

第2章 太径ボルトのすべり耐力試験

2.1 概要

本章では、板厚 50mm の鋼板の接合に太径ボルト(M36-175)あるいは長いボルト(M22-150)を用いた継手試験体、そして板厚 19mm の鋼板の接合に標準的なボルト(M22-85)を用いた継手試験体を作成した。これらの試験体を用いて、約 3 ヶ月間リラクセーション試験を行い、その後、すべり耐力試験を実施した。これらの結果をもとに、厚板鋼板の高力ボルト摩擦接合継手に対する太径ボルトおよび長いボルトの適用性について検討した。

2.2 試験体

2.2.1 試験体形状およびパラメータ

本試験で使用した鋼材および高力ボルトの機械的性質を表-2.1 と表-2.2 に示す。また、試験体の形状を図-2.1 に、そして試験体の種類を表-2.3 に示す。

M36A, M36B, M22A と M22B 試験体の母板には板厚 50mm, 連結板には 28mm の鋼材を用いている。また, M22C 試験体の母板には板厚 19mm, 連結板には 12mm の鋼板を用いている。鋼材の種類はいずれも SM490A である。使用ボルトは, M36A と M36B 試験体で首下長さが 175mm の F10T-M36(太径ボルト), M22A と M22B 試験体では首下長さ 150mm の F10T-M22(長いボルト)である。また, M22C 試験体では, 標準的な首下長さ 85mm の F10T-M22 を用いている。なお, M22C 試験体で用いたボルト(M22)の有効断面積と有効締め付け長さ(12+19+12=43 mm)の比は, M36A と M36B 試験体(M36, 106mm)と同じになるように設定している。以上 5 種

表-2.1 使用鋼材の機械的性質および化学成分

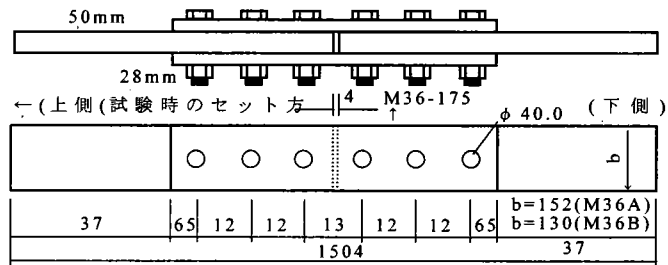
鋼種	試験体 タイプ	適用 場所	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)				
				降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
SM490A	M36A,M36B	母板	50	323	526	34	0.18	0.37	1.43	0.015	0.004
		連結板	28	399	539	28	0.17	0.36	1.34	0.015	0.004
	M22A,M22B	母板	19	386	536	27	0.17	0.34	1.35	0.014	0.003
		連結板	12	355	516	25	0.17	0.32	1.23	0.013	0.004

表-2.2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値

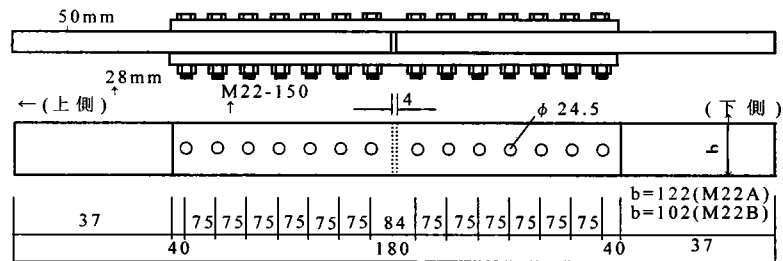
等級	ボルト径	首下長さ (mm)	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
			4号試験片				製品		製品	製品	
			降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	
F10T	M36	175	1028	1073	18	68	888	33	-	-	0.131
	M22	150	1057	1092	18	66	325	32	26	39	0.130
	M22	85	1075	1107	18	66	330	33	27	40	0.135

表-2.3 試験体パラメータ

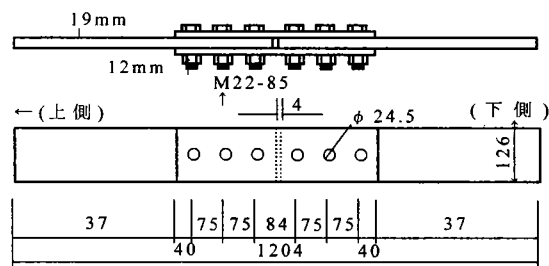
試験体 タイプ	ボルト			母板(mm)		β値
	使用ボルト	ボルト種別	本数	板厚	幅	
M36A	M36-175	太径ボルト	3	50	152	0.8
M36B					130	1.0
M22A	M22-150	長いボルト	7		122	0.8
M22B					102	1.0
M22C	M22-85	標準ボルト	3	19	126	0.8



(a) M36A, M36B 試験体



(b) M22A, M22B 試験体



(c) M22C 試験体

図-2.1 試験体形状

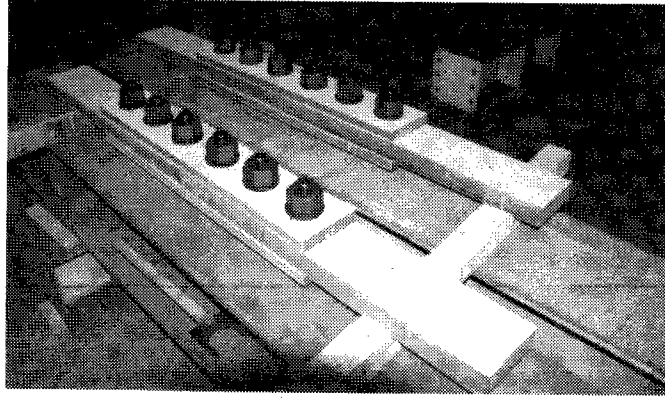


写真-2.1 M36A 試験体

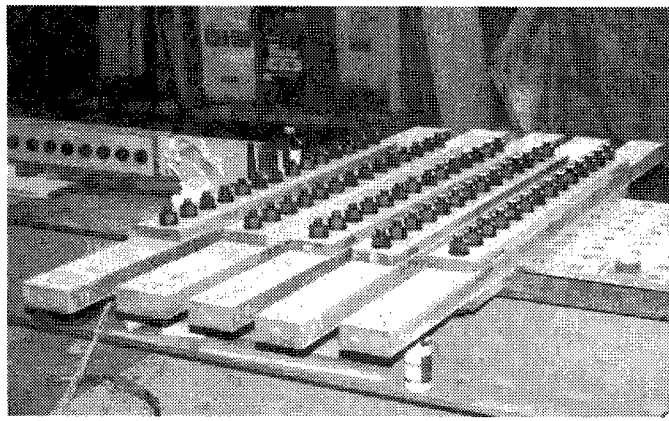


写真-2.2 M22A, M22B 試験体

類で各種類 3 体ずつの試験体，計 15 体の試験体を作成し，すべり耐力試験に供した．太径ボルトおよび長いボルトの試験体をそれぞれ写真-2.1, 2.2 に示す．

各種試験体の幅は式(1)を用いて，設計上のすべり/降伏耐力比(以後， β 値と呼ぶ)が，0.8 および 1.0 となるように設定した．その際に用いた各値は式(1)の下に示すとおりである．ボルト孔の縁端距離，ボルト中心間隔あるいは孔径などは，M22 については道路橋示方書，M36 については本州四国連絡橋公団基準²⁾に従い，図-2.1 に示すサイズとした．

$$\beta = \frac{P_s}{P_y} = \frac{\mu \cdot m \cdot n \cdot N_d}{A_n \cdot \sigma_y} \quad \dots \dots (1)$$

β ：すべり耐力／降伏耐力比

P_s ：すべり耐力 P_y ：降伏耐力 μ ：すべり係数 $\{\mu=0.4\}$

m ：接触面数 $\{m=2\}$ n ：ボルト本数 $\{n=3 \text{ (M22A,B では 7)}\}$

N_d ：設計ボルト軸力 $\{205.5\text{kN(M22)}, 551.5\text{kN(M36)}\}$

A_n ：純断面積 $\{A_n=(\text{試験体幅}-\text{孔径}) \times \text{板厚}\}$

σ_y ：降伏強度の基準値 $\{295\text{N/mm}^2(50\text{mm}), 315\text{N/mm}^2(19\text{mm})\}$

切断・孔明け以降の作業は、図-2.2 に示す流れで、試験体の作成および各試験を実施した。

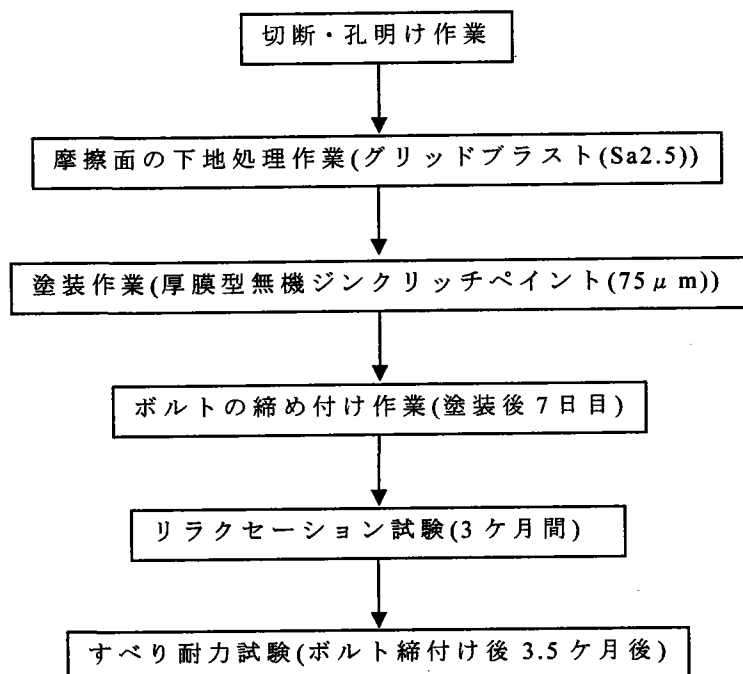


図-2.2 試験体製作および各試験のフロー

2.2.2 摩擦面の表面処理

摩擦面の下地処理はグリッドブラストを Sa2.5 で行い、その後、塗膜厚 75 μ m を目標とし、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した。

表-2.4 に塗膜厚計測結果を示す。ここでは、塗膜厚計 LE-900 を用いて、母板および連結板のそれぞれ表裏面を各 3 回計測し、端部から第 1 ボルトと第 2 ボルトの中間点を計測した。表-2.4 は、各計測位置を平均した値を示しており、計測結果は、目標の 75 μ m より高い値を示していた。

表-2.4 塗膜厚計測結果

試験体	膜厚 (μ m)		上側・下側の平均値
	上側	下側	
M36A1	91.2	87.5	89.4
M36A2	83.9	86.9	85.4
M36A3	74.2	83.8	79.0
M36B1	88.6	93.2	90.9
M36B2	83.2	87.9	85.6
M36B3	90.7	98.4	94.6
M22A1	99.8	91.9	95.9
M22A2	90.5	85.8	88.2
M22A3	106.6	92.1	99.4
M22B1	88.6	102.8	95.7
M22B2	90.9	102.6	96.8
M22B3	85.6	93.1	89.4
M22C1	100.8	100.6	100.7
M22C2	81.6	90.8	86.2
M22C3	93.6	91.7	92.7

2. 2. 3 ボルトの締め付け作業

ボルトの締め付け作業は、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布後、1週間乾燥させた後に行った。締め付けの手順は道路橋示方書に従い、両サイドの母板の内側から順次行った。また、一旦設計ボルト軸力の6割程度に締め付けた後、最終的にはリラクセーションを考慮して設計値の1割増しの軸力が導入されるように締め付けた。締め付けの管理はトルク法であり、締め付け器具はM22に対してトルクレンチ、M36に対してはパワーレンチ(12-600P)を用いた。締め付け状況を写真-2.3、2.4に示す。

