

大形試験体による高力ボルト摩擦継手の実験的研究

SOME EXPERIMENTAL STUDIES OF FRICTION-TYPE JOINTS USING LARGE-SCALE MODELS

成 瀬 輝 男*
By Teruo Naruse

1. ま え が き

高張力鋼の部材を高力ボルトによって摩擦接合した継手の静的すべり耐力に関する基礎的実験研究はすでに数多くなされ、基本的な問題についてはすでに解明されているが、本研究はこのような高張力鋼を使用した大型部材を高力ボルトによって接合する場合に実際に当面する次の2つの問題に着目し、大形試験体によって継手全体の特性を確認すると同時に、これら問題点に対する対処策を検討したものである。

- (1) 接合部における母材面間の目違いの影響
- (2) 菱形にボルトを配置した摩擦接合部のすべり耐力

これら2つの問題に関する本実験研究は、設計実務の上の必要に応じてそのつど別個に行ったものであるが、いずれも大形実験であるという点で共通していると同時に、今後の大形構造物設計上の参考に供しようと考えているので、ここにまとめて報告するものである。

2. 研究の目的

(1) 接合部における両母材間の目違い

摩擦接合される面は全面が同一平面にあることが理想であるが、実際の構造物製作において多少の目違いが生じるのはやむをえない。特に SM 58 あるいはそれ以上の高張力鋼を使用する部材はつねに板厚・部材寸法とも大きく、部材の大型化につれて板厚公差や部材寸法の製作公差も大きくならざるをえない。しかし摩擦接合の方からいうならば、たとえ部材が大型化してもその目違いが拡大することは許されない。むしろ逆に、添接板の板厚の大きいこと、材料の降伏点が高いことなどからくる

摩擦面のなじみにくさを考慮すると、目違いの許容量はさらにきびしく抑えたいところである。実際の継手における目違いの出方として図-1に示す2つの場合がある。まず板厚公差によるものであるが、JIS G 3193 (1970)によると、たとえば厚さ 50 mm で幅 1600~2000 mm の領域の板に対して、 ± 1 mm の板厚許容差が認められている。板厚差による目違いは母材両面に分配されるとは限らず、断面隅角部などのように母材位置が強固に拘束されているところでは母材の片面に集中して生じる。いずれにせよこうした場合は板厚の小さい側にあるボルトの締付け力の一部が、添接板内のせん断力形で板厚の大きい側に転移してしまうので、薄い側は締付け力の不足をきたし当然継手のすべり耐力は減少する。目違いを生じる2番目の要因は、部材製作の際の寸法誤差である。この場合は目違いによる締付け力の移動が母材両面で逆向きになるので、総体としての締付け力は変化しないはずであるが、表裏各摩擦面の負担する摩擦力はたがいに相違してくるので、最終すべり耐力への影響が考えられる。以上2つの要因が実際には重合してあらわれるわけであるが、ここではより直接的に締付け力の減少をきたす板厚差による目違いを対象として、母材面間の目違いの影響を検討する。

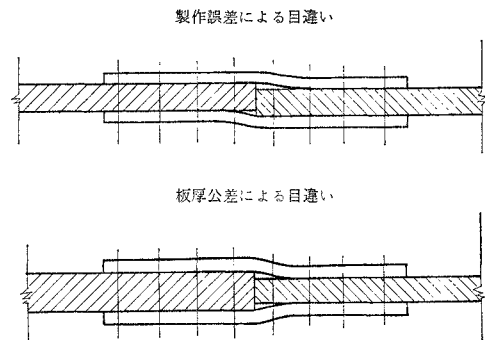


図-1 目違いの状態

* 正会員 石川島播磨重工業(株)鉄構基本設計部次長

(2) 菱形のボルト配置

引張部材の接合に高力ボルト摩擦接合を用いる場合、ボルト孔の断面控除によって母材の有効断面積は著しく減少する。ボルトを最小間隔で配置した場合、設計計算における断面損失は、部材総断面積のほぼ 30% に達する。このように大きな断面損失は設計上不利であるから、継手部の母材板厚を増加したり、またはボルト配置の形状を工夫することによって大幅な断面損失を避けるのが一般の通例である。しかしながら実際に使用する板厚には限度があり、場合によっては発注者によって使用板厚の上限が明示されている場合も多い。孔控除前の板厚がすでに板厚許容限もしくはその近傍に達している場合、継手部の母材板厚を増すことによる断面補填はできない。大体 SM 58 もしくはそれ以上の高張力鋼は大型構造物の板厚の大きい部分に用いられるのがつねであるから設計実務ではこうした問題にしばしば遭遇する。写真-1 に示すような菱形のボルト配置はそれに対する一つの解決法を示すものである。このようなボルト配置は、慣用計算法によるかぎり母材の断面控除を最小に抑えることができ好都合であるが、各ボルトの応力伝達分担が果たして均一に行われているかどうかという疑問が未解明である。このような観点から、ボルト配置を菱形に近い形状にした継手について、大形試験体によってすべり耐力を確認しておく必要がある。

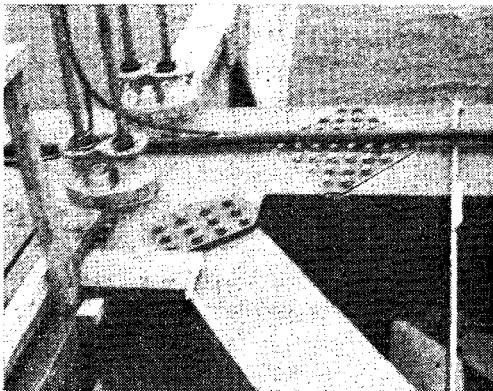


写真-1 イギリス Forth 吊橋の補剛トラス弦材の添接

3. 目違いを有する SM 58 鋼板の継手

(1) 小形試験体によるすべり係数の測定

大形試験体を用いる鋼板の基礎的なすべり係数を知るために、まず小形試験体 18 体について引張試験を行った。試験体の形状・寸法は図-2 に示すとおりである。用いた材料は鋼板・ボルトともに大形試験体の材料と同

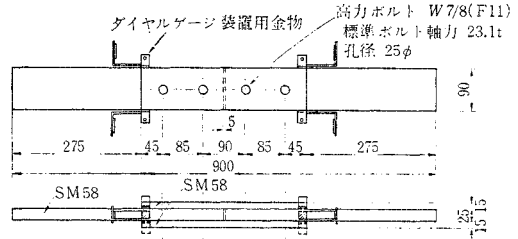


図-2 小形試験体 S-58 (SM 58) の形状および寸法

表-1 鋼板 (SM 58) の機械的性質

項目	規格	引張試験		
		降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
板厚 15	SM 58	56	66	29
板厚 25	SM 58	53	63	41

じであり、鋼板の主要な機械的性質は表-1 に示すとおりである。試験片の作成はいずれも実験の直前に行った。すなわち締付けの 1~2 日前にサンドブラストで摩擦接合面を 40~50 S 程度に表面処理し、同じく締付けの 1~2 日後に引張試験機にかけた。したがって、締付けおよび試験の際の摩擦面の発錆状態は、時間的な関係から実際の部材の摩擦接合面と若干相違するが、本実験では実際の構造物におけるすべり係数の判定そのものよりも、各試験体の摩擦面の状態の均一化を主眼に考えて、この方法をとったものである。高力ボルトは W 7/8 (F 11 T) で、締付け力はトルクレンチのトルク計の読みによって管理した。軸力導入は添接中央部から外側へ向けて左右対称に、最初標準ボルト軸力 23.1 t の 80% で中締めをしたのち、100% の本締めを行った。実験は全 18 体を 2 グループに分け、最初の 9 体を昭和 46 年 12 月に、残り 9 体を大形実験終了後の翌年 4 月に、それぞれ前記要領で実験直前に試験体を作成し IHI 技術研究所の 100 t アムスラー試験機によって実験した。実験は引

