

(20) 鋼・コンクリート混合構造における継手部の静的曲げ挙動

山口大学工学部 日野 伸一
同 浜田 純夫
同 ○中野 浩明
九州大学工学部 太田 俊昭

1 まえがき

近年、鋼構造とコンクリート構造の材料および構造的長所を合理的に組合わせた混合構造形式の複合構造物が広く着目されるようになってきた。この種の構造形式を、例えば斜張橋に応用した場合、軸圧縮力の卓越する主塔や側径間主桁には、低コストで圧縮抵抗に優れたコンクリート構造を、また長大スパンとなる中央径間主桁には、軽量でかつ靱性に富む鋼構造をそれぞれ用いれば、全体として経済的でかつ構造特性の優れた構造システムを作り上げることが可能である。このような混合構造形式の斜張橋は、すでにDüsseldorf-Flehe橋¹⁾、Tjörn橋²⁾など、欧米諸国においていくつかの実施例がみられるが、わが国においては未だほとんど例がない。

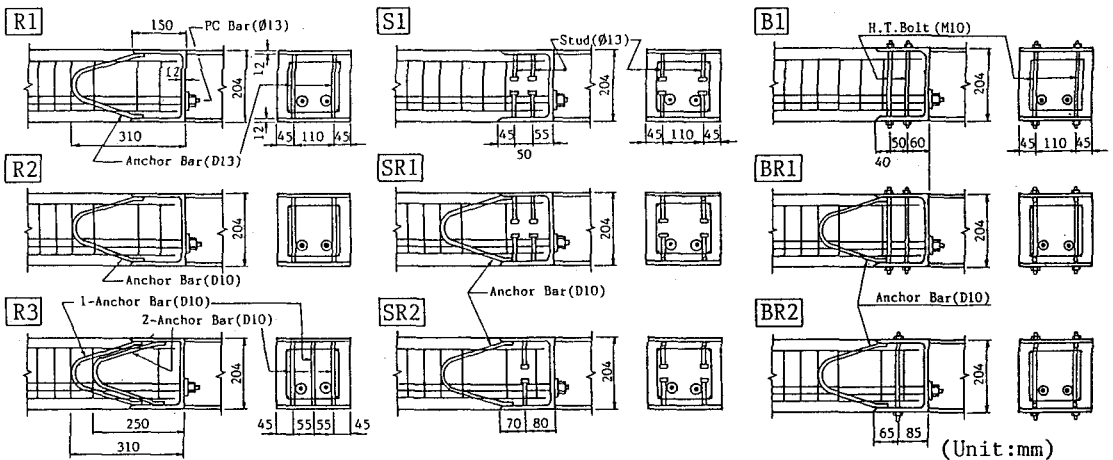
一方、この種の構造において最大の問題点となるのは、鋼部材とコンクリート部材の継手方法およびその設計法である。これらの点に関しても、現在のところ著者らの知るかぎり、国内外を通じて設計指針的な確立された情報はおろか、継手に関する基礎的データすら極めてとぼしいように思われる。^{3), 4), 5), 6)}

そこで、本研究は、鋼・コンクリート混合構造における合理的な継手方法に対する基礎資料を得ることを目的に行ったものである。すなわち、既往の継手材を参考にした9種類の継手構造に対して、鋼・コンクリート連結はりの静的曲げ破壊試験を実施し、混合部材ならびに継手部の曲げ挙動について検討するものである。

2 継手構造および試験方法

2.1 継手構造

実験で用いた継手構造はいずれも溝形鋼を応用した継手金具を有し、継手部のずれや肌離れを抑制して、



図ー1 継手構造の種類

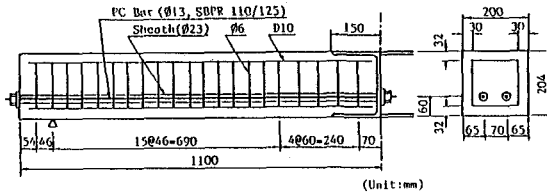


図-2 コンクリート部材の形状寸法

表-1 コンクリート配合

スランブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位重 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
14	40	44	179	447	742	1008	3.353