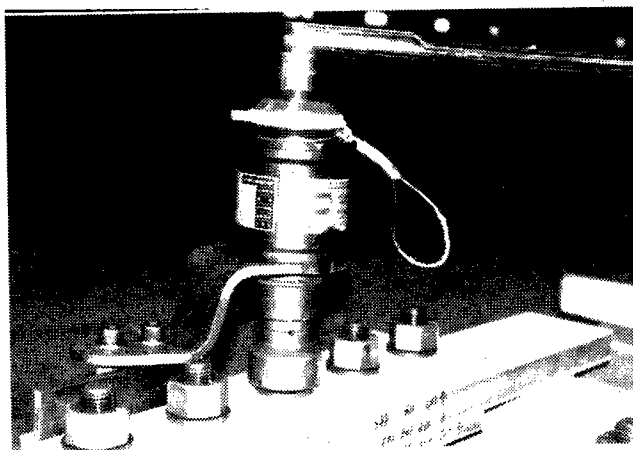


写真-2.3 パワーレンチによる M36 のボルト締め付け状況

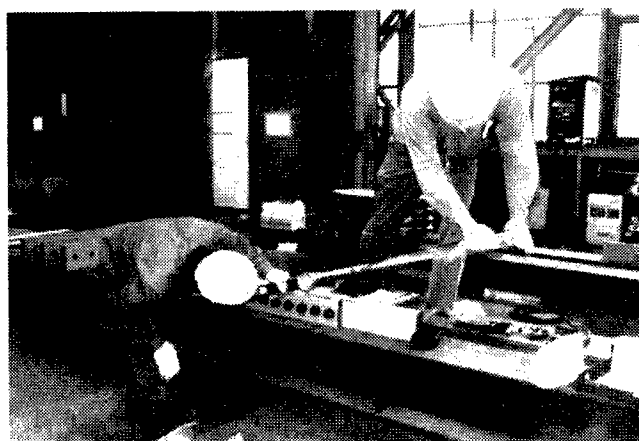


写真-2.4 トルクレンチによる M22 のボルト締め付け状況

2. 3 リラクセーション試験

2. 3. 1 試験方法

M36-175(M36A1), M22-150(M22A1)および M22-85(M22C1)の各 1 体の試験体について締め付け後のボルト軸力の経時変化を調べた。計測したボルト本数は、各 6 本、合計 18 本とした。ボルト軸力は、ボルト軸部の対称な位置に 2 枚のゲージを貼付し、それらのゲージ出力(ひずみ値)の平均値に鋼のヤング率($2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)を乗じることによって求めた。その際、ボルトの頭には 2 個の孔を明け、この孔にひずみゲージのリード線を通してゲージをひずみ測定器に接続している。ボルト軸部のひずみゲージの位置は、試験体に組み立てた際に、母材板厚中央となるようにした。ボルト軸力の計測期間は 90 日とした。計測状況を写真-2.5 に示す。



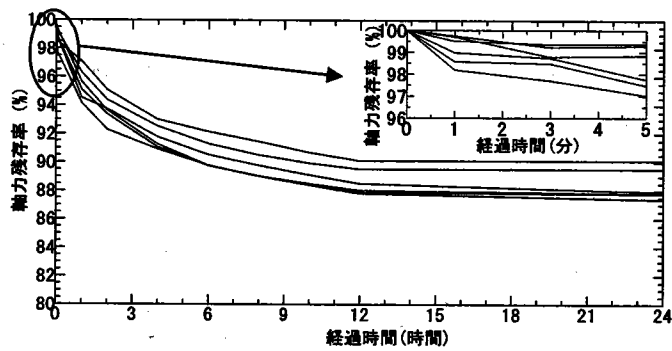
写真-2.5 リラクセーションの計測状況

2. 3. 2 試験結果

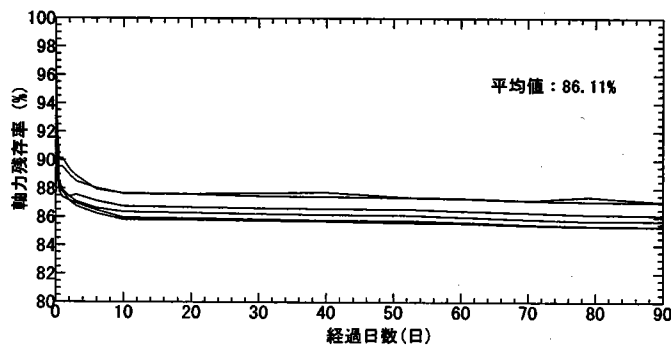
リラクセーション計測結果を図-2.3～図-2.5 に示す。図の縦軸は、測定した軸力を初期ボルト軸力で無次元化した残存軸力率である。図中には、M36A-175, M22A1-150, M22-85 それぞれ各 6 本のボルト計測結果を示している。

ボルトの違い (M22 と M36, 首下長さ 175mm・150mm と 75mm) による軸力低下傾向の差異は、特に軸力導入初期で顕著であった。計測初期(5 分間程度まで)において、ボルト首下の長い M36-175 および M22-150 のボルト軸力の低下に比べて、ボルト首下の短い M22-85 での低下は急激である。その後、いずれの試験体のボルトにおいてもそれらの軸力は締め付け後 12 時間程度まで徐々に低下し、12 時間後は経過時間に伴うボルト軸力の変化は非常に小さくなっており、10 日目以降ではほとんど変化は認められない。各試験体での最終的なボルト軸力残存率の平均値は、M36-175 で 86.1%, M22-150 で 85.7%, M22-85 で 81.9%であった。

以上のように、ボルト径 (M36 と M22) の違いによりボルト軸力低下の差異は認められない。しかし、ボルト首下長さ(締め付け長さ)が長い場合(150mm)には、短いもの(85mm)に比べてボルト軸力の低下は少ない。

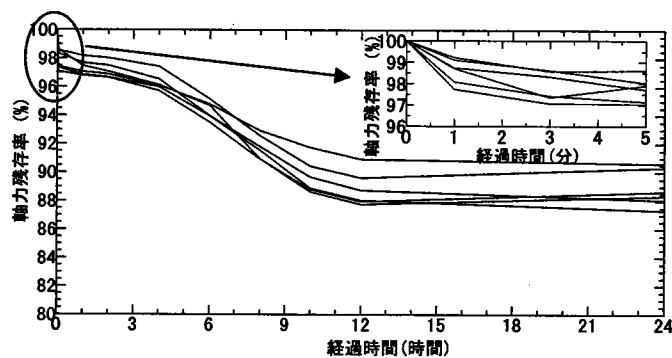


(a) 経過時間 24 時間以内

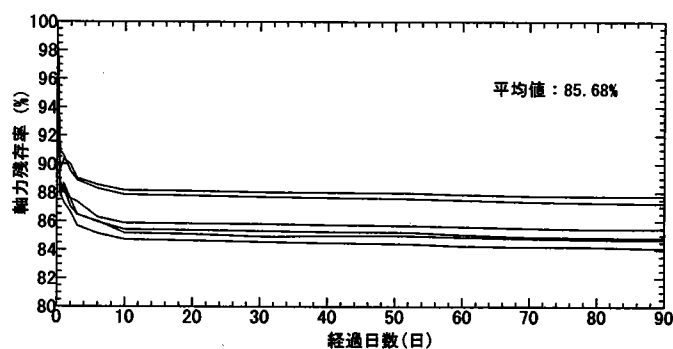


(b) 経過日数 90 日間

図-2.3 M36-175 (M36A1 試験体) のリラクゼーション試験結果

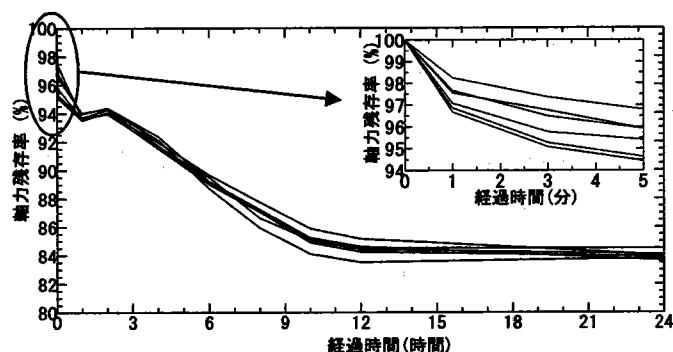


(a) 経過時間 24 時間以内

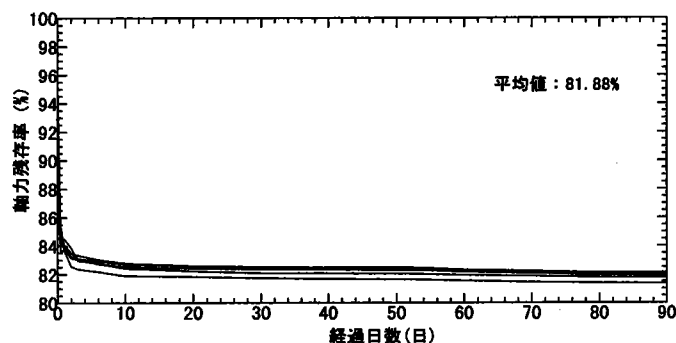


(b) 経過日数 90 日間

図-2.4 M22-150 (M22A1 試験体) のリラクゼーション試験結果



(a) 経過時間 24 時間以内



(b) 経過日数 90 日間

図-2.5 M22-85(M22C1 試験体)のリラクゼーション試験結果

2. 3. 3 残存軸力の違いの考察

ここで測定した各試験体のボルト軸力低下率は、一般に知られているより大きく、また、ボルト長さが短い方が残存軸力は小さくなることを示した。本項では、これらの結果を考察する。

リラクゼーションは、一般に接触面の影響を受ける。これは、接触面が柔らかいものであれば、ボルト締め付けによって接触面が局部的に押しつぶされ、ボルト締め付け長さが極微量であるが短くなることによって生じる。当然のことであるが、塗装面はブラスト面より押しつぶされる量が多く、さらに、塗装厚が厚いほど顕著となり、リラクゼーションも大きくなる。一般に、残存軸力は、ブラストを施した場合で約 95%、無機ジンクリッチペイントを施した場合では約 90%程度であるが、本試験ではこれより低い値となった。これは塗装膜厚の影響が生じていたことが考えられ、計測した試験体の塗装膜厚は、標準膜厚(75 μ m)より高めに分布していたことが 1 つの要因と考えられる。藤原⁸⁾らも塗膜厚 75 μ m の鋼板を用いて試験を行なっているが、本試験と同様に 86%程度になる結果を示している。特に、M22C1 試験体では塗装膜厚が 100 μ m と最も高く、残存軸力も 82%と最も低かった。

次に、ボルト長さが短い方が残存軸力が小さくなった理由として、接触面の影響から生じるボルト締め付けによる収縮量は、ボルト長さに関わらず一定であり、ボルト長さが短ければ、単位ボルト長さにおける収縮量は大きくなる。これによって、ボルト長さが短い方が、残存軸力が小さくなったものと考えられる。

2. 4 すべり耐力試験

2. 4. 1 試験方法およびひずみ計測の概要

すべり耐力試験は、ボルト締め付け作業から 3.5 ヶ月後に実施した。試験には荷重能力 4000kN の万能試験機 UH-400A を用い、試験体両端部からそれぞれ 150mm までの範囲を試験機のチャックではさみ、試験体のすべりと全断面降伏の双方が生じるまで引張荷重を徐々に載荷した。載荷状況を写真-2.6 に示す。

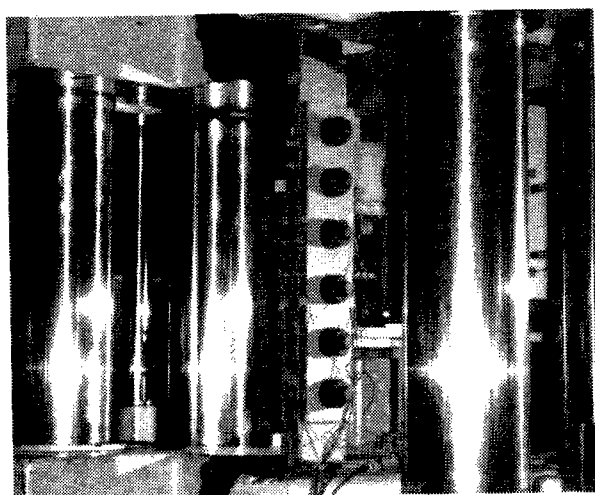


写真-2.6 載荷状況 (M36A1)