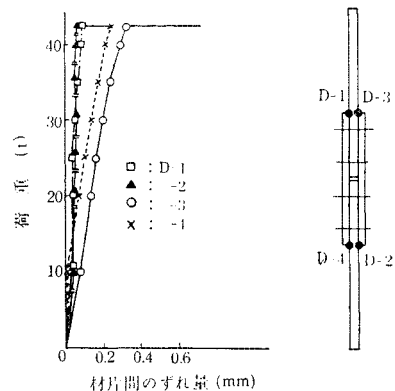


図-3 小形試験体 S-58 No. 8 (SM 58) の荷重-ずれ量曲線

張荷重を 5 t きざみで増加させながら、試験体に装着したダイヤルゲージにより、母材と添接板間のずれ量を測定していった。荷重とずれ量との関係の一例を図-3 に示した。最終的に衝撃を伴って急激にすべりを発生した荷重(ボン荷重)をすべり荷重としてすべり係数を求めた結果を図-4 に要約した。すべり係数の計算に用いた軸力は標準ボルト軸力である。この小形試験体のすべり荷重の平均値に対する母材応力を孔控除した純断面について計算すると次のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{すべり荷重平均値} &= (50.4 + 56.8 + 57.7 + 61.6) / 4 \\ &= 56.6 \text{ t} \end{aligned}$$

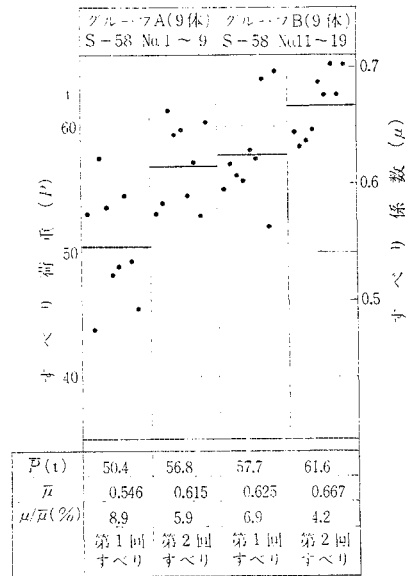
$$\text{母材応力} = 56600 / (9 - 2.5) \cdot 2.5 = 3480 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 大形試験体によるすべり係数の測定

この実験に用いた大形試験体を図-5, 6 に示す。GA 形 4 体は摩擦面間に目違いのない基本試験体である。GD 形の 2 体は高力ボルトの本数と配置は GA 形と同じであるが、母材板厚を継手両側で相違させることによって、摩擦面間に目違いが与えられている。両母材間の 3 mm の板厚差は高力ボルトの大きな締め付け力によって、母材の両面にほぼ 2 分されて配分される。実験によって得られるすべり耐力は、両摩擦面のすべり耐力の合計を示すことになるから、板厚差の多少の不等配分の影響は消去されるとみてよい。試験体の作成は前節の小形試験体とまったく同じ要領で行った。高力ボルトの締め付け順序も同じく継手中央(母材突き合わせ部)から外側へ向けて左右対称に、最初は所定トルク値の 80% で中締めをしたのち 100% の本締めを行った。この際 GD 形のように目違いのある試験体の場合は、目違い近傍の板厚の薄い側のボルトは、先に締め付けたボルトがあと

で締め付ける隣接ボルトの軸力によって多少ゆるむ可能性もあるが、これも実際の構造物製作の際の目違い影響の一つであるという観点から、特に追加的な調整締めはせず、2 回目の本締めをもって締め付けをおえた。摩擦面の下地処理の 1~2 日後に締め付け、さらに締め付けの 1~2 日後に引張試験を行ったが、これも小形試験体の場合と同じである。

実験は昭和 47 年初頭に IHI 技術研究所の 1200 t 引張試験機により実施した。引張荷重は 50 t きざみで増



\bar{P} : すべり荷重 P の平均値
 $\bar{\mu}$: すべり係数 μ の平均値
 $u = \sqrt{\frac{\sum (\mu - \bar{\mu})^2}{n-1}}$: 標準偏差の不偏推定値

図-4 小形試験体 S-58 (SM 58) のすべり係数

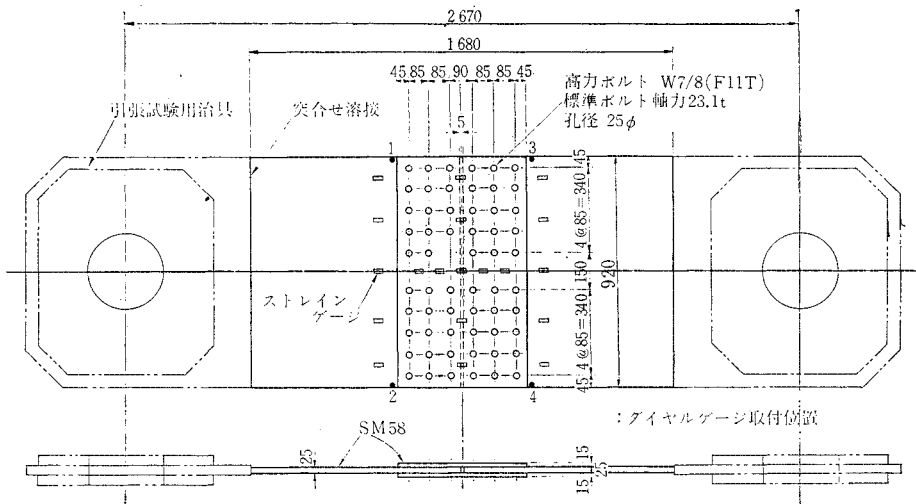


図-5 基本試験体 GA (SM 58) の形状および寸法 (全 4 体, ボルト数 30+30=60 体)

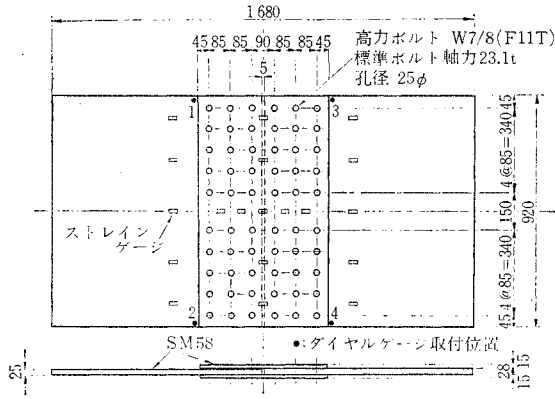


図-6 試験体 GD (SM 58) の形状および寸法
(全2体, ボルト数 30+30=60 本)