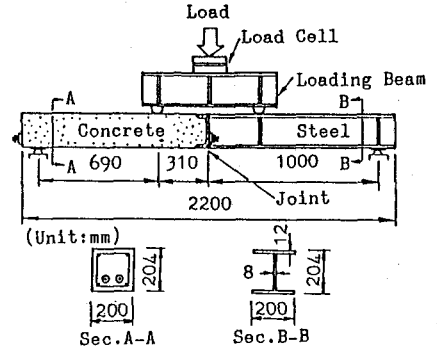


図-3 載荷試験方法

所要の耐力および剛性を確保するために、コンクリート部材との鉛直接合面に、PC鋼棒によるプレストレスおよび引張抵抗力を与え、さらに各種の継手補強材を配置したものである。継手部に用いた補強材の種類は、次のとおりである。

(a) アンカー鉄筋

継手金具をコンクリート中にアンカーするため、継手金具の上下プレートの内側に異形鉄筋 (SD30) を折曲げ、フープ筋として溶接したものである。この形式の継手材は Mosel 橋³⁾に見られる。

(b) スタッド

合成桁のずれ止めとしてよく用いられるスタッドジベルを、継手金具の上下プレートの内側に溶接したものである。合成桁の他、合成床版、Flehe 橋などの複合斜張橋にも実施例が多い。

(c) ボルト

継手金具の上下プレートをボルト軸力によって締め付け、接合面への二軸方向の圧着力と共にボルト自身のせん断抵抗の相乗効果を期待するものである。

本実験では、以上の3種の補強材を組合わせた9種類の継手構造について比較検討した。それらの詳細を図-1に示す。

2.2 供試体の断面諸元および作製

供試体は、鋼部材としてH形鋼材 (204×200×8×12, SS41) を、コンクリート部材としてPCポストテンション部材を相互に連結したはり構造とし、中央で各継手を介して連結した。部材の配筋および断面諸元を図-2に、また、コンクリートの配合を表-1に示す。使用鋼材は、PC鋼棒 (SBPR 110/125、φ13)、異形鉄筋 (SD30、D10 および D13)、高力ボルト (F10T、M10) および頭付きスタッド (SS41、軸径φ13) である。また、載荷試験時のコンクリートの平均圧縮強度は 700kg/cm² で、コンクリート下縁の有効プレストレスは 114kg/cm² である。

2.3 載荷試験

載荷試験は継手部の曲げ挙動を把握するため、図-3に示すような2点集中荷重として継手部に純曲げモーメントを作用させ、はり供試体が破壊に至るまで 0.5t 刻みに漸増させた。各荷重段階ごとにひびわれ、たわみ、接合面のずれ、ひずみを電気式変位計、パイ型変位計、ワイヤ・ストレインゲージなどを用いて測定した。

表-2 ひびわれおよび終局耐力

供試体	継手補強材			ひびわれ耐力 (tf-m)			終局耐力 (tf-m)		
	鉄筋	スタッド	ボルト	実験値 M _{cr}	計算値 M _{cr}	M _{cr} M _{cr}	実験値 M _u	計算値 M _u	M _u M _u
R1	2-D13	—	—	1.90	2.18	0.87	6.28	5.29	1.19
R2	2-D10	—	—	2.07	2.22	0.93	6.32	5.30	1.19
R3	3-D10	—	—	2.59	2.26	1.15	6.44	5.34	1.21
S1	—	8-φ13	—	1.86	2.20	0.85	5.52	5.31	1.04
SR1	2-D10	8-φ13	—	2.42	2.11	1.15	6.49	5.33	1.22
SR2	2-D10	4-φ13	—	2.55	2.18	1.17	6.48	5.36	1.21
B1	—	—	4-φ10	2.59	2.13	1.22	5.42	5.20	1.04
BR1	2-D10	—	4-φ10	2.55	2.22	1.15	6.40	5.34	1.20
BR2	2-D10	—	2-φ10	2.24	2.26	0.99	6.70	5.31	1.26