すべり耐力試験時には各種ひずみ計測を行った。測定項目としては、母板間の開口変位、継手側面のひずみおよびボルト軸力を計測した。変位計およびひずみゲージの貼付位置を図-2.6 に示す。開口変位は母材間にクリップゲージを用いて測定し、左右の 2 箇所を計測した。ひずみゲージ(ゲージ長 2mm)は、孔引きのない連結板端部から 100mm 離れた母板、孔引きのある第 1 ボルト(最端部のボルト)位置の母板にすべての試験体の左右面に取り付けた。また、各試験体タイプ 3 体中 1 体のみ第 3 ボルト(M22A,M22B 試験体では第 7 ボルト)の連結板にもひずみゲージを取り付けた。さらに、リラクセーション試験と同様に M36A,B 試験体では、それぞれ 2 体ずつ試験体のボルト(24 本)にひずみゲージを取り付け、荷重とボルト軸力の低下値の関係も調べた。なお、M22A,C 試験体では、リラクセーション試験を行った試験体のみボルト軸力の計測を行った。

計測データは、弾性域では試験機の荷重を目安に 20kN ごとに取り込み、降伏荷重またはすべり荷重に近づくと 10kN あるいは 5kN ごとにデータを取り込んだ。

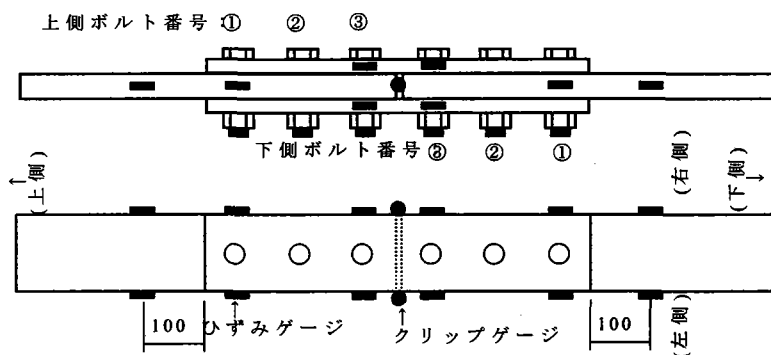


図-2.6 開口変位およびひずみ計測位置

表-2.5 すべり耐力試験結果

試験体		上側および下側の各すべり試験結果							はじめにすべりが発生した側での評価					
		降伏耐力		すべり耐力		限界 状態 区分	すべり / 降伏 耐力比	すべり 係数 (μ)	降伏 耐力 P _y (kN)	すべり 耐力 P _s (kN)	すべり/降伏 耐力比(B)		すべり係数(μ)	
		荷重値 P _y (kN)	上下の 荷重差	荷重値 P _s (kN)	上下の 荷重差						各試験 体	平均	各試験 体	平均
M36A1	上側	2042.9	0.02%	2049.3	0.66%	○	1.003	0.619	2042.5	2035.7	0.997	1.019	0.615	0.625
	下側	2042.5		2035.7		△	0.997	0.615						
M36A2	上側	2016.1	1.19%	2015.8	1.35%	△	1.000	0.609	1992.1	1988.6	0.998	1.019	0.601	0.625
	下側	1992.1		1988.6		△	0.998	0.601						
M36A3	上側	2048.2	0.03%	2177.9	1.19%	○	1.063	0.658	2048.2	2177.9	1.063	1.117	0.658	0.663
	下側*	2048.8		2151.9		○	1.050	0.650						
M36B1	上側	1679.0	1.36%	1916.5	2.26%	○	1.141	0.579	1656.2	1960.9	1.184	1.159	0.579	0.583
	下側	1656.2		1960.9		○	1.184	0.593						
M36B2	上側	1667.5	2.08%	1902.9	1.84%	○	1.141	0.575	1667.5	1902.9	1.141	1.159	0.575	0.583
	下側	1702.9		1938.6		○	1.138	0.586						
M36B3	上側	1703.3	2.35%	1963.3	3.34%	○	1.153	0.593	1703.3	1963.3	1.153	1.117	0.593	0.663
	下側*	1663.2		1897.8		○	1.141	0.574						
M22A1	上側	1705.8	2.19%	1817.8	2.13%	○	1.066	0.635	1705.8	1817.8	1.066	1.117	0.635	0.663
	下側	1668.5		1857.3		○	1.113	0.649						
M22A2	上側	1700.7	1.01%	1956.6	3.66%	○	1.150	0.683	1700.7	1956.6	1.150	1.117	0.683	0.663
	下側*	1683.6		1885.0		○	1.120	0.658						
M22A3	上側	1694.1	0.49%	1920.4	1.09%	○	1.134	0.671	1694.1	1920.4	1.134	1.146	0.671	0.568
	下側*	1685.8		1899.5		○	1.127	0.663						
M22B1	上側	1351.1	1.36%	1661.9	0.09%	○	1.230	0.580	1369.7	1660.4	1.121	1.146	0.580	0.568
	下側	1369.7		1660.4		○	1.121	0.580						
M22B2	上側	1351.5	1.13%	1602.9	2.81%	○	1.186	0.560	1351.5	1602.9	1.186	1.146	0.560	0.568
	下側	1367.0		1649.2		○	1.206	0.576						
M22B3	上側	1422.7	2.49%	1610.3	0.84%	○	1.132	0.562	1422.7	1610.3	1.132	1.017	0.562	0.612
	下側*	1387.3		1596.7		○	1.151	0.558						
M22C1	上側*	769.48	5.19%	755.03	1.64%	□	0.981	0.615	729.54	767.60	1.052	1.017	0.626	0.612
	下側	729.54		767.60		□	1.052	0.626						
M22C2	上側	734.93	1.67%	733.29	3.32%	△	0.998	0.598	734.93	733.29	0.998	1.017	0.598	0.612
	下側*	722.65		708.97		△	0.981	0.578						
M22C3	上側	751.77	1.84%	752.22	3.53%	○	1.001	0.613	751.77	752.22	1.001	1.017	0.613	0.612
	下側*	737.93		725.66		△	0.983	0.591						

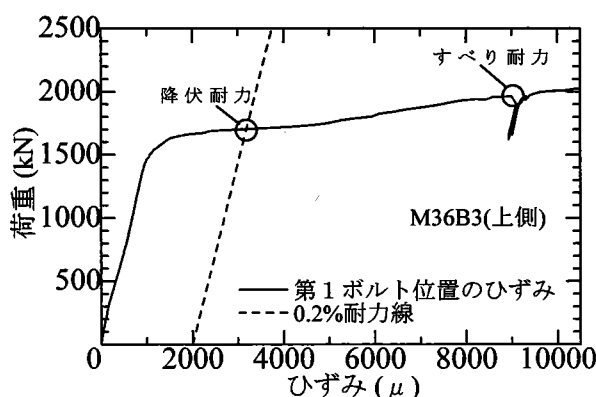
*:先にすべった側より後ですべった側の方がすべり荷重が小さくなるケース。
 限界状態区分 ○:降伏先行型 △:すべり降伏同時型 □:すべり先行型

2. 4. 2 すべり耐力および降伏耐力の定義

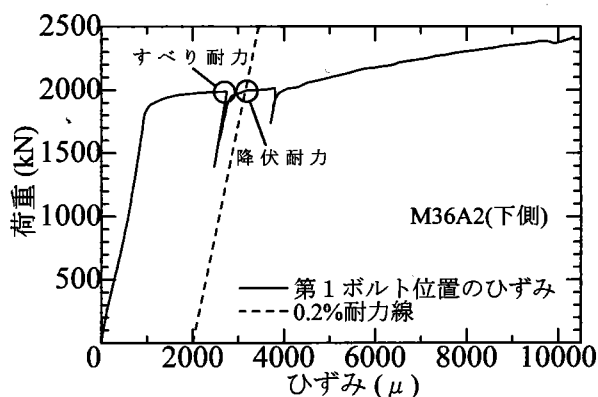
すべり耐力試験の集計結果を表-2.5 に示す。

降伏耐力は、図-2.7 に示す第1ボルト母板での計測結果(詳細は図-2.11 で説明)において、弾性域における荷重-ひずみ関係から最小自乗法で各試験体の荷重-ひずみ直線を求め、荷重 0 で 0.2%ひずみの点からこれに平行な線を引き、この 0.2%耐力線と降伏後の荷重-ひずみ曲線との交点を降伏耐力と定義した。

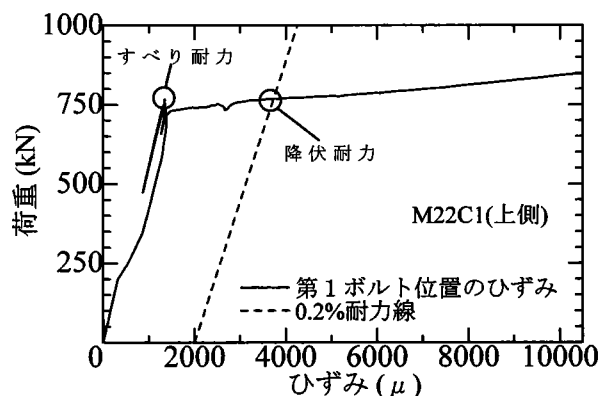
すべり耐力は、継手部がすべった時に大きな音が発生し荷重が下がるか、または音が発生しなくても、荷重が急激に下がり開口変位が大きくなったときとした。図-2.9 には荷重と開口変位の関係を示すが、例えば M22C1(図-2.9(c))では、初めに 767.6kN の荷重で下側がすべりを開始した。その後、755.0kN の荷重で上側がすべった。上側では一度は 767.6kN まではすべりが発生せず、その後この荷重



(a) 降伏先行型(M36B3 上側)



(b) すべり降伏同時型(M36A2 下側)



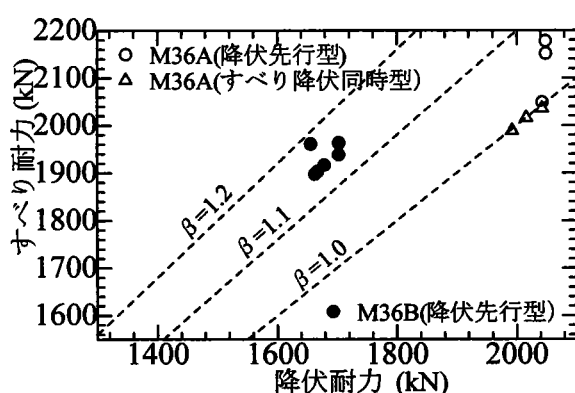
(c) すべり先行型(M22C1 上側)

図-2.7 継手の限界状態区分

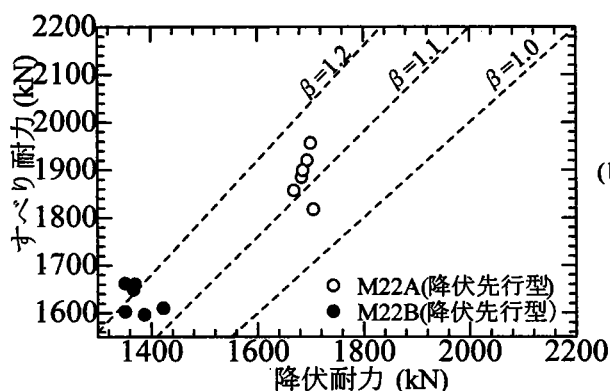
より低い値ですべりが開始するケースもあった。このようなケースでは、試験体上側のすべり耐力を最大荷重 767.6kN とすべきとも考えられるが、未だ統一した整理法はないため、ここではすべりが開始した時点の荷重 755.0kN をすべり耐力とした整理を行なっている。なお、約半数の試験体(表中の*印)では、先にすべった側より後にすべった側の方がすべり耐力が小さくなるケースが見られた。また、表-2.5 には始めにすべった側ですべり耐力を評価した結果も示している。この表に示すように、整理法によるすべり耐力の違いは 4% 以下である。図-2.13~2.17 では、各継手試験体の上側と下側で測定したデータ両方を示している。