加させ、各荷重点において母材および添接板の応力測定、母材と添接板の間のずれ量の測定、ボルト幹部の応力変化量の測定を行った(写真-2)。継手の最終的なすべりは非常に大きな衝撃を伴って発生した。荷重とずれ量の関係を図-7に、すべり荷重のデータを図-8に示す。添接板直前・直後における母材の応力分布は引張荷重の各段階において、母材両面のストレインゲージによって測定したが(図-5, 6), 母材全幅にわたってほぼ均等分布している。両試験体のすべり荷重の平均値に対する母材応力を、孔控除した純断面について計算すると次のとおりである。

GA 形 (第1回) $672\,000 / (92 - 25) \cdot 2.5 = 4\,010 \text{ kg/cm}^2$

GD 形 (第1回) $543\,000 / (92 - 25) \cdot 2.5 = 3\,240 \text{ kg/cm}^2$

〃 (第2回) $733\,000 / (92 - 25) \cdot 2.5 = 4\,380 \text{ kg/cm}^2$

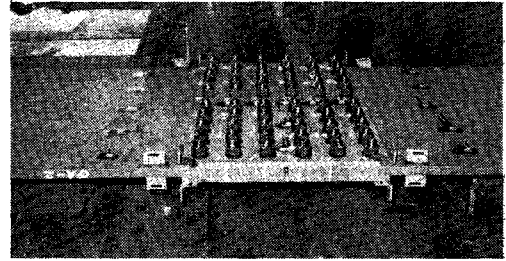


写真-2 試験体 GA (SM 58) の実験後の状況

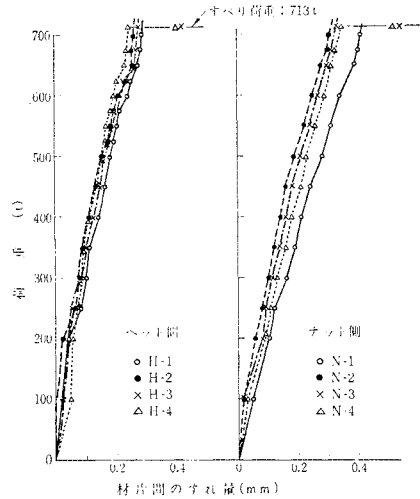


図-7 試験体 GA No. 1 (SM 58) の荷重-ずれ量曲線
(ダイヤルゲージ取付位置については図-5 参照)

項目	記号	試験体数	試験体と応力分布 (kg/cm ²)	No.	μ	P_S (t)	σ_S/σ_Y	P_S/nP_0	$\mu/\bar{\mu}_A$	
基本実験	GA	4 体		1	0.514	713	0.780	0.838	1.061	
				2	0.440	610	0.668	0.717	0.908	
				3	0.534	740	0.811	0.870	1.101	
				4	0.451	625	0.684	0.735	0.930	
				平均	0.485	672	0.736	0.790	1.000	
板厚差のある試験体による実験 (板厚差 3mm)	GD	2 体		1	a	0.425	590	0.647	0.693	0.876
					b	0.577	800	0.782	0.941	1.189
				2	a	0.357	495	0.543	0.582	0.736
					b	0.480	665	0.650	0.782	0.990
				平均	a	0.392	543	0.595	0.639	0.808
					b	0.529	733	0.716	0.862	1.091

μ : すべり係数
 P_S : すべり荷重
 $\sigma_S = P_S/A_n$ (A_n = 純断面積)
 σ_Y : 降伏点 (表-1 の平均値)
 (注: 図中の応力分布はそれぞれ GA No. 1 および GD No. 1 の荷重 400t における測定値を示す)

n : 大形試験体のボルト数/小形試験体のボルト数
 P_0 : 小形試験体のすべり荷重の平均値 (= 56.7 t)
 $\bar{\mu}_A$: GA のすべり係数の平均値
 a, b : 図中 a 側および b 側のすべり

図-8 試験体 GA, GD (SM 58) の実験結果

(3) 考 察

小形試験体のすべり係数はおおむね過去の類似実験の実験値と合致しているが、全体にややばらつきが多く、特にグループAの第1回すべりが他に比してかなり下まわっていることが認められる。大形試験体のうち基本形であるGA4体のすべり係数が、いずれも小形試験体の平均値をかなり下まわっていることは、ひとつの問題を提起している。すなわちGA形4体のすべり係数の平均値は、小形試験体の平均値の79%である。

前節に示したように、GA試験体のすべり応力の平均値はかなり高い領域に達しているので、使用鋼材の実際の降伏応力(表一)の平均値との比を検討すると、

$$\text{すべり応力/降伏応力} = 4010/5450 = 0.736$$

これに対し小形試験体の場合は、

$$\text{すべり応力/降伏応力} = 3480/5450 = 0.639$$

文献1)によれば、既往諸実験の結果から、この比が0.80まではボルト初張力の板厚やせによる減少は数パーセントにとどまるとしている。したがって上記応力比の点からGA試験体のすべり耐力減少を説明することはできない。このような大形試験体のすべり耐力減少傾向は、後述する80kg/mm²鋼の継手実験でも示されているので、偶発的な現象とは考えられない。トルク係数の誤差もしくは締め付け力の誤差は、ボルト本数の増大によってむしろ平均化されるはずであるから、このすべり耐力の低下はボルト数が多い場合の応力伝達機構、すなわち継手の大形化に伴って生じる各ボルトの応力分担の不均一性に原因があるとみるべきではないかと考える。既往の実験報告として荷重方向に一列に多数のボルトを配置した場合でもすべり耐力は特に低下する傾向はないとする報告(文献2))もあるが、ボルト配置が線から面になった場合には摩擦面のなじみの不均一性などから、このようなすべり耐力の減少傾向を生じるものと考えられる。荷重直角方向についての応力分布は、一部に——たとえばGA No. 1に横曲げの影響が混入した形跡があるほかはほぼ対称に近い分布を得ている。次にGDについては母材板厚が薄い側でさきにすべっているのは当然であるが、すべり耐力は大幅に低下している。これは明らかに目違いの影響である。母材の板厚が厚い方のすべり耐力は、逆に基本試験体GAの平均値をかなり上まわっている。これは前記したように母材板厚の薄い側のボルト締め付け力の一部が、添接板内のせん断力となって、母材板厚の厚い側へ伝達されたためである。薄い側のすべり係数と厚い側のすべり係数との平均値は0.460であるが、この値はGA平均値0.485とほぼ一致しており、導入されたボルト軸力の総量が両者ほぼ等しいことを示している。

4. 目違いを有する80kg/mm²高張力鋼板の継手

(1) 小形試験体によるすべり係数の測定

大形試験体に用いる鋼板の基礎的なすべり係数を知るために、まず小形試験体20体について引張試験を行った。試験体の形状・寸法は図9に示すとおりである。用いた材料は鋼板・ボルトともに大形試験体の材料と同じであり、鋼板の主要な機械的性質は表2に示すとおりである。80kg/mm²鋼板のすべり係数の測定実験は実施報告例も少ないことから、その結果を今後の一般参考データとしうることを意図して、試験体の作成には特に注意を払った。試験片の作成はいずれも実験の直前に行った。すなわち締め付けの1~2日前にサンドブラストで摩擦面を20~30S程度に表面処理し、後記の例外を除き締め付けの1~2日後に引張試験機にかけた。高力ボルトはW1(F11T)で、軸力導入は添接中央部から外側へ向けて左右対称に、まずトルクレンチのトルク計の読みによって標準ボルト軸力(30.3t)の80%で中締めをしたのち、同じ順序で100%の本締めを行った。本締めの際のボルト軸力導入量の確認は2種類の方法によった。すなわち試験体全20体のうち、4体についてはボルト幹部の両側にストレインゲージを各1枚貼付して、ひずみ量の測定により導入軸力を直接確認する