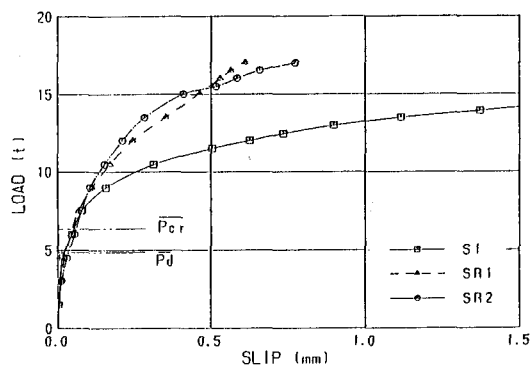


図-4 接合面の荷重-ずれ曲線

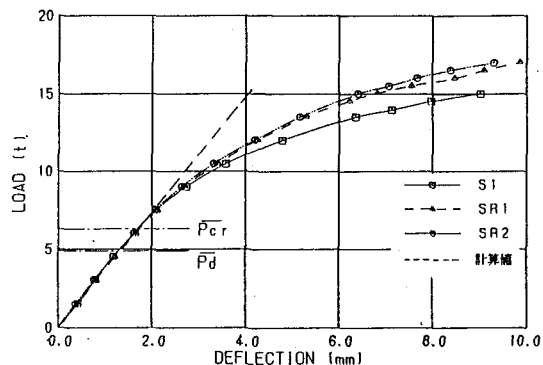


図-5 支間中央点の荷重-たわみ曲線

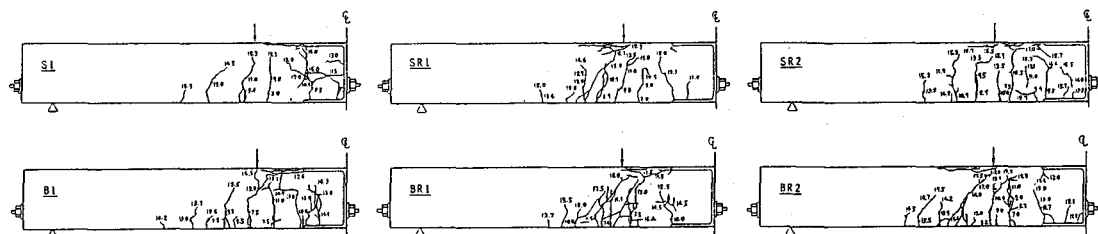


図-6 ひびわれ分布

3 混合部材の耐力と変形状

3.1 耐力

各供試体のひびわれ、終局耐力の実験値と計算値との比較を、表-2に示す。ひびわれ耐力の実験値 M_{cr} は、目視によるひびわれ発生時のモーメントであり、計算値 $\overline{M}_{cr}$ 、 $\overline{M}_u$ は道路橋示方書によるひびわれおよび破壊抵抗曲げモーメントの計算値である。これより、アンカー鉄筋を単独で用いたR1およびR2型継手にややひびわれ耐力が低下する傾向がみられたが、これは、アンカー鉄筋が継手部のプレストレス導入に対して不利な影響を及ぼすことを示すものとも考えられる。終局耐力比を全体で比較すると、S1、B1型継手が他の継手に比べて約15%低下しており、補強材量の不足を示唆している。その他の継手構造をもつ供試体は、実験値がいずれも計算値で20%程度上回っており、継手部が所要の耐力を有していることを実証するものである。

3.2 接合面のずれとたわみ性状

継手金具とコンクリートの接合面のずれの一例を図-4に、支間中央点のたわみの一例を図-5にそれぞれ示す。図中の $\overline{P}_d$ はディ・コンプレッションモーメントに相当する荷重(4.9t)であり、 $\overline{P}_{cr}$ は計算によるひびわれ発生荷重(6.4t)である。また、図-5の計算値は、せん断変形の影響を考慮し、かつBransonの換算断面二次モーメントを用いた計算値である。