2. 4. 3 継手の限界状態区分および β 値

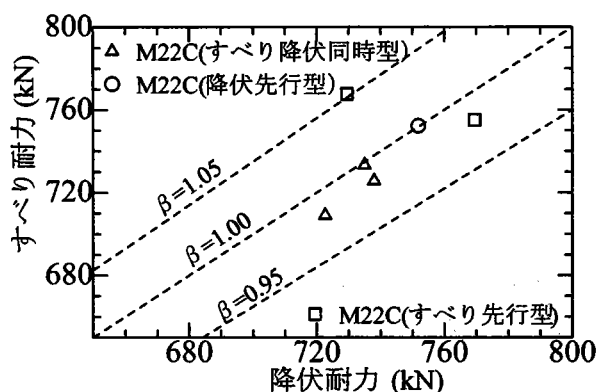
本報告では、継手の限界状態を 3 つに区分して、以降の考察を行うこととした。図-2.7(a)に示すように、降伏耐力(0.2%耐力点)がすべり耐力よりも早く発生した



(a) M36-175(M36A, M36B 試験体)



(b) M22-150(M22A, M22B 試験体)



(c) M22-85(M22C 試験体)

図-2.8 すべり耐力と降伏耐力の関係

場合を降伏先行型継手とした。次に、図-2.7(b)に示すように、すべりが生じた時は、鋼材は降伏域に入っているが、降伏耐力の前にすべり耐力となった場合をすべり降伏同時型継手と呼ぶこととした。なお、ここで定義したすべり降伏同時型継手では、先に降伏現象が見られることを考慮すれば、降伏先行型と定義すべきとも考えられるが、すべり耐力より降伏耐力が大きく、 β 値も 1.0 未満となることなどの理由から、降伏先行型とは区分した。図-2.7(c)に示すように、すべり耐力に至ったときには母板は弾性域であり、一度荷重とひずみはともに減少し、その後母板が降伏する。このような継手をすべり先行型継手と呼ぶこととした。

図-2.8 に各試験体の限界状態を考慮したすべり耐力と降伏耐力の関係を示す。試験体計画時、 β 値は M36A1, M22A1, M22C1 試験体で 0.8, M36B1, M22B 試験体では 1.0 として設計したが、実験結果においては、前者で約 0.98~1.15, 後者で

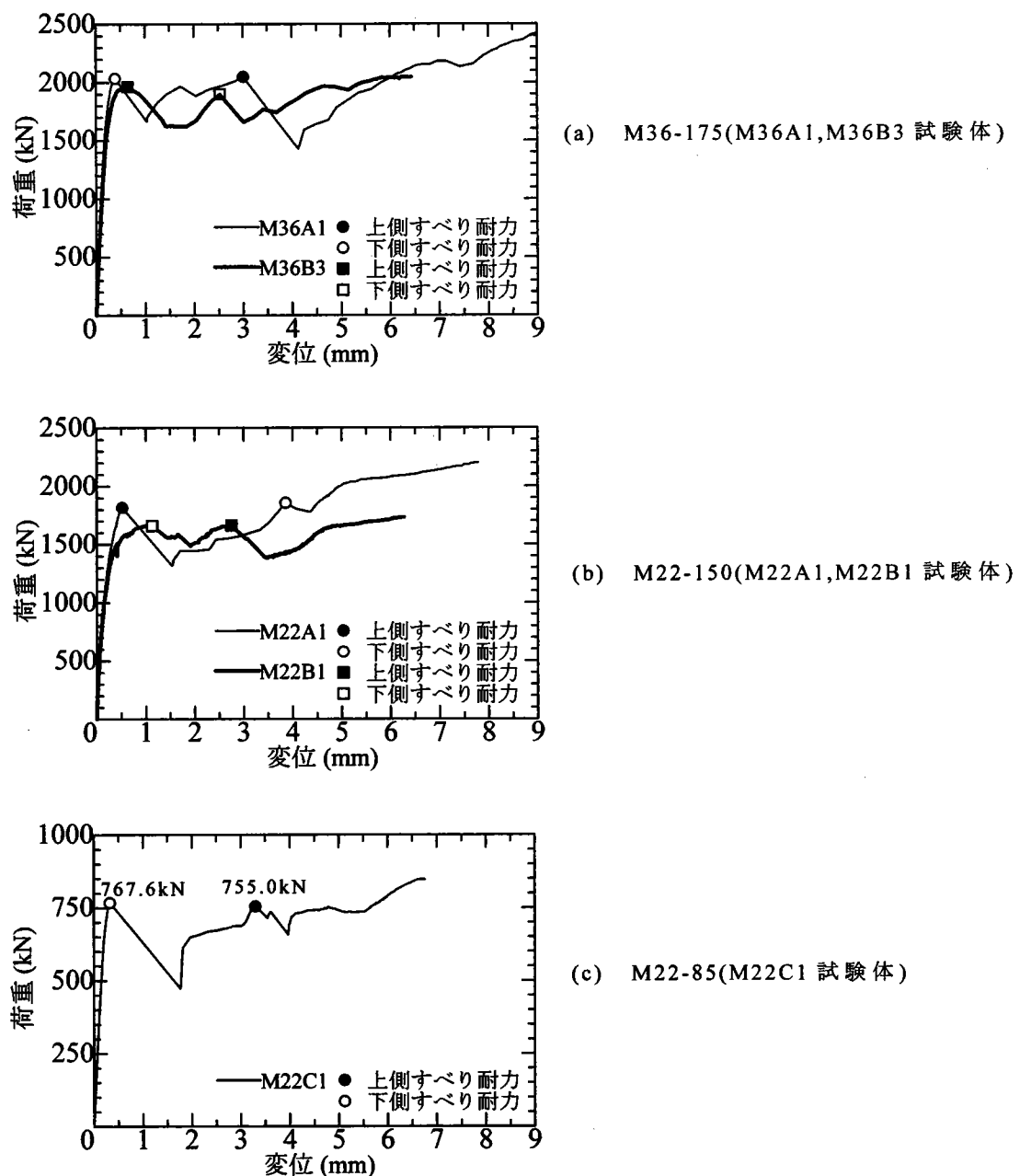


図 2.9 荷重と開口変位の関係

1.12~1.23 となった。これは、計画時でのすべり係数を 0.4 で行ったが、実験でのすべり係数が 0.6 程度と非常に高かったことで、 β 値も想定していた以上に高くなった。この影響もあって各試験体の限界状態区分としては、すべり先行型継手は M22C1 のみで、すべり降伏同時型継手は M36A1(下側), M36A2, M22C2, M22C3 (下側) であり、その他の試験体では、降伏先行型継手となった。なお、M22C1 の下側は、 β 値が 1.0 を超えているにも関わらずすべり先行型継手としたのは、図-2.11 に示すように、すべりを開始したのは明らかに弾性域であるが、すべりが生じると、荷重は一旦減少し、その後、すべり耐力よりも低い値で降伏したためである。

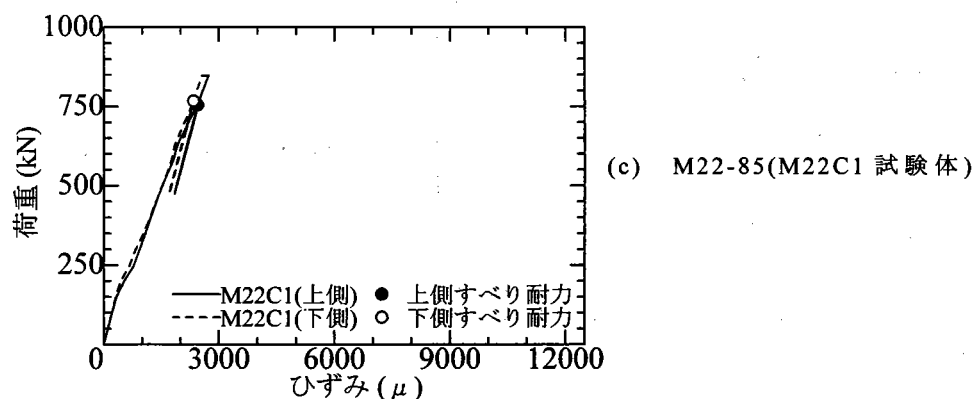
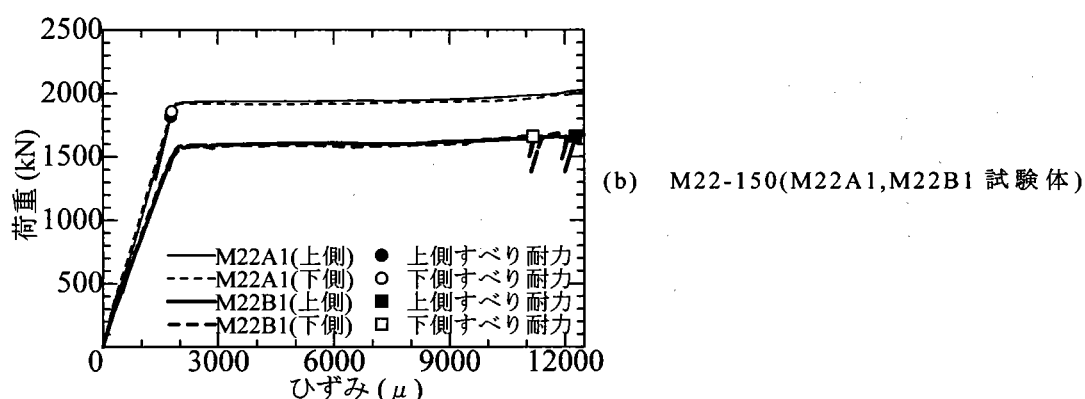
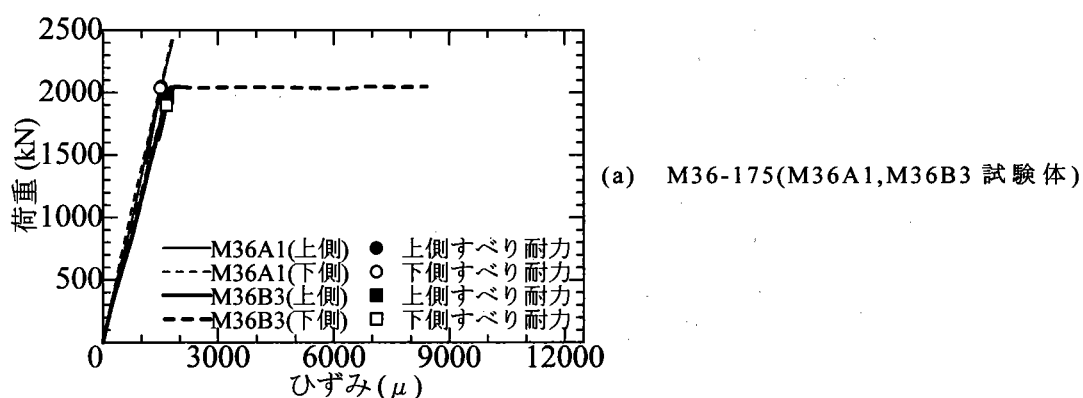


図-2.10 荷重とひずみ(母板 100mm 位置)の関係

2. 4. 4 ひずみ計測およびすべり耐力試験結果

すべり耐力試験におけるひずみ計測結果の一例を図-2.9~2.13に示す。これらの結果は、試験体およびボルトに貼り付けたゲージ左右両側2つのひずみデータの平均値を示している。なお、試験体タイプの違いによるひずみ挙動の差異を明確にするため、図-2.9~2.13には、5タイプの試験体各1ケースずつ図示した。なお、本章の文末には、全ひずみデータを示した。

a) 荷重と開口変位の関係

荷重と開口変位の関係を図-2.9に示す。すべり降伏同時型あるいはすべり先行型継手のM36A1, M22C1では、荷重の増加に伴って開口変位は徐々に大きくなり、0.35mm程度の変位の時に上側あるいは下側いずれか一方がすべりを開始し、荷重が大きく低下する。その後はすべり(片側一方での)を伴いながら荷重は上昇し、

