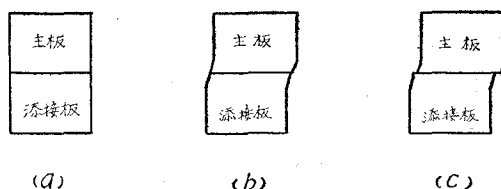


図-5 主板-添接板間のずれ状態図

図-6はこれを示してある。また、摩擦力による変形量の最大値は試算によると、 $1.8 \times 10^{-3} \text{ mm}$ で、実際に継手接触面間に生じているずれは、

図-6の変位量からこの量を一様に減じたものとなる。しかし、現在は上記変位量がかなり小さいので、図-6をそのままずれの分布と見なし得よう。

図-6のように荷重の増加とともにずれの範囲は次第に内側に浸透して行く。

(d) フランジ継手の挙動 フランジ継手の伝達機構を調べるために、ボルト桁には10～90t、リベット桁には10～80tまで10tずつ荷重を増加した場合の、上下フランジ（継手部外）と添接板のひずみ分布測定を行なった。

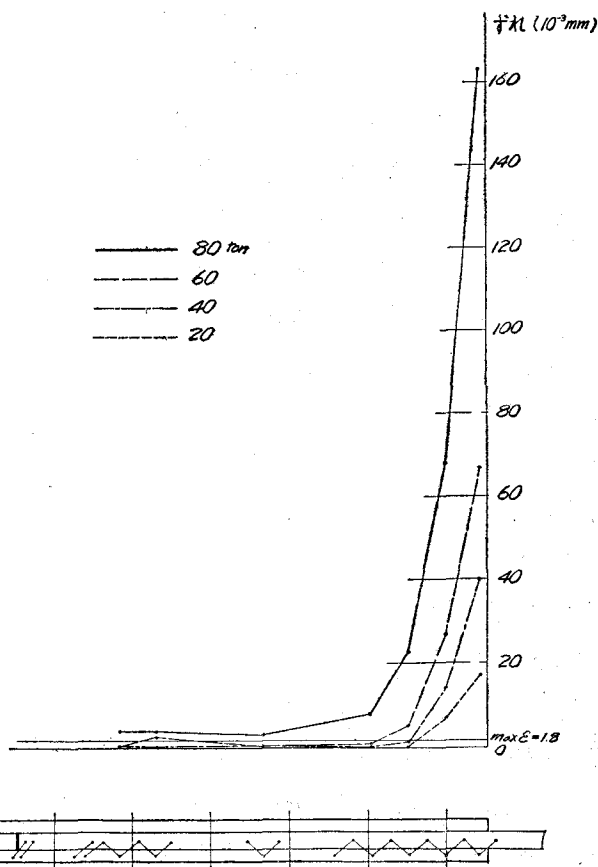


図-6 Fフランジずれ分布

フランジ表面のひずみ分布測定の結果、ボルト桁、リベット桁とも継手部から少し離れた位置では、上下フランジともウェブ位置のひずみが大きい。これはウェブ継手の断面2次モーメント

の全断面に占める割合が、継手部外のそれより大きいことに起因すると考えられる。一方フランジ継手部においては、フランジ端部が中央部よりひずみが大である。これはリベット桁では、力の伝達がリベットで行なわれるので、その附近のひずみが大となるのは当然であり、ボルト桁においてもボルトの締付力がフランジ中央部よりもボルト位置付近で大きいと考えられよう。ボルト桁とリベット桁で当然差違があると考えられるスパン中央から才1番目のボルト穴断面におけるひずみ量の測定の結果、ボルト継手の方がひずみ量が少ない。これは、ボルト継手では力が摩擦力で伝達されることを示すものである。つぎに、各荷重段階におけるボルト桁およびリベット桁フランジ側面におけるひずみ分布測定の結果について述べると、ボルト桁については、荷重が小さい範囲では桁軸方向継手中央部のひずみ分布は、その値がほぼ一定で端部より小さい値であり、しかも一定区間が長い。これは荷重が小さい段階では力はほとんど両端部付近の摩擦抵抗によって受け持たれ、中央部では主板と添接板間に力の伝達がほとんどないことを示している。荷重の増加につれてこの中央部のひずみ量一定区間は短くなり、摩擦抵抗によって受け持たれる区間が次第に内部に波及することになる。リベット桁については、荷重が小さい時にはボルト桁とほぼ同じ傾向を示しているが、荷重の増加につれてボルト桁の場合よりも、中央部ひずみ量一定区間が短くなり、荷重60tの場合にはもはや一定区間は消滅している。すなわち、6本のリベットが全荷重をかなり均一に分担していることを示した。上フランジ継手側面のひずみ分布についても下フランジの場合と同様の傾向があるが、このような曲げ圧縮側では、主板突き合せ部の継目の密着状態にかなり影響されるため、単純な比較検討は困難である。