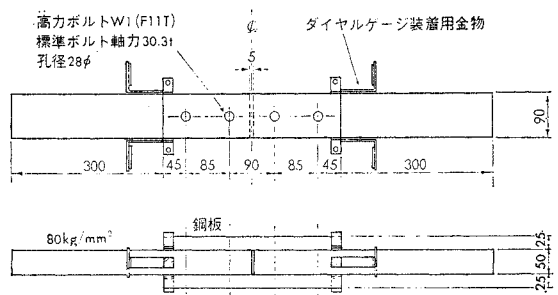


図9 小形試験体 S-80 (80 kg/mm² 鋼) の形状および寸法

表2 鋼板 (80 kg/mm² 鋼) の機械的性質

項目 板厚	規 格	引 張 試 験		
		降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
50	WEL-TEN 80	83	87	23
48	ASTM A 514 B 級	75	82	22
46	WEL-TEN 80 C	75	82	24
25	WEL-TEN 80	80	86	23
13	ASTM A 514 B 級	77	83	30

方法を取り、他の 16 体についてはトルクレンチのトルク計の読みにより確認した。これらの全 20 体の試験体は、次の 3 つのグループにわけて実験を行った。

グループ A：ボルト軸力をストレインゲージの読みで確認し、締め付けの 1~2 日後実験を行った試験体（4 体）。

グループ B：ボルト軸力をトルク計の読みで確認し、同じく締め付けの 1~2 日後実験を行った試験体（11 体）。

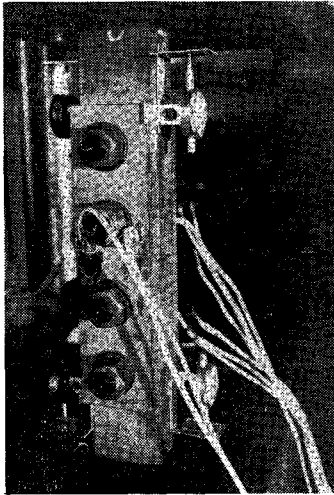


写真-3 小形試験体 (80 kg/mm² 鋼) の実験

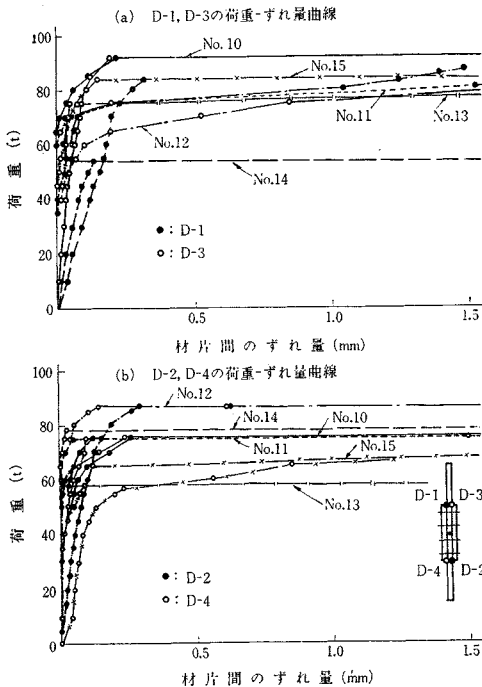
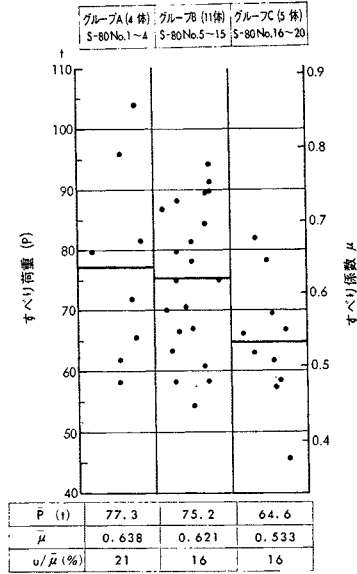


図-10 小形試験体 S-80 (80 kg/mm² 鋼) グループ B の荷重-ずれ量曲線の例 (No. 10~15 は 図-11 参照)



\bar{P} ：すべり荷重 P の平均値

$\bar{\mu}$ ：すべり係数 μ の平均値

$$u = \sqrt{\frac{\sum (\mu - \bar{\mu})^2}{n-1}} : \text{標準偏差の不偏推定値}$$

図-11 小形試験体 S-80 (80 kg/mm² 鋼) のすべり係数

グループ C：ボルト軸力をトルク計の読みで確認し、締め付けの 3 週間後に実験を行った試験体（5 体）。

実験は昭和 45 年 12 月、IHI 材料試験所の 200 t アムスラー試験機によって行い、荷重を 5 t きざみで上げながら、母材と添接板との間のずれ量をダイヤルゲージによって測定した（写真-3）。荷重とずれ量との関係の例を 図-10 に、またすべり係数を 図-11 に示す。実験の際注意をひいたのは、これらの小形試験体は、2~3 の例外を除きほとんどのすべりが音を発生することなく、静かに最終すべりを終了していたことであった。

(2) 大形試験体によるすべり係数の測定

大形試験体は 9 種類各 1 体ずつ都合 9 体を作成したがその内容は、目違いのない基本試験体、目違いをつけた試験体、目違いがあるが目違いによるすべり耐力減少に対処策の講じられている試験体、の 3 種に大別される。ボルトの平面的な配置は全試験体について全く同じである。基本試験体 LA-1 に引張試験用治具を装着した状態を 図-12 に示す。目違いをつけた試験体には LB-1 および LD-1 の 2 種があり、図-15 にみるように両者は目違いの大きさが相違している。残り 6 種の試験体は目違いによるすべり耐力減少に対処するための有効な対策の検討を目的としている。まず LB-2 および LD-2 は添接板を 2 層にわけることにより摩擦面のなじみをよくすることが期待したものであり、LC-1 および LE-1 は段違い部の厚い方の板にテーパ処理を施して、同様の

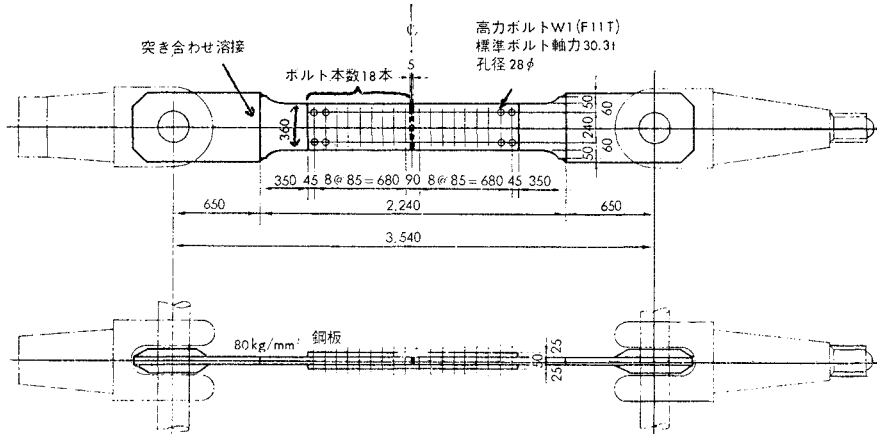
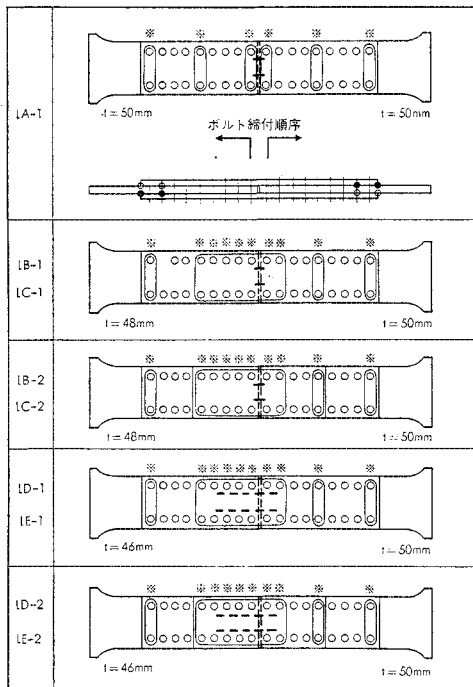