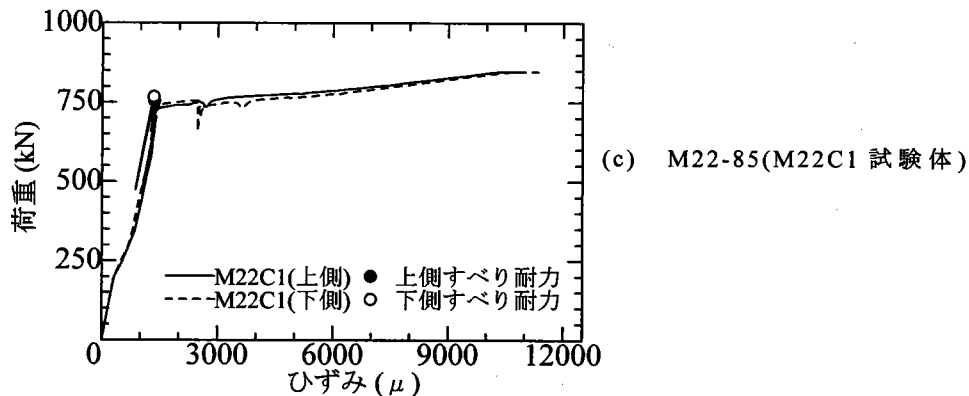
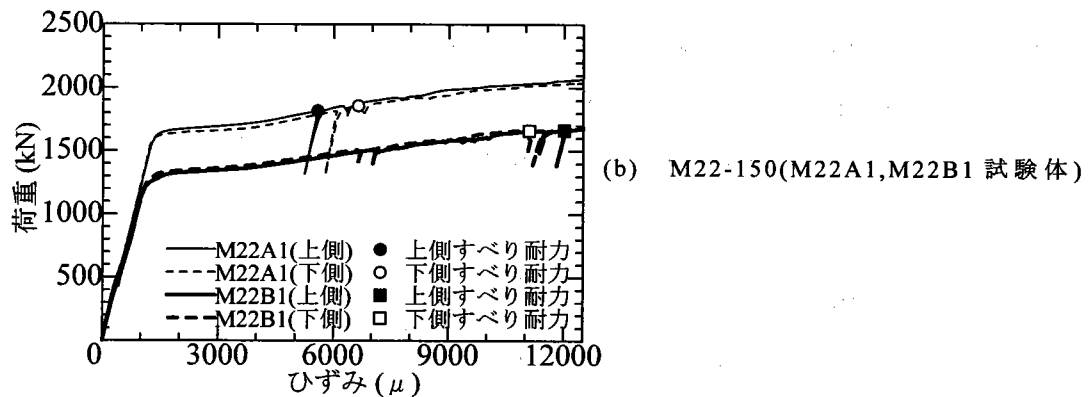
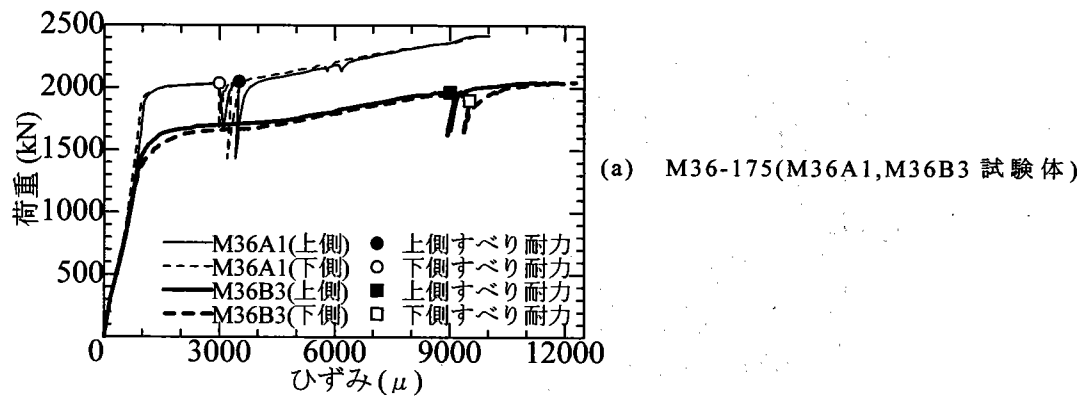


図-2.11 荷重とひずみ(母板第1ボルト位置)の関係

もう一方がすべりを開始する。再度、荷重は大きく低下し、その後もすべり(両側での)を伴いながら荷重は上昇する。一方、降伏先行型継手の M36B, M22A, M22B では、すべり降伏同時型継手(すべり先行型も含めて)よりすべりが生じるときの変位が若干大きいことが判る。また、すべり降伏同時型継手では、変位に大きな変化がほとんどない状態で突然すべりだすのに対し、特に β 値が大きい降伏先行型継手(M36B, M22B)ではすべる直前で、ある程度変位が進んだ後にすべりが発生していることが判る。

b) 荷重とひずみ(母板 100mm 位置)との関係

連結板から 100mm 離れた位置での母板ひずみと荷重の関係を図-2.10 に示す。これらの結果に示すように、孔引きのない母板において、M22C1, M36A1 は母板では弾性域であったが、降伏先行型継手では降伏域に達しており、降伏が起これ

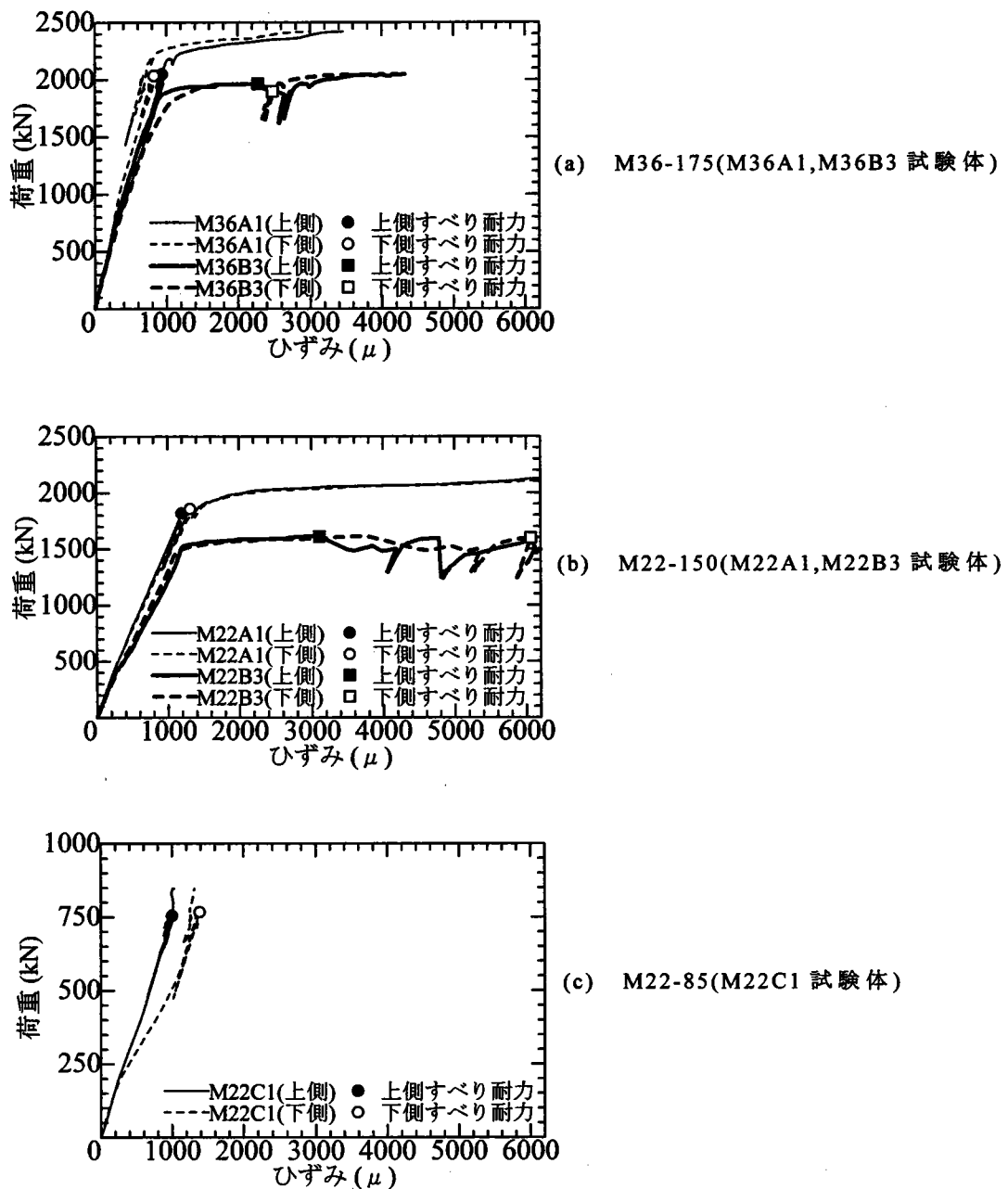


図-2.12 荷重とひずみ(連結板第3ボルト位置)の関係

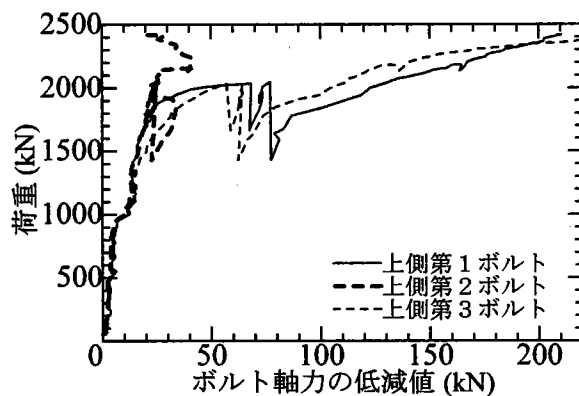
ば，ひずみの増加は著しいが荷重の変化はほとんどないという状態であった。

c) 荷重とひずみ(母板第1ボルト位置)との関係

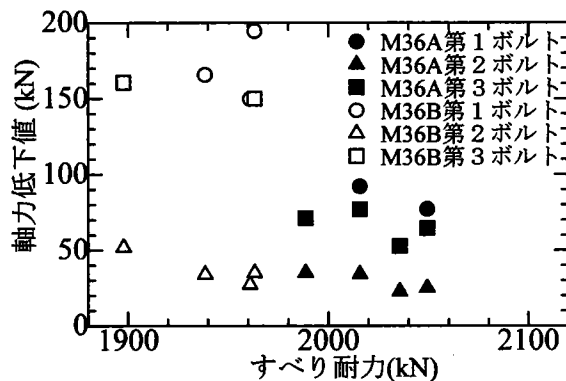
第1ボルト位置でのひずみと荷重の関係を図-2.11に示す。図-2.10で示した孔引きのない母板では，降伏後はほとんど荷重の変化がなかったのに対し，図-2.11では降伏開始後も荷重は増加するという異なる結果が示された。なお，M22C1では，M36A1やM22A1で使用した鋼材より若干降伏強度が高かったこともあり，弾性域ですべりが起こる結果となっていた。降伏先行型継手であるM36B3，M22B1では，M36A1やM22A1よりさらに降伏が進行した時点ですべりが起こっていることが判る。

d) 荷重とひずみ(連結板第3ボルト位置)との関係

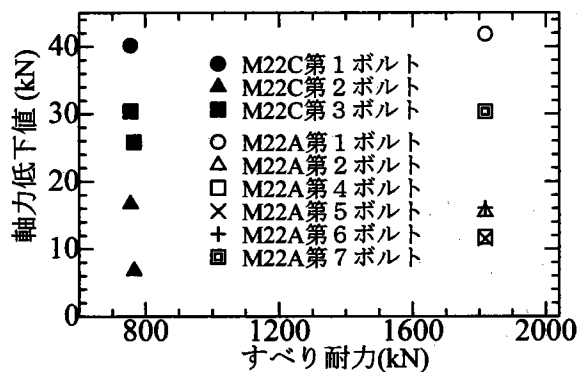
第3ボルト位置(M22A,M22Bでは第7ボルト位置)での連結板ひずみと荷重の



(a) 荷重と軸力低下の関係(M36A1)