接合面のずれは、ひびわれ発生荷重を上回る約7t載荷時までは継手構造による差がほとんど見られない。接合面のずれの実験値は、B1型継手を除き、 $\overline{P}_d$ および $\overline{P}_{cr}$ の荷重時にそれぞれ、およそ0.03~0.04mm、0.05~0.06mmであった。また、たわみは、ずれの性状と同様な傾向を示し、計算値ともよく一致している。これより、ディ・コンプレッションモーメントまでは、継手部の一体性に及ぼす接合面のプレストレスの影響が卓越しており、接合面のプレストレスが消失し、引張応力が次第に増加するとともにP-C鋼材による引張抵抗と各継手補強材とがずれの抑制に協同して働くことがわかる。また、高荷重段階になるとともにスタッドまたはボルトを単独に用いたS1、B1型継手は、次第に剛性低下が見られるが、アンカー鉄筋を補強材として使用した継手は、終局時まで比較的高い剛性を保っている。

3.3 ひびわれ

図-6にひびわれ分布状況の一例を示す。各供試体とも継手部を除くと同様のひびわれ分布状況である。供試体の一般的な最終破壊パターンは、載荷点付近から継手金具の水平プレート端部のコンクリートが圧壊するものである。しかし、S1、B1型継手の場合、圧縮側コンクリートの圧壊に先行して、接合面のずれの増加とともに、継手内部、特にスタッド、ボルト位置のひびわれが急速に発達して破壊に至った。他のタイプにおいては、終局時においても継手金具とコンクリートとの接合面にすきまは見られなかったことから、継手金具とその内部のコンクリートとの一体性は良好であったと考えられる。

4 継手部の応力性状

4.1 鋼材とコンクリートのひずみ

図-7にH形鋼支間中央部の荷重-ひずみ関係の一例を示す。計算値は曲げひずみの弾性解である。どの継手形式も、 $\overline{P_d}$ から $\overline{P_{cr}}$ の比較的低荷重作用時には、弾性的挙動を示し、また実験値と計算値がよく一致している。しかし、高荷重になるにつれて、引張側フランジのひずみが圧縮側に移行していくとともに、圧縮側フランジのひずみが増加している。その傾向は接合面のずれの大きいS1、B1型継手ほど顕著である。これは、曲げモーメントの増加にともない継手内部のコンクリートのずれおよび回転変形が顕著になり、2次曲げ応力が生じてくるものと推察される。

溝形鋼継手金具隅角部の荷重-ひずみ関係の一例を図-8に示す。図中の計算値(1)は全断面有効とした場合、計算値(2)は引張側コンクリートを無視した場合の弾性解である。継手形式による顕著な差は見られず、いずれも、通常の鉄筋コンクリート理論による弾性値は、実験値をかなり過小評価する傾向がある。これは、隅角部への応力集中の影響と考えられ、設計にあたってはそれを配慮する必要があると思われる。

図-9は圧縮側継手金具端部とコンクリート部の境界

表-3 アンカー鉄筋の応力度 (kg/cm²)

供試体		R1	R2	R3		SR1	SR2	BR1	BR2
				1-D10	2-D10				
$\overline{P_d}$ 4.9t	圧縮側	-571	-503	-544	-530	-559	-744	-760	-687
	引張側	639	954	491	98	572	790	681	509
$\overline{P_{cr}}$ 6.4t	圧縮側	-745	-954	-737	-730	-761	-964	-994	-884
	引張側	994	1481	1225	631	1030	1275	1186	856

