

(17) 鋼 - コンクリート混合構造部材の
継手部の静的・疲労曲げ性状

STATIC AND FATIGUE FLEXURAL BEHAVIOR OF JOINTS
IN MIXED STEEL-CONCRETE MEMBERS

日野伸一*

太田俊昭**

片刈文隆***

兼澤秀和***

Shin-ichi HINO, Toshiaki ONTA, Fumitaka KATABUCHI, Hidokazu KANESAWA

A mixed steel-concrete structural system has been applied to cable-stayed bridges and buildings, because of its rational combination of economical and structural advantages. The joint in such a mixed structure is needed to have a sufficient flexural and shearing capacity. In this study, four mechanical joints are investigated and a series of static and fatigue bending tests are carried out. From the test results, the following conclusions can be drawn; (1) For Joint-N having only an end plate to which PC bars are anchored, stress concentration in the joint considerably affects the ultimate strength and flexural rigidity of the beam. (2) For Joints-R, S and B with additional reinforcement, stud shear connectors and high-strength bolts, respectively, the beams retain sufficient flexural capacity. (3) The flexural failure of the beams except Joint-N occurs at the outside of the joint in static tests, whereas a crack initiates at the joint which is welded to steel H beam, which causes failure of the beams in fatigue tests.

1. まえがき

軽量で靱性に富む鋼部材と、低コストで剛性や圧縮抵抗に優れたコンクリート部材を組み合わせた混合構造形式の複合構造は、合理的な構造形態として今や各種の構造物に広く適用されつつある。特に、側径間にPC桁、中央径間に鋼桁をそれぞれ用い、死荷重のバランスをうまく取った複合斜張橋は、すでに欧米においてはDüsseldorf-Flehe橋¹⁾、Tjörn橋²⁾などに施工され、またわが国では、本四連絡橋尾道・今治ルートに日本初の本格的複合斜張橋として中央径間490 mの生口橋が計画、施工中である³⁾。

一方、この種の構造においては、異種部材間の接合、すなわち両者の継手構造が最重要課題となる。特に、構造上、継手部が断面力の比較的大きい位置に設けられることが多く、継手部に必要な力学性能として母材部と同等以上の耐力と剛性の確保および円滑な応力伝達が要求される。このため、たとえば前記のDüsseldorf-Flehe橋やTjörn橋では、鋼横ばりや連結桁を介してPC鋼棒によるプレストレスとスタッドの併用により偏心軸力とせん断力を伝達している。また、生口橋の継手構造案では、鋼桁からコンクリート横桁への軸力およびせん断力の伝達を同様にプレストレスとスタッドを用いて確保するとともに、鋼桁端部に中詰コンクリート部を設け、応力分散を図っている。同時に、継手部は設計荷重下において常に圧

* 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科

** 工博 九州大学教授 工学部土木工学科

*** 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻

縮応力状態となるように設計されて、その安全性が確保されている。このように、混合形式の複合構造物でまさに心臓部となる継手部の構造や設計についての研究は、今日まで必ずしも十分とはいえず、既存の形式を応用して、安全サイドに行っているのが現状のようである。今後、より合理的でかつ経済的な継手構造の設計、特に疲労性状を含めた終局限界に対する安全性の検討などが必要であると思われる。

そこで、本研究では、以上に関する基礎資料を得ることを目的に、P C鋼棒による接合面へのプレストレッシングを基本にして補強材を併用した4種類の継手構造に対して、鋼・コンクリート混合構造はり部材の静的曲げおよび曲げ疲労実験を行い、これらの耐力、曲げ剛性ならびに継手部の応力分布状態などについて検討した。

2. 継手構造および実験方法

2.1 継手構造

本研究では、継手部の曲げ抵抗機構に限定した純曲げ状態を対象とした。曲げ継手としては、最も基本的でかつ単純な構造として、鋼部材端部に溶接された端プレートにP C部材の鋼棒を定着するプレストレス圧着方式が考えられる^{4), 5)}。これをNタイプとし、本実験で用いた諸元を図-1に示す。この構造は、接合面が全断面圧縮応力状態では理論的に安全性は保証されるが、剛性の不連続面となるため、継手部の応力集中が懸念される。また、引張応力発生後は、接合面に変形が集中し、これが安全性の限界となる。