(b) すべり耐力と軸力低下の関係(M36)



(c) すべり耐力と軸力低下の関係

図-2.13 ボルト軸力低下値

関係を図-2.12 に示す。これらの結果に示すように、 β 値が高い M36B3, M22B3 では、連結板も降伏に達した後に、すべりが生じる結果となっていた。一方、M36A1, M22A1, M22C1 では、すべりが生じた時点では連結板は降伏に達しておらず、すべった後に連結板は降伏に至るか、M22C1 では降伏に達しなかった。

e) ボルト軸力計測結果

ボルト軸力計測結果を図-2.13 に示す。なお、ボルトに貼り付けたひずみゲージは、ボルト締め付け時、試験体搬送中あるいは載荷時などに破損したものもあり、ひずみゲージを貼り付けたすべてのボルトに対し計測を行うことはできなかった。

荷重とボルト軸力低下値の関係を図-2.13(a) に示す。この図は、M36A1 上側の計測結果であるが、荷重の増加とともにボルト軸力が低下していき、すべりが開

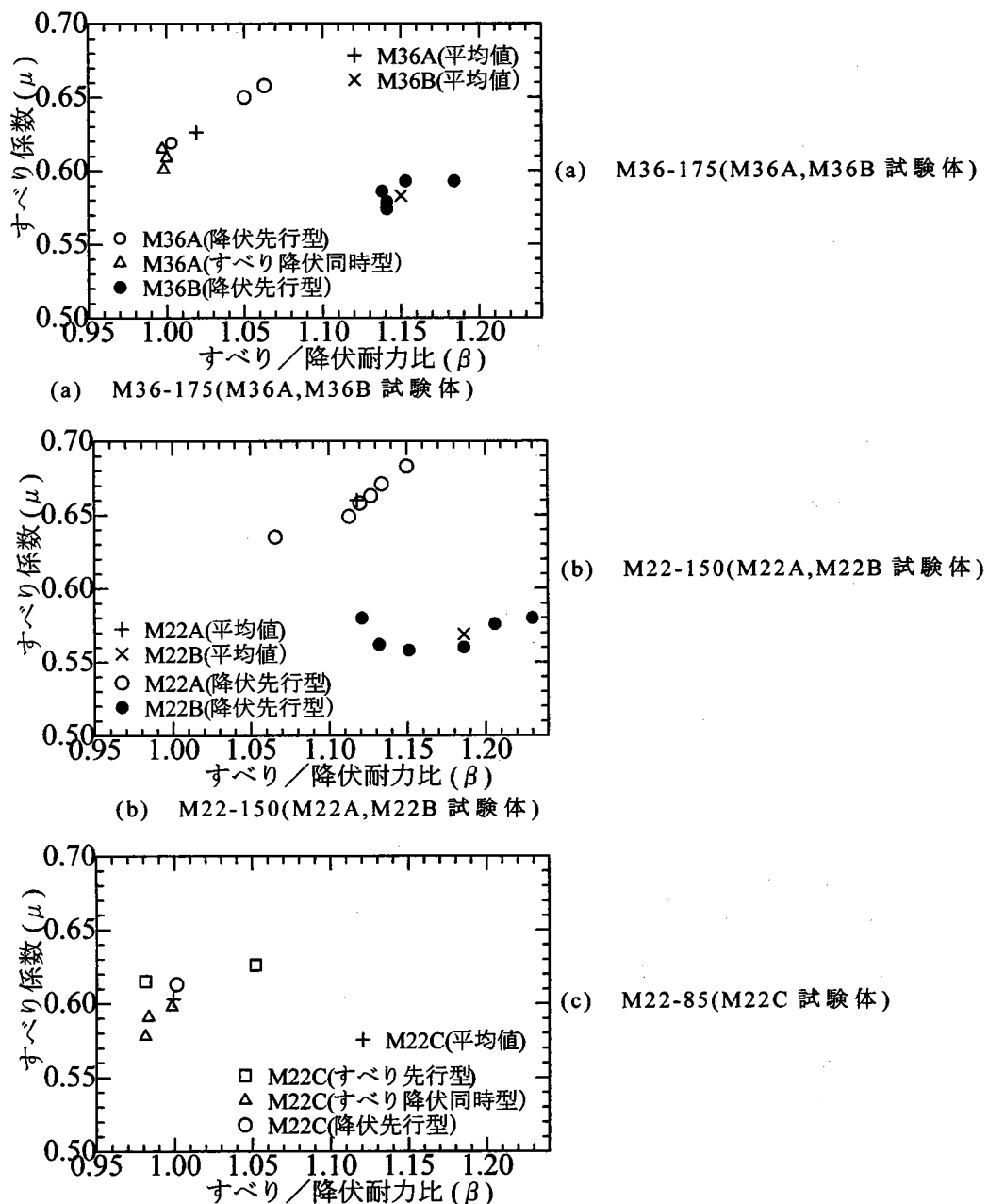


図-2.14 すべり係数算出結果

始する直前に急激にボルト軸力が低下して、すべり耐力に至った。第2ボルトを除けば、その後も荷重の増加に伴いボルト軸力が低下していった。

図-2.13(b), 図-2.13(c)は、それぞれ M36 および M22 におけるすべり耐力時でのボルト軸力の低下値を示している。図-2.13(b)に示すように、第2ボルトを除けば、M36A1 より β 値が大きい M36B の方が軸力の低下値が大きかった。傾向としては両者ともに、第1ボルトが最も軸力低下が大きく、すべり耐力に最も影響するのは端部側の第1ボルトであることが判る。次いで、第3ボルトが大きく、第2ボルトが最もボルト軸力低下は小さかった。図-2.13(c)は、M22 での計測結果であるが、M36 と比較すると、ボルト位置の違いによる軸力低下傾向は同じであるが、ボルト径に比例して軸力の低下値も小さくなった。また、軸力低下値は、M22A(長いボルト)と M22C(標準ボルト)を比較して違いはなく、ボルト長さによる影響は見られなかった。

(5) すべり耐力(すべり係数算出)結果

図-2.14 にすべり係数(μ)算出結果を示す。ここでは、(2)式を用いて引張試験で得られたすべり耐力値(P_s)から算出した。その際の算出条件を式(2)の下に示したが、ボルト軸力(N_d)は、締め付け時でのボルト軸力の割り増しやリラクセーションによるボルト軸力低下は考慮せず、設計ボルト軸力の基準値を用いて計算した。

本試験で得られたすべり係数は、道路橋示方書で規定されている値(0.4)より遙かに高かった。本試験体はリラクセーションによるボルト残存軸力の低下値が大きかったが、その影響もなく十分なすべり耐力が得られた。これは、塗膜の凝着効果が生じていたからと考えられる。本試験体の中ですべり係数が全体的に小さかった M36B, M22B(β 値の大きい降伏先行型継手)でも 0.56~0.59 であり、その他の試験体では 0.60 を超える結果となった。同じ試験体タイプについての β の平均値を、M36-175, M22-150, M22-85 の個々に対して比較すると従来から言われているように、 β 値が大きければすべり係数が小さくなる結果となった。しかしながら、同じタイプの試験体の個々の β の値は、すべり係数が大きくなると β も大きくなるという逆の関係を示した。

すべり先行型、すべり降伏同時型および降伏先行型継手が混在した M36A, M22A, M22C 試験体(設計上での β 値が同じ)を比較すると、すべり係数は太径ボルト M36A では標準ボルト M22C より高かった。長いボルト M22A ではさらに高く、約 0.057 高かった。一般に、多列ボルトではすべり耐力は低下すると言われているが、ここではその影響は生じなかった。

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot N_d} \quad \dots \dots (2)$$

μ : すべり係数 P_s : すべり耐力 {実験値}
 m : 接触面数 { $m=2$ } n : ボルト本数 { $n=3$ (M22A, B では 7)}
 N_d : 設計ボルト軸力 {205.5kN(M22), 551.5kN(M36)}

(6) 降伏耐力結果

図-2.15 は、実験で得られた各試験体の降伏耐力算出結果を示したものである。

図中の実線は、降伏耐力の設計値 $\{P_y = A_n \cdot \sigma_y\}$ (式(1)参照) から得られた各試験体の平均値を示した。ここでの σ_y は実験で得られた鋼材の 0.2% 耐力を用いて計算した。鋼材の 0.2% 耐力は、図-2.10 に示す孔引きのない母板 100mm 位置のひずみデータからこれを算出した。0.2% 耐力の決定方法は、0.2% 耐力線と荷重-ひずみ曲線との交点(表-2.5 で示した降伏耐力算出法と同じ)とした。なお、一部の試験体では、降伏に達しなかったケースもあったが、これらの試験体では各タイプの平均値を用いることとした。

次に、図中の点線は、日本建築学会の鋼構造接合設計指針⁹⁾で定義されている降伏耐力算定法から得られた各試験体の平均値を示した。同指針での降伏耐力算出方法は、純断面積に降伏応力を乗じたものに、(想定する断面でのボルト本数) $\times$ (ボルト 1 本あたりのすべり耐力) $\div 3$ を加えることにより降伏耐力を求めることとしている。

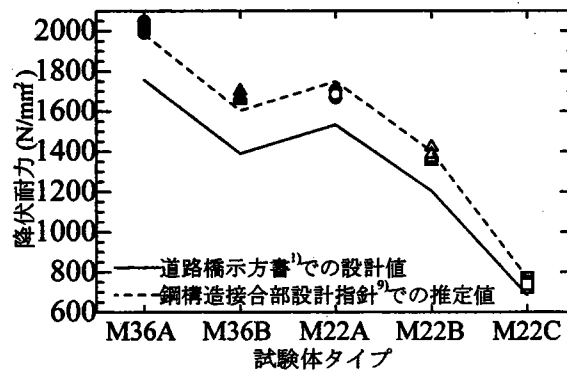


図-2.15 降伏耐力算出結果

図-2.15 に示すように、実線で示した設計値と実験値を比較すれば、実験値の方が高い値を示していた。このことは周知のことであり、道路橋示方書¹⁾では、孔引きを考慮した純断面積に対し、設計計算の際、純断面積を 1.1 倍まで割り増してもよいという規定が示されている。図-2.16 は、設計値の降伏耐力と実験から得られた降伏耐力との比(以下、降伏耐力比)を縦軸に示した。図に示すように、M22C では 1.1 を下回るケースもあったが、太径ボルトや長いボルトでは、ほとんどが 1.1 を上回っていた。降伏耐力比は、ボルト径が同じである場合、総断面積に対する純断面積の割合が低い M36B や M22B の方が、M36A, M22A より大きいことが判る。太径ボルトにおいて、降伏耐力比の平均値は M36B で 1.21, M36A では約 1.16 となっていた。次に、長いボルトでは、降伏耐力比の平均値は、M22B で 1.13, M22A では 1.10 となった。以上、本試験結果から判断すると、太径ボルトにおいても、純断面積に対し 1.1 倍割り増してもよいものと考えられる。

図-2.15 の点線で示した鋼構造接合設計指針で得られた降伏耐力(以下、推定値)は、実験値と非常に近い値を示していた。M22A のみ、実験値が推定値より低い分布を示したが、これは、M22A ではすべり耐力がその他の試験体より高く、そ