図-12 基本試験体 LA-1 (80 kg/mm²) の形状および寸法

効果を期待したものである。この2種類の対策を併用したのが LC-2 および LE-2 である。母材の基本板厚を 50 mm としたのは、80 kg/mm² 鋼板が構造物に使用される場合、大板厚が一般的であることを配慮した結果である。母材の板厚が大きいことは添接板厚の増大につながり、添接板厚の大きいことは目違いに対するなじみにくさを意味する。試験体の作成は小形試験体の場合と同じ要領で締め付けの 1~2 日前にサンドブラストで摩擦面を 20~30 S 程度に表面処理し、さらに締め付けの 1

~2 日後に引張試験機にかけた。高力ボルトは W1 (F11 T) で、軸力導入も前節の小形試験体と同じ順序で、まずトルク計の読みによって標準ボルト軸力 30.3 t に相当するトルクの 80% で、添接部中央から順次外側へ向けて左右対称に中締めをしたのち、同じ順序で 100% の本締めを行った。本締めの際の軸力導入もトルク計の読みで管理したが、図-13 に示す本数のボルトの幹部両側にストレインゲージを貼付し、ひずみ量を読みとることによって、目違い近傍のボルトを含めて本締めによる導入軸力の妥当性を確認した。

実験は昭和 45 年 12 月、東京大学総合試験所の大型構造物試験室において、万能 2000 t 大型構造物試験機を用いて行った(写真-4)。全 9 体の試験体のうち基本試験体 LA-1 については、1 回実験をすませてから試験体を解体し、鋼板にふたたびサンドブラストをかけ直してこれを新規の高力ボルトで締め付け、2 回目の実験を行った。したがって実験は都合 10 回行われている。



(注) (注) ※ : ストレインゲージ貼付ボルト
 — : 添接板のストレインゲージ貼付箇所
 ● : ダイアルゲージによるずれ量測定箇所 (各試験片に共通)

図-13 大形試験体 (80 kg/mm² 鋼) の測定準備要領



写真-4 大形試験体 (80 kg/mm²) の実験

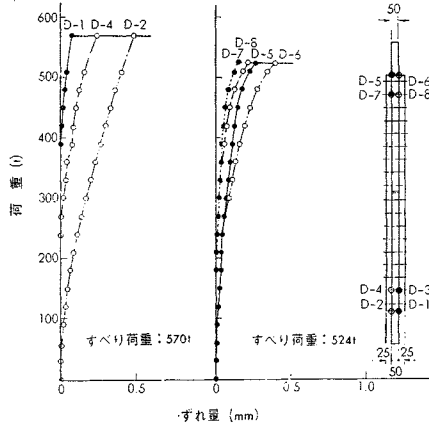


図-14 試験体 LA-1 (80 kg/mm² 鋼) 1 回目の実験の荷重-ずれ量曲線

実験は荷重を 30 t きざみで上げながら順次ずれ量を測定し、まれストレインゲージによってボルト幹部の応力の変化量を測定した。最終的なすべりは小形試験体の場合と異なり、すべての試験体について急激に大音響を伴って発生した。荷重とずれ量との関係の一例を図-14に、荷重増加に伴うボルト軸力の変化量を表-3に、さらに実験結果の総括を図-15に示した。基本試験体 LA-1 のすべり荷重の平均値に対する母材応力を、孔控除した純断面について計算すると次のとおりである。

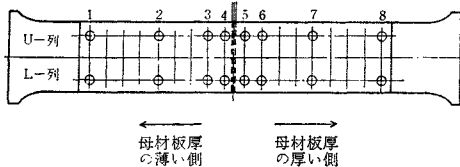
$$\begin{aligned} \text{すべり荷重平均値} &= (524+570+498+526)/4=530 \text{ t} \\ \text{母材応力} &= 530\,000/(36-22.8) \cdot 5=3\,490 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

(3) 考 察

小形試験体のすべり係数は、測定値全般について非常にばらつきが多い。一般にばらつきの要因としては、表面状態の不均一とボルト導入軸力の誤差があげられる。

表-3 大形試験体 (80 kg/mm²) の引張試験中のボルト軸力の変化

試験体	ボルトの列	ボルトの荷重 (t)	ボルト番号								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
LB-1	JP=270-120	U	-523	-238	-903	-1 378	-665	-523	-285	-475	
		L	-	-333	-641	-1 520	-380	-428	-356	-570	
	JP=300-150	U	-901	-478	-831	-1 235	-618	-618	-333	-498	
		L	-523	-380	-713	-1 568	-380	-523	-380	-593	
	JP=450-300	U	-	-570	-1 021	-1 378	-807	-475	-451	-499	
		L	-427	-451	-760	-1 544	-618	-641	-380	-452	
LB-2	JP=270-120	U	-713	-546	-713	-1 401	-618	-499	-618	-736	
		L	-1 140	-451	-641	-1 544	-356	-451	-475	-499	
	JP=300-150	U	-712	-570	-736	-1 378	-570	-523	-499	-285	
		L	-612	-570	-879	-1 686	-470	-712	-712	-641	
	JP=450-300	U	-642	-642	-879	-1 164	-736	-688	-736	-332	
		L	-523	-665	-807	-1 496	-523	-689	-499	-332	
LC-1	JP=270-120	U	-760	-428	-974	-1 496	-546	-546	-428	-1 425	
		L	-618	-404	-903	-1 401	-499	-499	-404	-303	
	JP=300-150	U	-688	-499	-997	-1 497	-617	-665	-546	-	
		L	-618	-428	-855	-1 330	-499	-546	-404	-	
	JP=450-300	U	-372	-594	-713	-1 092	-546	-665	-428	-	
		L	-427	-570	-688	-1 211	-451	-594	-332	-	
LC-2	JP=270-120	U	-546	-570	-689	-1 235	-523	-499	-499	-665	
		L	-641	-594	-784	-1 401	-594	-618	-570	-689	
	JP=300-150	U	-665	-594	-784	-1 188	-546	-546	-499	-741	
		L	-712	-594	-783	-1 354	-546	-618	-522	-642	
	JP=450-300	U	-665	-617	-926	-1 354	-665	-708	-594	-541	
		L	-760	-665	-1 093	-1 282	-712	-879	-370	-570	
LD-1	JP=270-120	U	-	-451	-1 116	-1 520	-333	-546	-428	-	
		L	-	-475	-1 449	-1 615	-	-618	-523	-	
	JP=300-150	U	-380	-452	-665	-1 520	-285	-570	-380	-370	
		L	-688	-452	-1 496	-1 567	-	-594	-1 045	-594	
	LD-2	JP=270-120	U	-713	-689	-903	-1 520	-665	-570	-523	-713
			L	-665	-784	-903	-1 710	-665	-594	-594	-665
JP=300-150		U	-712	-712	-950	-1 425	-665	-593	-499	-665	
		L	-618	-693	-855	-1 615	-617	-551	-399	-694	
JP=350-300		U	-451	-665	-1 330	-1 235	-736	-594	-617	-449	
		L	-	-779	-855	-1 805	-615	-684	-456	-541	
LE-1	JP=270-120	U	-	-522	-1 164	-1 330	-	-641	-451	-570	
		L	-	-665	-998	-1 306	-713	-499	-404	-760	
	JP=300-150	U	-475	-760	-1 140	-1 140	-	-665	-357	-499	
		L	-	-760	-1 064	-1 406	-404	-522	-427	-636	
	JP=450-300	U	-522	-498	-998	-998	-	-451	-451	-380	
		L	-	-618	-902	-1 207	-974	-570	-399	-504	