(e) ウェブ継手の挙動 ウェブ継手の一般的挙動を知るために、ボルト桁、リベット桁おのの1本につき、合計23個の測点を設けひずみを測定した。このときの荷重は20、40、80tである。これらの測定結果から、継手中央のモーメントプレートにひずみが、ボルト桁とリベット桁とではかなり異なる点が注目された。これはこの桁の継目部の間隔がほとんどなく、載荷時に変形の結果上フランジ、ウェブ上部が密着状態になり得ることが考えられ、その密着状態の相違によって添接板に伝わる力も異なると考えられる。この密着状態には、リベット継手の方がボルト継手よりも当然なりやすいと考えられる。実際の設計では、継目は載荷により密着しないとしているが、かりに密着しても構造上は安全側である。従って上述の点を考慮すればボルト桁、リベット桁とも傾向は似ている。すなわち、モーメントプレートについては、継手の中心から離れるにつれてひずみが小さくなること、これはボルト桁の場合は、力が摩擦抵抗によって、リベット桁の場合はリベットのせん断抵抗、支圧抵抗によってモーメントプレートから次第にウェブに伝達することを示す。また、引張側モーメントプレートの継手中心のひずみは、ボルト桁の方

がリベット桁よりも大きい。一つ右側の測点では逆にボルト桁の方が小さくなっている。また、モーメントプレート外のウェブのひずみ分布がほぼ等しいのは当然であるが、この測点位置はボルトおよびリベット穴に関係のない断面であるにもかかわらず、中立軸はリベット桁の方がボルト桁よりもやや上方にある結果を得た。

以上のように、ボルト桁とリベット桁のウェブ継手の一般的挙動が明らかになったが、つぎにボルト桁とリベット桁の中立軸の差を、2. (2), (iii) で述べた、中立軸の位置を問題にしたボルト桁のひずみ測定の結果に基づいて述べる図-2 において継手からかなり離れた断面をⅠ、端部から第1番目のボルトおよびリベット穴の断面をⅡ、継手内部のボルトあるいはリベット穴の中間断面をⅢ、端部から第2番目のボルトあるいはリベット穴断面をⅣとする(これら各断面におけるひずみ分布について示したものが図-7 である)。(1) 断面Ⅰから求めた中立軸の位