の影響で推定値も高くなったものと考えられる。以上のように、降伏耐力は、すべり耐力を考慮して算出すれば、精度の高い値が求められる結果が示された。図-2.17 は、推定値の降伏耐力と実験から得られた降伏耐力との比を縦軸に示したものである。図-2.15 で示したように、推定値と実験値は近いこともあり、降伏耐力比も 1.0 前後で分布していた。傾向は、図-2.16 と同様、M36 の降伏耐力比が最も大きく、M22C では 1.0 を下回った。

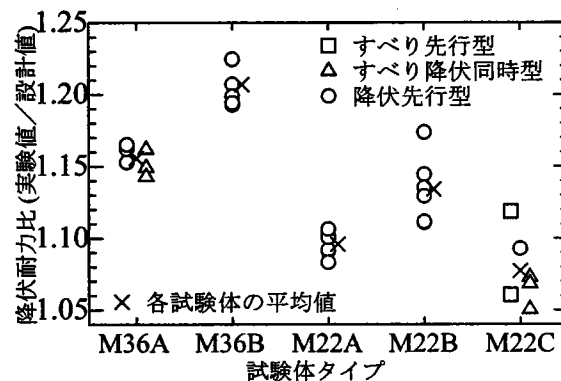


図-2.16 道路橋示方書に基づく降伏耐力比の算出

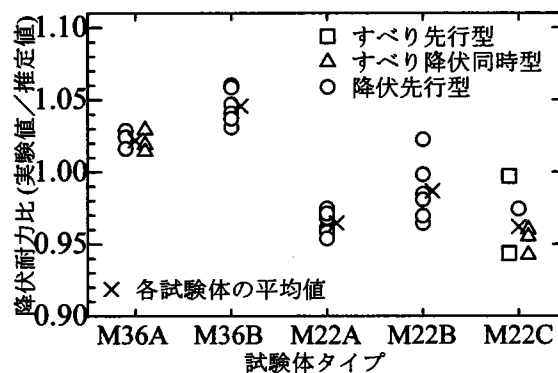
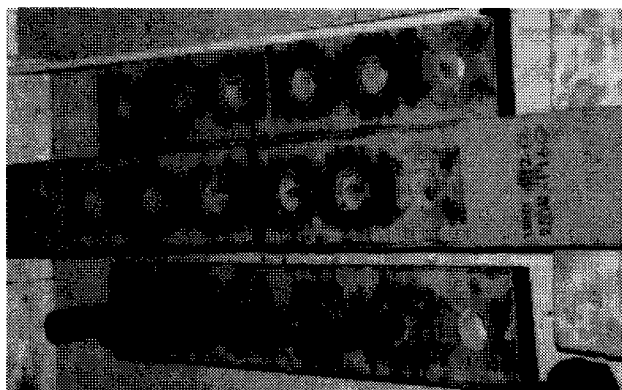


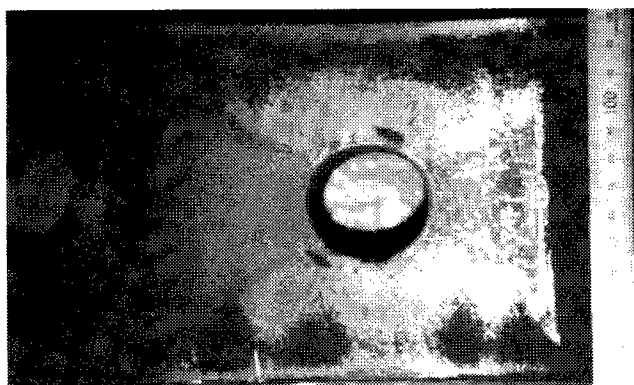
図-2.17 鋼構造接合設計指針に基づく降伏耐力比の算出

(7) すべり面の観察

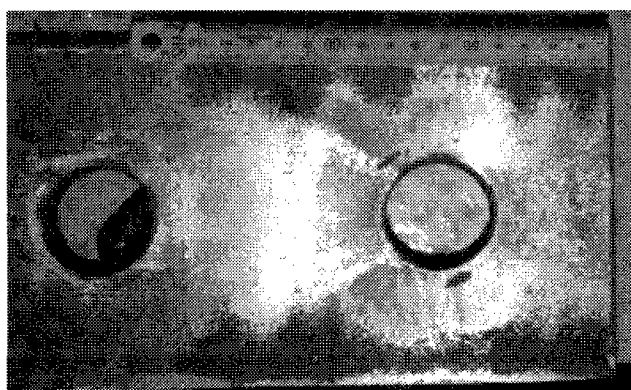
載荷終了後、試験体を解体した状況を写真-2.7に示す。この写真は M36B1 を観察したものであるが、太径ボルトでは孔周辺の広範囲に接触していたことが判る。また、第1ボルトでは、孔周辺が塑性変形し、塗装の剥がれ方も他のボルトとは異なることも観察できる。



(a) 全体写真



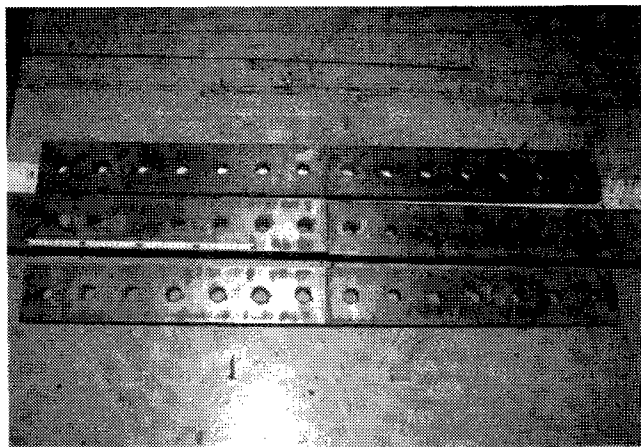
(b) 母板の第1ボルト孔(右側の孔)



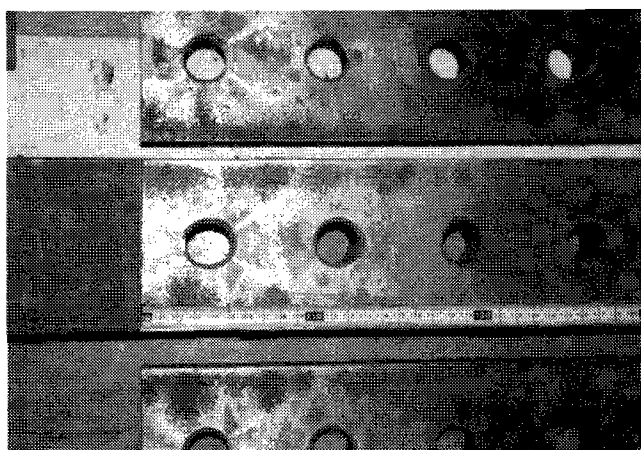
(c) 連結板の第1ボルト孔(右側の孔)

写真-2.7 載荷試験後の解体状況(M36B1)

また，M22B1 試験体を解体した状況を写真-2.8 に示す．この写真も M36B1tp 同様，第 1 ボルトでは，孔周辺が塑性変形し，塗装の剥がれ方も他のボルトとは異なることが観察できる．



(a) 全体写真



(b) 第 1 ボルト孔部(右側の孔)の拡大

写真-2.8 載荷試験後の解体状況(M22B1)

2. 5 結 論

本研究をまとめると、以下の通りである。

- 1) リラクセーションによるボルト軸力計測結果は、ボルト長さが長い方が軸力低下は小さかった。また、ボルト長さが同じであれば、ボルト径の違いによる軸力低下の差異は生じなかった。
- 2) 厚膜型無機ジンクリッチペイント(膜厚 75 μ m)のすべり面において、 β 値が大きい降伏先行型継手の M36B, M22B(β 値 : 1.14~1.23)では、その他の試験体(M36A, M22A, M22C)よりすべり係数は若干小さいが、それでも 0.56~0.59 と道路橋示方書の基準値(0.4)より遙かに高い結果となった。
- 3) 厚膜型無機ジンクリッチペイント(膜厚 75 μ m)のすべり面において、すべり先行型、すべり降伏同時型および降伏先行型継手が混在した M36A, M22A, M22C 試験体(β 値 : 0.98~1.15)では、すべり係数はほとんどが 0.6 を満足し、太径ボルト(M36A)や長いボルト(M22A)のすべり係数は、標準ボルト(M22C)と比較し若干高くなる結果が示された。
- 4) 本試験結果から判断すると、50mm 厚板鋼板において太径ボルトを適用しても、継手の耐力上問題は無いものと考えられる。

(2章のひずみデータ)