上表は荷重差 ΔP=150 t に対する軸力変化量 (kg) を示す。

項目	記号	試験体数	試験体	No.	μ	P_S (t)	σ_s / σ_y	$P_S / n P_0$	P_S / \bar{P}_{SA}
基本実験	LA-1	1体		No.1	0.480	524	0.442	0.774	0.990
				No.2	0.457	498	0.421	0.736	0.941
板厚差のある試験体による実験 (板厚差 2mm)	LB-1	1体		---	0.431	470	0.413	0.694	0.888
	LB-2	1体		---	0.528	576	0.506	0.851	1.088
	LC-1	1体		---	0.466	508	0.416	0.750	0.959
	LC-2	1体		---	0.612	668	0.587	0.987	1.262
板厚差のある試験体による実験 (板厚差 4mm)	LD-1	1体		---	0.396	432	0.396	0.638	0.816
	LD-2	1体		---	0.477	520	0.476	0.768	0.982
	LE-1	1体		---	0.471	514	0.470	0.759	0.971
	LE-2	1体		---	0.449	490	0.449	0.724	0.925

μ : すべり係数
 P_S : すべり荷重
 σ_s : P_S / A_n (A_n =純断面積)
 σ_y : 降伏点 (表-2 の平均値)
 n : 大形試験体のボルト数/小形試験体のボルト数
 P_0 : 小形試験体グループBのすべり荷重の平均値
 \bar{P}_{SA} : LA-1 のすべり荷重の平均値

図-15 大形試験体 (80 kg/mm² 鋼) の実験結果

しかし本実験の場合、前者については方法上からも時間的にも同じ条件で表面処理しボルト締め付けを行っているため、これらによる不均一性はあまり問題にならないと考えられる。また後者については、トルク計の読みによって軸力導入した試験体グループと、ストレインゲージの読みによって軸力導入した試験体グループのすべり係数の間に顕著な差は認められていない。したがってこれらからばらつきの原因を説明することは困難であって、結局ばらつきの原因としては鋼板の大板厚、高強度、高硬度のため接触面のなじみが悪く、接触面の微妙な局部条件によってすべり耐力がかなり影響をうけていることが考えられる。また、図-10 と 図-3 を対比すると明りょうであるが、80 kg/mm² 鋼板の継手の場合はすべりの開始点がはっきりしていない。小形試験体が衝撃を伴わずに静かにすべりおえた事実がここで裏付けされるわけであるが、このことはまた 80 kg/mm² 鋼の材料特性と関連しそうである。一般に 80 kg/mm² 鋼の応力-ひずみ曲線においては、降伏点および降伏後の平坦部（いわゆる“おどり場”）が認められない。こうした鋼材自身の特性も測定値のばらつきに関係しているように思われる。締め付け後 3 週間おいて実験したグループ C についてはすべり耐力が平均的に低下しているが、これはリラクゼーションによるボルトのゆるみも一因をなしているとも考えられる。以下の大形試験体とのすべり

耐力の比較検討においては、グループ B の平均値を小形試験体の代表値として用いる。グループ B を採った理由は、グループ B の試験体はボルト締め付けを大形試験体同様トルク計の読みによって行っていること、試験体体数が十分に多いことなどである。

大形試験体の実験結果をみると、まず基本試験体 LA-1 のすべり係数の平均値は、グループ B の小形試験体の平均値の 78% であり、SM 58 を用いた大形試験体の場合とほぼ等しい低下率を示している。このすべり耐力の低下は、前章 2. (3) で述べたとおなじく継手の大形化に伴うすべり耐力減と考える。次に何も処置をとらない試験体 2 種——LB-1 および LD-1——のすべり耐力は、基本試験体に比して明らかに減少している。添接板を 2 枚重ねにした試験体 2 種——LB-2 および LD-2——の場合は、この処置によって十分すべり耐力を回復しており、基本試験体と同等の強度を有している。同じく目違い部にテーパ処理を施した試験体 2 種——LC-1 および LE-1——の場合も、基本試験体に比してほぼ遜色のないすべり耐力を示している。引張試験中におけるボルト軸力の変化を表-3 にみると、荷重差 150 t に対してボルトの軸力は、第 2 および第 7 列目のボルトで最大 2% 程度減少していることがわかる。一方第 4 列のボルト軸力の減少が特に著しいのは、段違い部近傍の添接板に存在した局部的な板曲がり、引張荷重の増大に伴っ

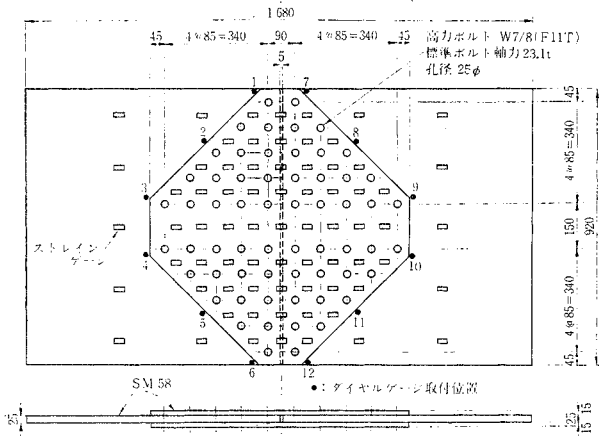


図-16 試験体 GB (SM 58) の形状および寸法
(全2体, ボルト数 30+30=60 本)

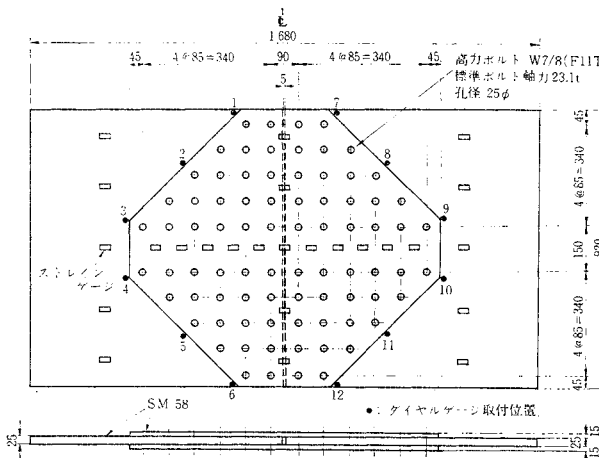


図-17 試験体 GC (SM 58) の形状および寸法
(全2体, ボルト数 40+40=80 本)