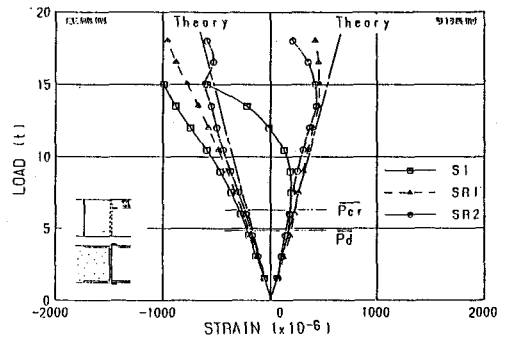


図-7 H形鋼の荷重-ひずみ曲線

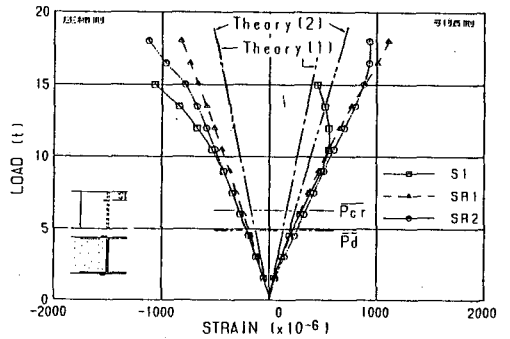


図-8 継手金具の荷重-ひずみ曲線

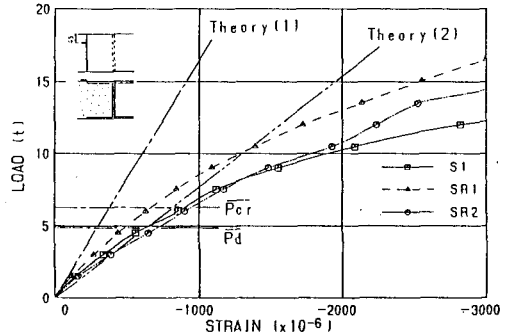


図-9 コンクリートの荷重-ひずみ曲線

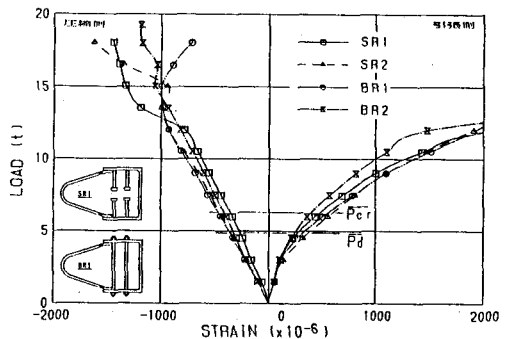


図-10 アンカー鉄筋の荷重-ひずみ曲線

付近の荷重—ひずみ関係の一例を示したものである。これより、圧縮部コンクリートのひずみは、載荷初期より計算値を大きく上回っている。このことは、この位置が剛性の不連続に起因して応力集中が起こること、また、最終的に圧壊することなどを考慮し、十分な補強の必要性を示唆するものである。