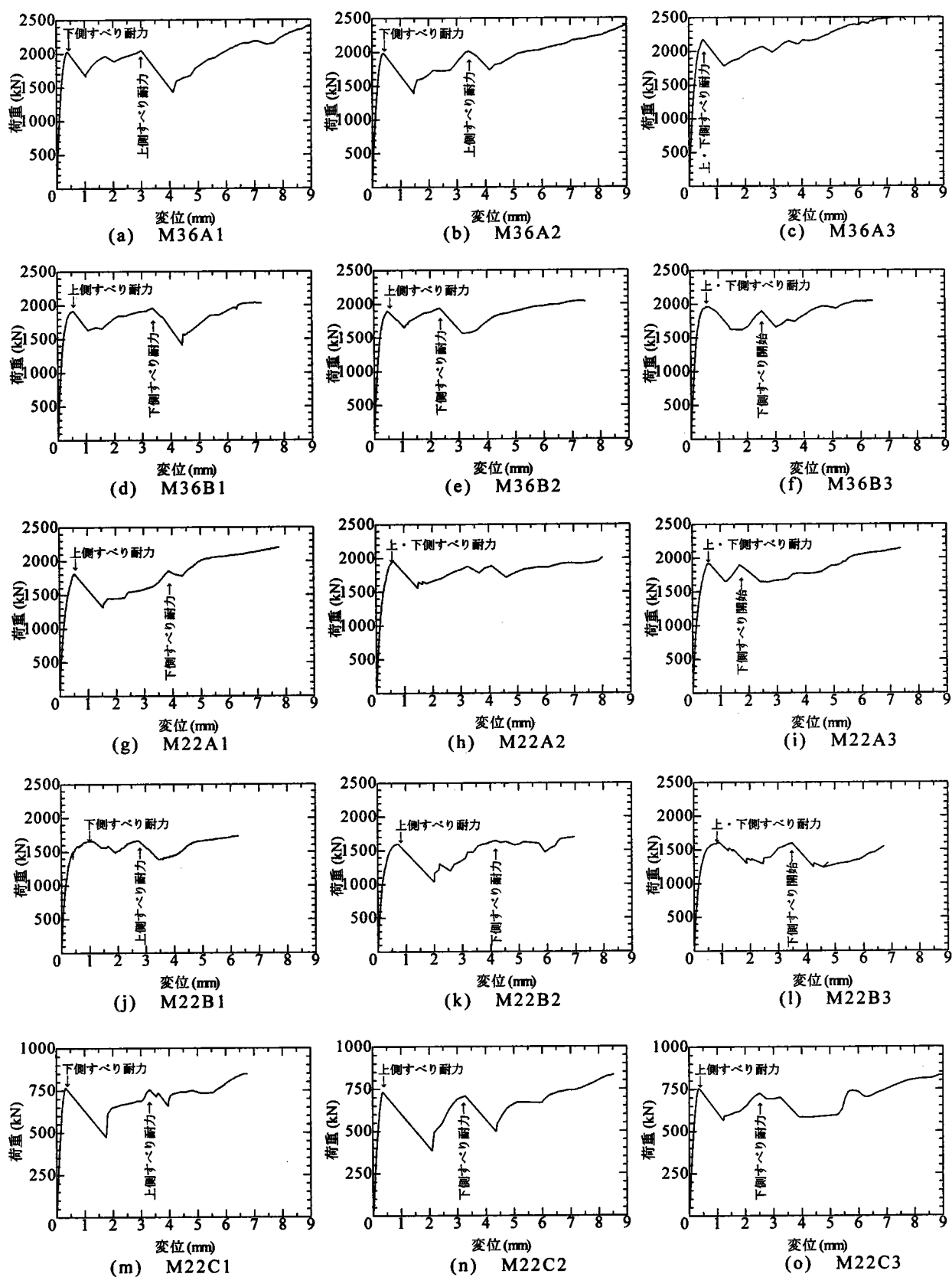


図-2.18 荷重－開口変位関係

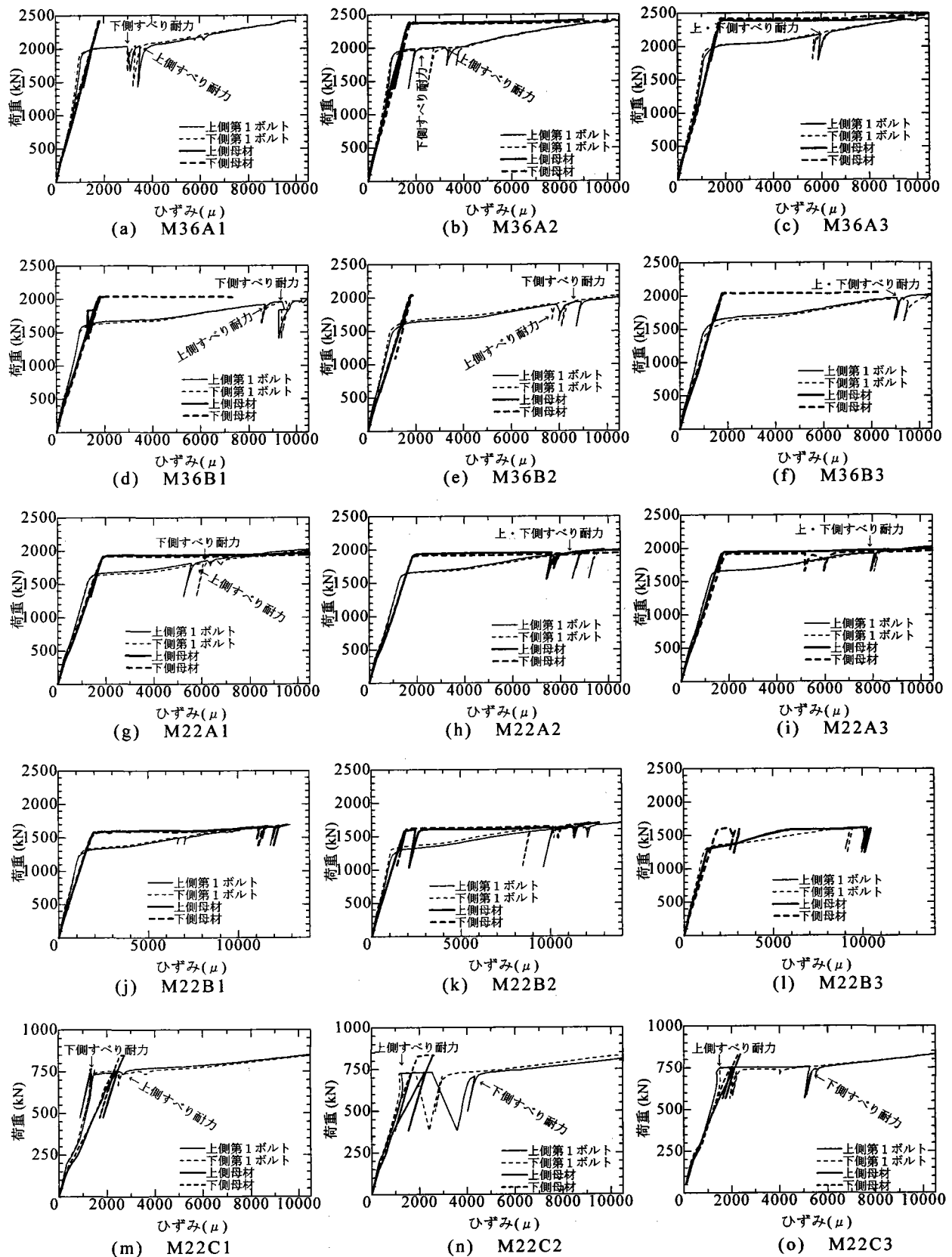


図-2.19 荷重－ひずみ関係(第1ボルト位置と100mm位置)

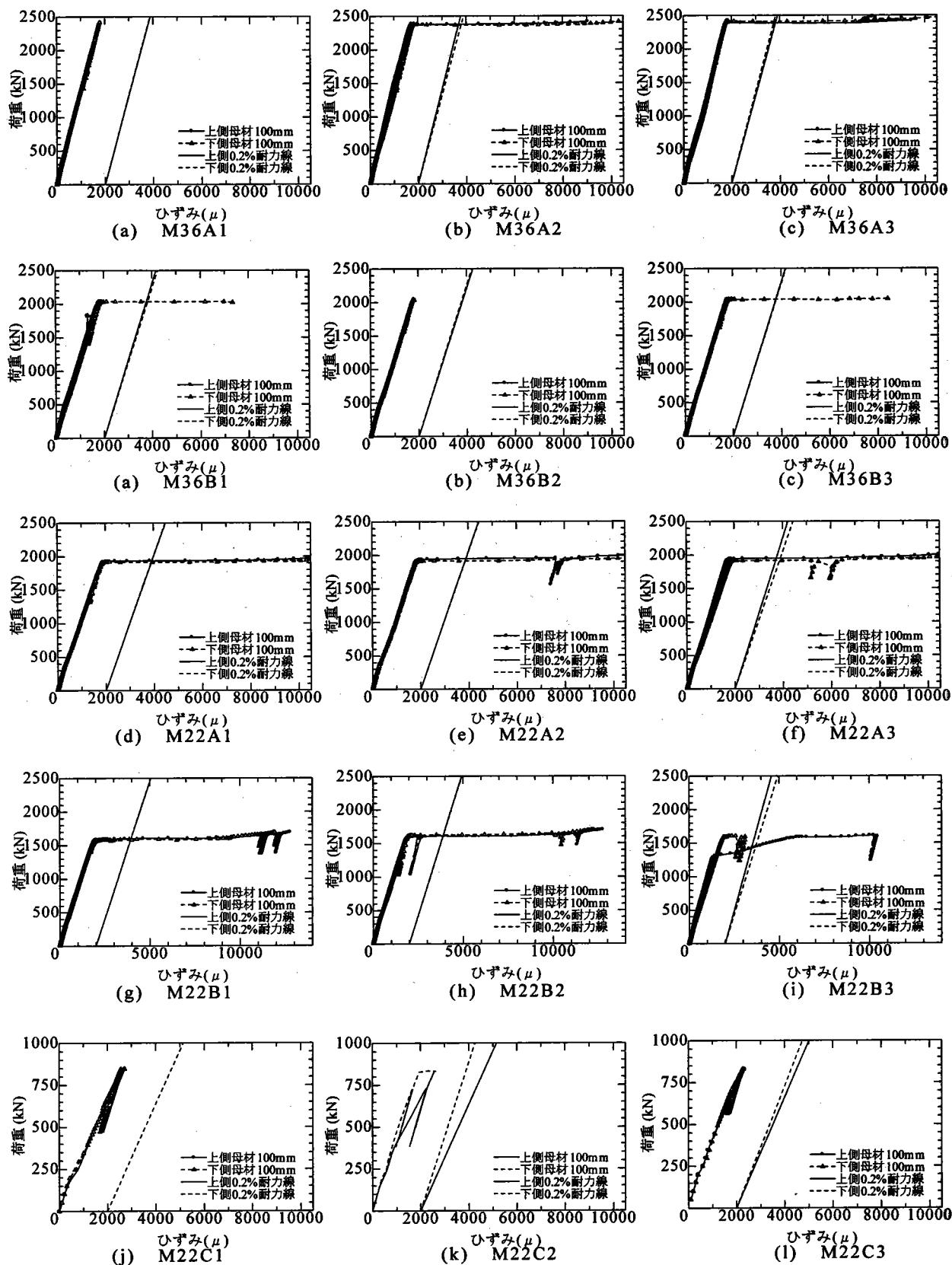


図-2.20 荷重－ひずみ関係(100mm位置と0.2%耐力の関係)

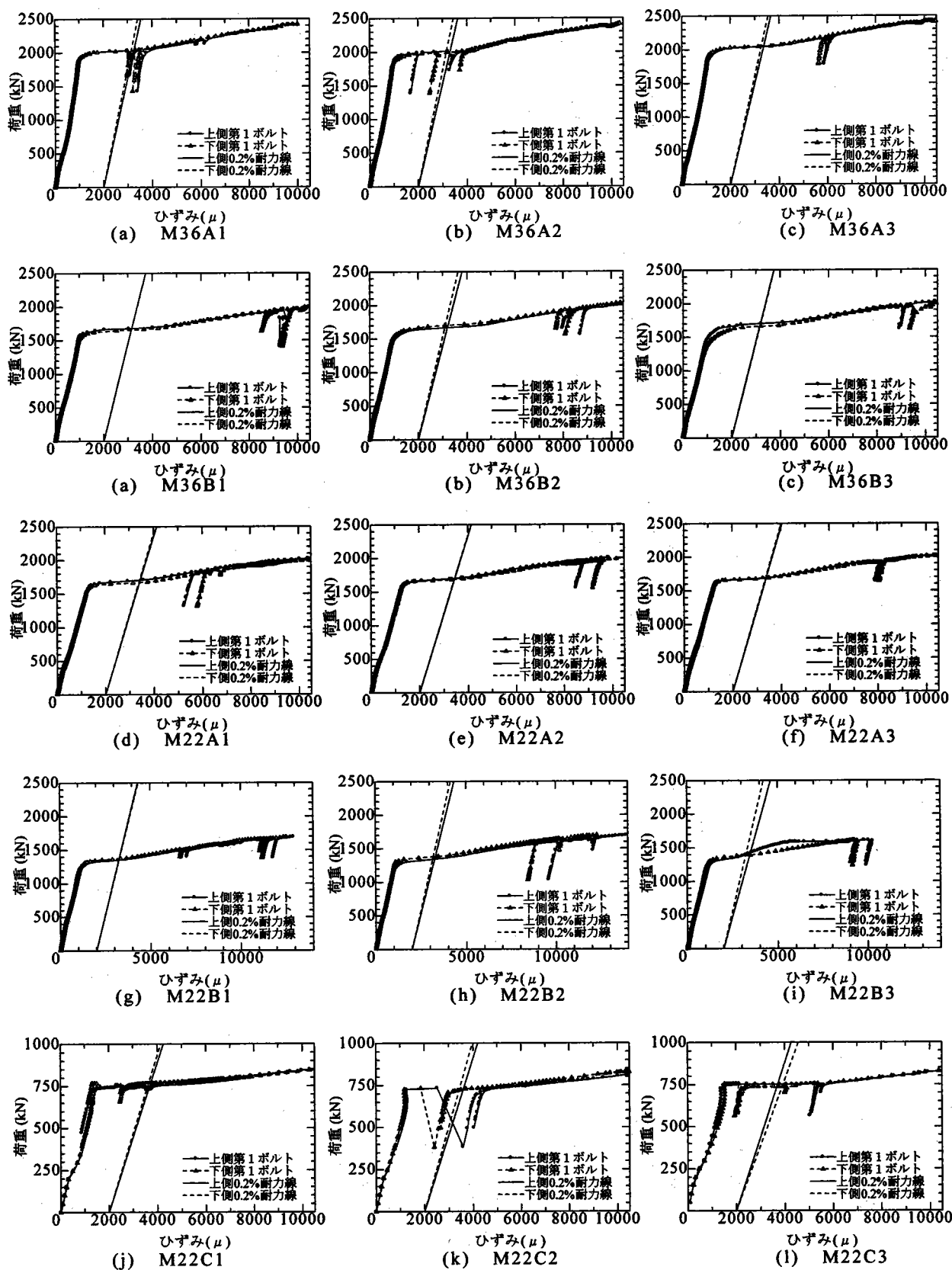


図-2.21 荷重－ひずみ関係(第1ボルト位置と0.2%耐力の関係)