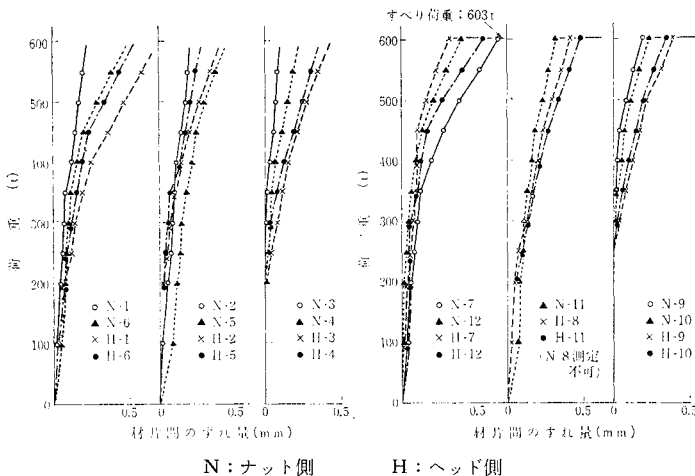


図-18 試験体 GB No. 1 (SM 58) の荷重-ずれ量曲線
(ダイヤルゲージ取付位置については図-16 参照)

て直線に近い状態にもどったために、この影響がボルト軸力に現われたものと考えうる。第3列にもこれに準じた傾向がみられる。

5. 菱形のボルト配置を有する SM 58 鋼板の継手

本実験は SM 58 鋼板の継手の研究の一環として、3. に記した目違い実験と同時期に行ったものである。

(1) 小形試験体によるすべり係数の測定

小形試験体については 3.(1) を参照されたい。

(2) 大形試験体によるすべり係数の測定

基本試験体 GA も 3. と共通である。GB は大型プレートガーダー橋のフランジ添接の試験設計をモデルにしたもので、高力ボルトが菱形に配置されている。ボルト数は GA と同じく $30 \times 2 = 60$ 本である。GC は GB 形と似た形状であるが、ボルトを一列増やしたことにより極端な菱形がやや緩和されていること、同じくボルト本数が $40 \times 2 = 80$ 本と多いことの2点で相違している(図-16, 17)。GB のような形状の継手耐力が基本試験体に比して低目に出ることは、当初からある程度予測された。そこで補強方法の検討とその効果の確認を目的として、GC 試験体を作成しすべり耐力を検定したものである。これらの試験体を使用した材料および試験体の作成要領は、3. に記したところと同じである。継手のすべりはいずれも大きな衝撃を伴って急激に発生した。最終すべりに達するまでの GB 試験体の荷重とずれ量の関係の一例を 図-18 に、実験結果の要約を 図-19 に示した。また 図-20, 21 に GB, GC 試験体の添接板両面外の応力の平均値を、それぞれ引張荷重 400 t および 300 t の状態で測定した結果を示した。

(3) 考 察

GB, GC 両試験体ともすべり係数が低下し、基本試験体 GA のすべり係数の 87 および 83% の値を示している。このすべり耐力の減少の原因について、まず定性的に検討してみる。GB 試験体の応力分布を試験体の幅方向にみると、添接板上での分布はやや不均等で外側に

項目	記号	試験体数	試験体と応力分布 (kg/cm ²)	No.	μ	P_S (t)	σ_s/σ_r	P_S/nP_0	$\mu/\bar{\mu}_A$
基本試験体 GA と同じ本数のボルトを菱形に配置した実験	GB	2 体	<p>高力ボルト：30本</p>	1	0.435	603	0.661	0.709	0.897
				2	0.408	565	0.619	0.664	0.841
				平均	0.422	584	0.640	0.686	0.870
ボルト本数を増してGB形継手を補強した実験	GC	2 体	<p>高力ボルト：40本</p>	1	0.398	735	0.805	0.648	0.821
				2	0.402	743	0.814	0.655	0.829
				平均	0.400	739	0.810	0.652	0.825

注 1) 記号は 図-8 参照

注 2) 図中の応力分布はそれぞれ GB No. 1 および GC No. 1 の荷重 400t および 300t における測定値を示す。

図-19 試験体 GB, GC (SM 58) の実験結果

近い部分の応力の落ち込みがみられ、これに対応して母材上の応力も山形の分布をなしている。しかし添接板両

側部におけるボルト数の少なさを考慮すると、この応力の落ち込みはむしろまだ少ないというべきで、結局両側付近のボルトが中央部のそれより余分に応力負担をしていることが明らかである。同じく添接板上の応力分布を縦方向にみると、各列とも応力変化の勾配は前後両端部に近づくにつれて急である。縦方向の応力勾配がより急なことは、その部分のボルトがより大きな応力伝達をしていることを意味している。これらの傾向は GC 試験体についても多少の差こそあれ大局的に変わらない。次に 図-18 の GB 試験体荷重-ずれ量曲線を、図-7 の基本試験体の場合と比較してみる。基本試験体のずれ量が荷重の増大につれて直線的に進行しそのまますべり荷重に達しているのに対して、GB 試験体の場合はずれ量が曲線を書いて加速し、最終すべり発生時のずれ量はすべり荷重の差を考えに入れると、基本試験体の 2 倍前後と大きくなっている。添接板縦横端部付近においてこの傾向が特に顕著である。以上の諸特徴から判断すると、菱形にボルト配置をした GB・GC 試験体においては、添接板左右両側および前後両端付近のボルトに伝達応力が集中していることがほぼ明白である。次にこの問題を数値的に検討した結果を要約する。まず添接板中央断面の応力総計を算出して外力荷重と対比してみると、かなり高い精度で両者が一致している。このことから判断してボルト孔周辺の応力の乱れの影響が測定点におよんでいることは特にないようであり、文献 1) の実験結果(図 4-38 (2), (3))もそれを裏づけている。次に 図-22 に区分けした各小区画について前辺

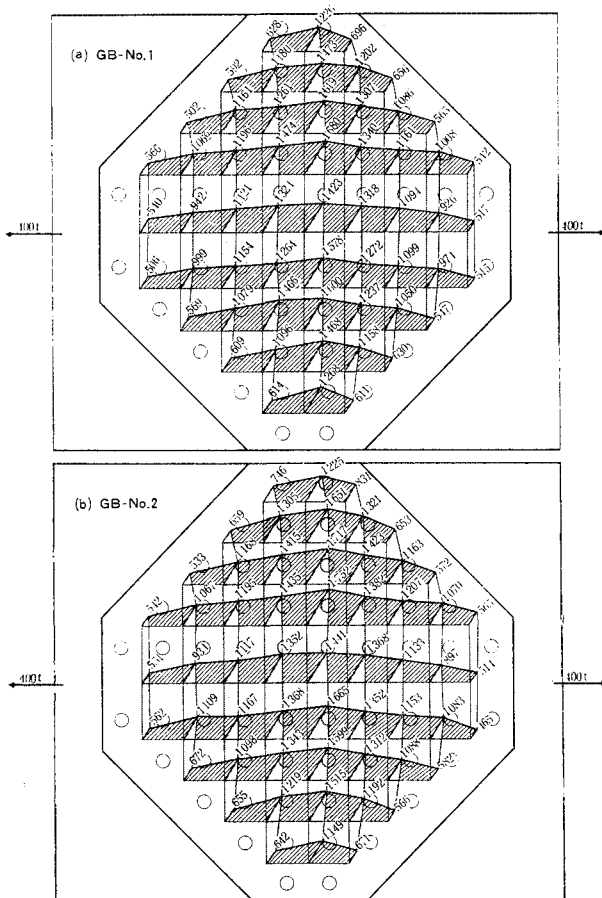


図-20 試験体 GB (SM 58) の添接板上の応力分布 (kg/cm²)