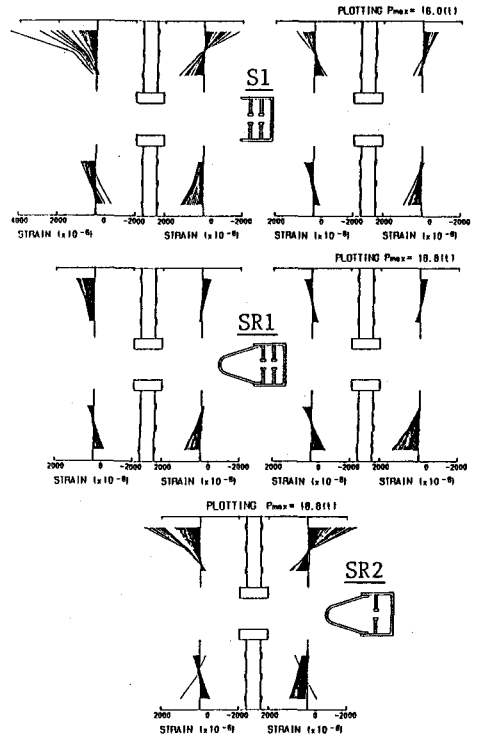
4.2 継手補強材の応力

アンカー鉄筋の荷重—ひずみ関係の一例を図—10に示す。圧縮側のひずみは、継手形式による顕著な差は見られず、終局時付近まで直線的に増加している。引張側では、ディ・コンプレッションモーメント以上の荷重に対して、ひずみの増加が不連続となっており、終局時付近でひびわれ幅の増加に伴い、降伏している。 $\bar{P}_d$ および $\bar{P}_{cr}$ の荷重時の継手金具端部でのアンカー鉄筋の応力度は、表—3に示すとおりである。これより、アンカー鉄筋が、継手部の不連続変形に対する抵抗機能を果たしていることがわかる。

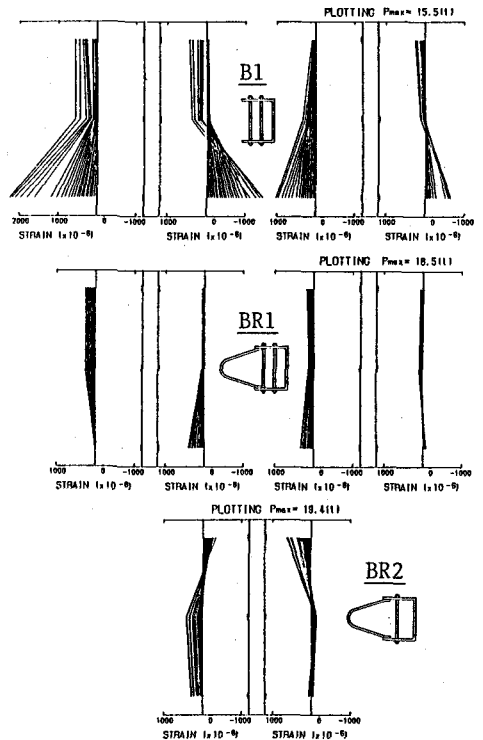
図—11および図—12にそれぞれスタッド、ボルトのひずみ分布状況を示す。スタッドには、引抜きによる軸力とせん断による曲げモーメントが、また、ボルトには、引張りによる軸力とせん断による曲げモーメントが働くものと考え、ひずみの測定結果より、各継手の荷重—軸力、曲げモーメント関係を図—13に示す。スタッドの根元部にはせん断による曲げひずみが卓越し、高荷重段階においては、S1、SR2型継手は降伏している。また、ボルトには載荷初期はほぼ一定した軸ひずみを生じるが、荷重の増加に伴い、ボルトのせん断抵抗により端部のひずみが卓越してくるのがわかる。鉛直接合面から離れた側のスタッド、ボルトは、応力の負担割合が大きく、特に、圧縮側スタッドの付け根と下縁のボルト位置の引張力と曲げモーメントが卓越している。また、それらの増加はディ・コンプレッションモーメント以降、高荷重段階ほど大きい。S1、B1型継手にアンカー鉄筋を付加することで、スタッドやボルトの力の分担率は小さく、かつほぼ均等になっている。

5 あとがき

本研究は、鋼・コンクリート混合構造における継手に関する基礎資料を得る目的で、アンカー鉄筋、スタッドジベルおよび高力ボルトを継手補強材として用いた9種類の継手構造に対し、鋼・プレストレストコンクリート連結はりによる静的曲げ破壊試験を実施したものである。