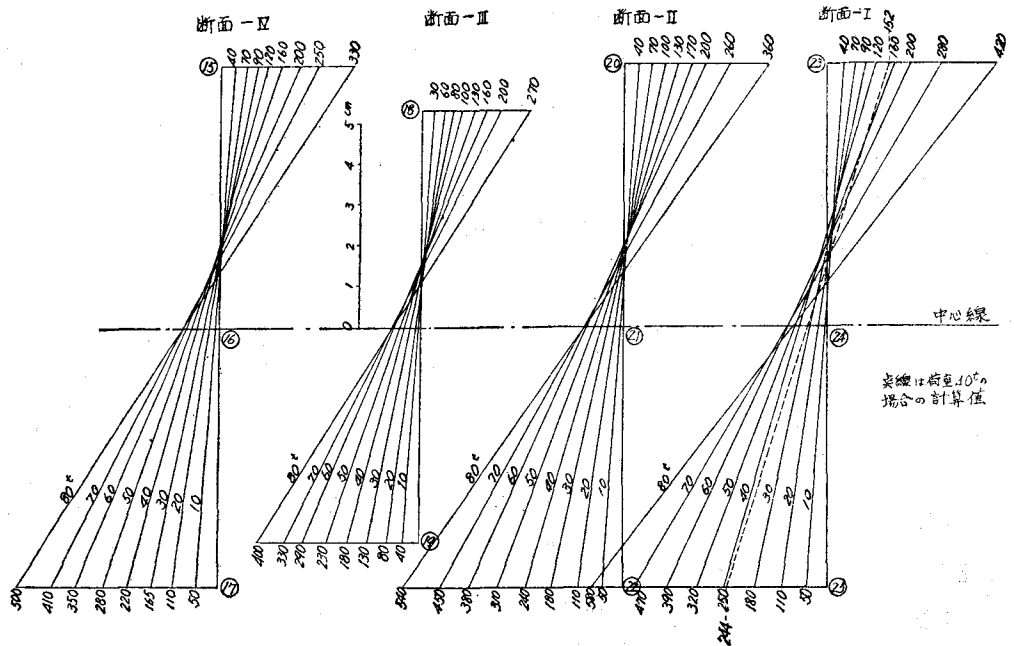


図-7 ボルト桁ウェブ中心附近ひずみ分布図

置は荷重によって多少異なっているが、ウェブ中心からほぼ2 cm上方で計算値1.5 cmよりやや大である。(2) 継手内部の断面では、断面Ⅲの中立軸は他のものより少し下にあり、計算上の偏心量1.5 cmとほぼ一致する。断面Ⅱ、Ⅳについては、中立軸の計算にボルト穴を控除する必要はないと考えられる。(3) ひずみの大きさは、断面Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの順で少しずつ小さくなっており、フランジ添接板が多少カバープレートの役割を果たしていると考えられる。

リベット桁については、断面Ⅰではボルト桁と余り差がないが、断面Ⅱ、Ⅲ、Ⅳと進むにつれて中立軸の位置は上昇する。モーメントプレートのひずみ分布を測定した結果、中立軸の位置は計算値よりも上にあり、また、ひずみ量が計算値よりも小さい。これは、前述のように継目の密着状態の影響によるもので、力の一部が主板の継目部で直接主板間に伝達するためである。

(f) 静荷重試験から得た結果の総括 ボルト桁、リベット桁ともに継手における力の伝達機構は複雑で、継目部主板間の密着程度により著しい変化を生ずる。この密着状態は各桁ごとに異なるため、各桁の継手部の挙動もおのおの異なるが、継目部の密着は決して危険側ではない。本実験から得られた一般的な傾向を総括するとつぎのようになる。

① ボルト桁のたわみは、継手を設けない桁のたわみとはほとんど変らない。リベット桁のたわみは、ボルト桁のそれよりも約10%大きい。従って、ボルト桁の方がリベット桁にくらべて剛である。

② 下フランジの添接板の間の相対変位は、ボルト桁の方がリベット桁にくらべて、はるかに少ない。これもボルト桁の剛性がリベット桁よりも大であることを示す。

③ 载荷により、継目部の密着程度はリベット桁の方が大であり、従って、継手部での中立軸の位置は、リベット桁の方がボルト桁よりも上方にある傾向を示した。

3. 疲労試験とその結果の考察

(a) 疲労試験の概要 疲労試験はボルト桁3本、リベット桁1本について構造物試験機を用いて行なった。試験は各桁とも下限荷重 $P_0 = 8$ t、上限荷重 $P_u = 36$ tの部分片振り荷重であり、载荷速度は約270回/分である。この荷重による桁応力の計算値は、下フランジ(スパン中点)で350~1,570 Kg/cm^2 であり、静荷重試験より得たこの荷重に対する同じ点の応力はボルト桁:340~1,610 Kg/cm^2 、リベット桁:240~1,575 Kg/cm^2 であった。