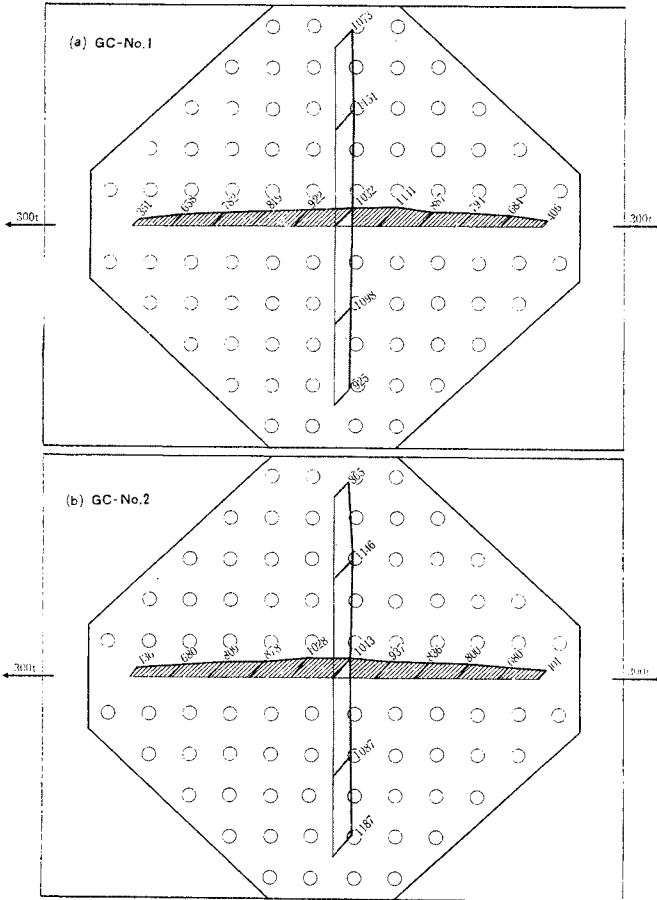


図-21 試験体 GC (SM 53) の添接板上の応力分布 (kg/cm²)

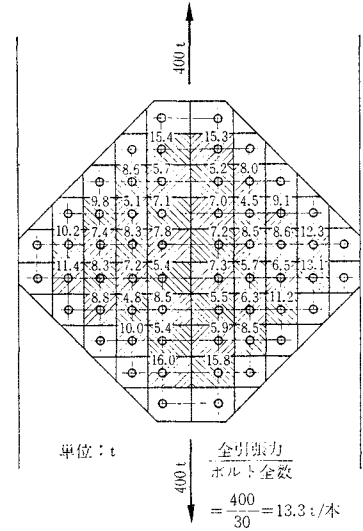


図-22 内域ボルト群応力伝達量 (試験体 GB No. 1)

の対象としたものである。図-23 は各断面のボルト群伝達量に対する内域ボルト群伝達量の差の形で外側ボルトの分担力を求め、全体を図化したものである。添接板縁端にそった最外側ボルト群と内域のボルト群の荷重負担比は 57% : 43% であり、これを各単位ボルト当り平均分担力で表わすと、17.1 t : 11.3 t となる。外域のボルトの伝達量集中傾向が明らかである。

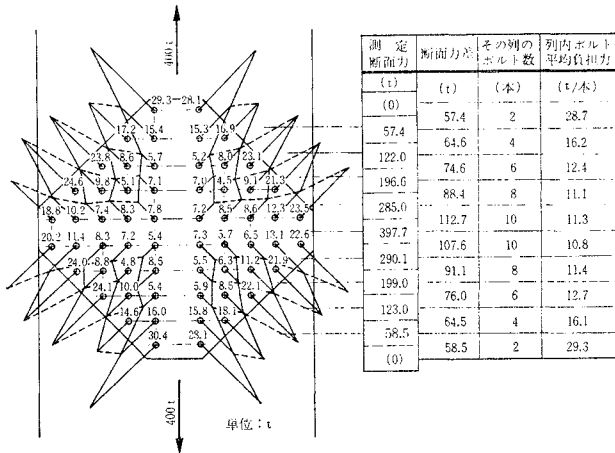


図-23 ボルトの応力伝達量の推定値 (試験体 GB No. 1)

後辺の応力を求め、その差から各ボルトの応力伝達量を算出した。その結果は同図中に記入した数値のとおりである。応力分布の把握の困難な添接板周辺部を避け、かなりの確実さで信頼のおける内域のボルト群のみを検討

6. 結 論

(1) 接合部における母材面間の目違いの影響

- もっとも条件の悪い 80 kg/mm² 鋼板の結果からみても、1 mm 程度の目違いは継手のすべり耐力に特に心配なく、道路橋示方書の条文の妥当性が裏付けされている。
- 2 mm 以上の目違いについては相応の処置が必要である。
- 構造上、目違いを生じる可能性があると思われる部材継手には、設計段階からこれを考慮して重ね添接板方式をとることが効果的である。
- 成品に目違いが発見され継手のすべり耐力低下が懸念される場合には、テーパ加工による手直しが効果的である。

(2) 菱形にボルトを配置した摩擦接合部の耐力

- 極端な菱形配置は継手のすべり耐力を減少させる。
- このようなボルト配置を採用する場合は、ボルト数を20%程度増すことにより、極端な菱形形状を緩和すると同時にボルトの平均伝達力に余裕をもたせてやる必要がある。

おわりに、本研究をまとめるにあたり本州四国連絡橋公団の田島博士から多くの助言をえたことを記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，技報堂，1966.
- 2) 多田・篠原・山木：80 キロ鋼部材の高力ボルト摩擦接合

について，第12回橋梁構造工学研究発表会，1965.

- 3) 建設省土木研究所：高力ボルト大型継手実験，土木研究所資料316号，1967.
- 4) 仲・加藤・吉本・吉野：スプライスプレートを用いた高張力ボルト摩擦接合部実験，日本建築学会関東支部第29回学術研究発表会，1961.
- 5) 加藤・吉本ほか：高張力ボルトによる摩擦接合継手の強度，製鉄研究（八幡製鉄KK），No. 248，1964.
- 6) 玉井清一・矢頭恒友：摩擦継手に関する一実験，第20回土木学会年次学術講演会，1965.
- 7) 成瀬輝男・遠田良喜：80 kg/mm²高張力鋼板の高力ボルト摩擦継手の実験的研究，石川島技報，11巻2号，1971.
- 8) 成瀬輝男・遠田良喜：60 kg/mm²高張力鋼板の高力ボルト摩擦継手に関する実験的研究，石川島播磨技報，13巻3号，1973.

(1973.8.22・受付)