図—11 スタッドのひずみ分布



図—12 ボルトのひずみ分布

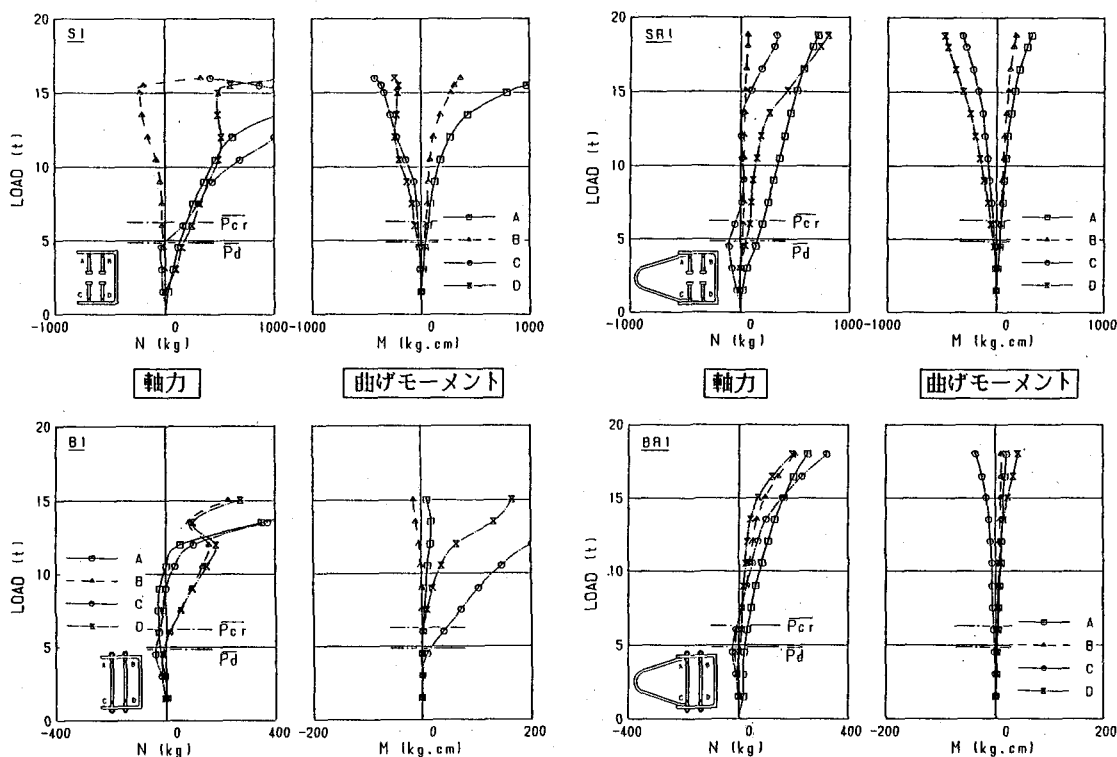


図-13 スタッド、ボルトの軸力、曲げモーメント

実験結果より、鉛直接合面にプレストレスが存在する、いわゆるディ・コンプレッションモーメント以下では、継手材によらず、比較的一体性の良い挙動を示すが、それ以降の荷重レベルでは、アンカー鉄筋を単独利用、または、スタッド、ボルトと併用した継手構造が有用であることが示された。また、各継手材の応力状態はかなり複雑であり、合理的な継手部の設計を行うためには、今後さらに継手部に関する実験データの蓄積および解析による応力状態の解明が必要である。

最後に本実験を遂行するにあたり、山口大学工学部土木工学科兼行啓治技官ならびに土木構造学講座の学生諸君に多大の御協力を賜った。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) Kahmann, R. und Koger, E.: Die Neue Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe, Bauingenieur, 54 (1979).
- 2) Kahmann, R., Koger, E.: Die neue Tjörnbrücke, Konstruktion, Statik und Montage der Stahlkonstruktion, Bauingenieur, 57 (1982).
- 3) Lehmann, G., Schaber, E. und Aschrafi, M.: Bau der Moselbrücke zwischen Koblenz-Gondorf und Niederfell, Der Stahlbau, 49 (1980).
- 4) 田島二郎、町田彦彦、陸好宏史：鋼部材とコンクリート部材の接合工法に関する実験的研究、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集 (1982)。
- 5) 若下藤紀：合成構造橋梁の継手部の応力、橋梁と基礎 (1983-7)。
- 6) S. Hino, T. Ohta, S. Hamada, F. Imai: Mechanical Joints for Composite Construction, 12th Congress Reports of IABSE (1984)。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書、同解説 (1978)。