試験は、桁が破断を生ずるまで行なった。

(b) 試験結果とその考察 試験の結果はまとめて表-4に示した。表-4からもわかるように、ボルト桁1本は $N = 2 \times 10^6$ 回では破断せず、リベット桁とボルト桁2本は $N = 2 \times 10^6$ 回以下で破断を生じた。ボルト桁No. 2は、荷重直下の下フランジとウェブの溶接接合部で破断を生じた(写真-1)。この部分の桁応力の計算値は、軸方向垂直応力度 $\sigma = 1,450 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、せん断応力度 $\tau = 322 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、主応力 $\sigma' = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = 1,518 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ である。下フランジ下面の実測値は1,535 Kg/cm^2 である。ボルト桁No. 3も破断箇所は、No. 2と同一である。No. 5はスパン中点から1番目のボルト穴純断面の下フランジに破断を生じた。

表-4 疲 勞 試 験 結 果

試 験 桁	荷 重 振 幅		破断繰り返し数	破 断 箇 所
	下限(t)	上限(t)		
ボルト桁 No. 2	8	3.6	1.84×10^6	荷重直下、下フランジとウェブ の溶接接合部
ボルト桁 No. 3	8	3.6	2.48×10^6	
ボルト桁 No. 5	8	3.6	1.95×10^6	スパン中点から才1番目のボルト 穴純断面下フランジ
リベット 桁	8	3.6	0.75×10^6	継手部下フランジ才1列リベット 穴断面

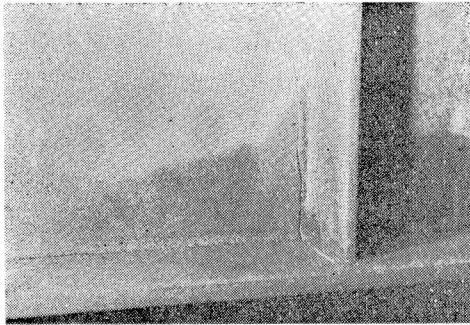


写真-1 ボルト桁 (No. 2) 破断部

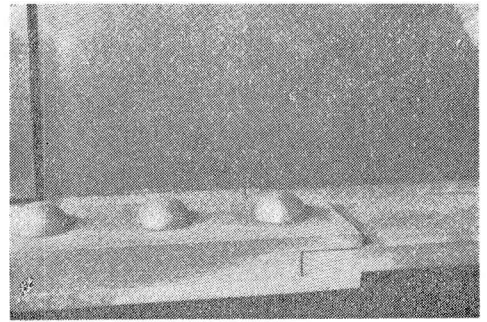


写真-2 リベット桁破断部

リベット桁は、下フランジ継手の才1列リベットのリベット穴断面で疲労破断した(写真2)。この箇所はリベット継手では、最も弱点となる箇所である。この位置での純断面応力の計算値は $43.6 \sim 1,963 \text{ Kg/cm}^2$ であり、実測値は $42.5 \sim 1,970 \text{ Kg/cm}^2$ である。

疲労試験を行なったボルト桁について、試験後上下フランジ、モーメントプレートでボルトの解放モーメントを測定した結果、疲労試験によってボルトのゆるみは生じなかった。ただ、ボルト桁 No. 5 において、破断した断面のボルトが、他のボルトのトルクよりやや小さい値を示した程度であった。

一般にプレートガーダーにおいては、フランジとウェブはすみ肉溶接によって連結されるが、繰り返し荷重下においては、溶接部の応力集中がボルト継手の欠陥より先に現われる傾向であるので、溶接施工には十分の留意が必要である。これに対しリベット桁では、リベット穴における応力集中が支配的欠陥となっており、ボルト継手の桁がリベット継手の桁より耐疲労性に関して、

かなり優れていると考えられる。

結 語

本試験の結果、静荷重下においてボルト継手桁が示す挙動に関して、かなり細部にわたる資料を得ることができた。また、疲労試験は試験数としては必ずしも十分ではなかったが、ボルト継手の耐疲労性が良好であること、リベット継手桁に対する優位などを確認することができた。