これに対して、ディ・コンプレッションモーメント（プレストレスが消失し、以後引張応力が発生するときの曲げモーメント）以後の継手部の曲げ抵抗機能および応力集中の緩和を図るため、端プレートに代え、水平接合面を有する山形鋼（200x200x15x12, SS41）を介してP C鋼棒によるプレストレスと共に、アンカー鉄筋（D13, SD30）、スタッド（ $d=13\text{mm}$, $H=80\text{mm}$ ）、あるいは高力ボルト（F10T, M10）の補強材を併用したそれぞれR, S, Bタイプの継手構造を取り上げた⁶⁾（図-1参照）。これらの補強材は、図-2に示すように継手部の引張応力ゾーンの軸力をアンカー鉄筋の引張抵抗、スタッドの水平せん断抵抗、高力ボルトによるせん断摩擦およびせん断抵抗で、それぞれ伝達させることを意図したものである。

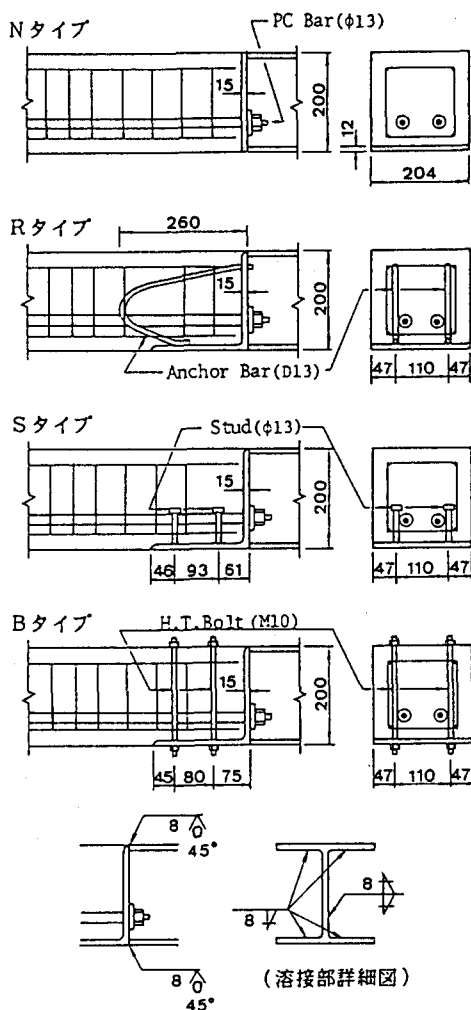


図-1 継手構造の種類

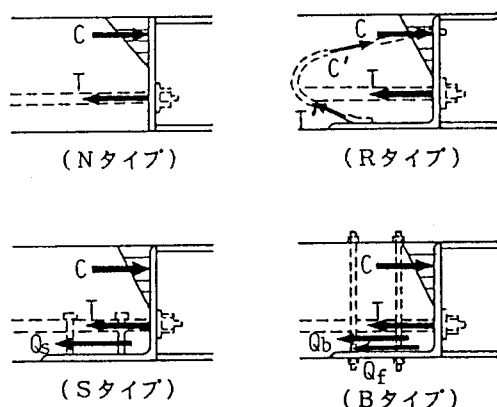


図-2 各継手部の抵抗メカニズム

2.2 はり供試体

供試体は、H形鋼部材（200x204x12x12, SS41）とP Cポストテンション部材（200x204）を、前述の各継手を用いて連結した長さ2.2 mのはりとし、それらの諸元を図-3に示す。使用したP C鋼棒はφ13 C種1号（SBPR 110/125）で、降伏点 145 kg/mm²、引張強度150 kg/mm²、また、コンクリートの載荷試験時の平均圧縮強度は約470 kg/cm²である。P C部材のプレストレス導入はコンクリート材令3週目に行い、グラウト後、載荷試験時までP C鋼棒の引張応力度の変化を測定し、コンクリートに導入された有効プレストレスを算定した。その結果、プレストレス導入3週後におけるP C鋼棒の引張応力度減少量は約10%であり、コンクリートの有効プレストレスは139 kg/cm²となった。表-1に図-2に示す各

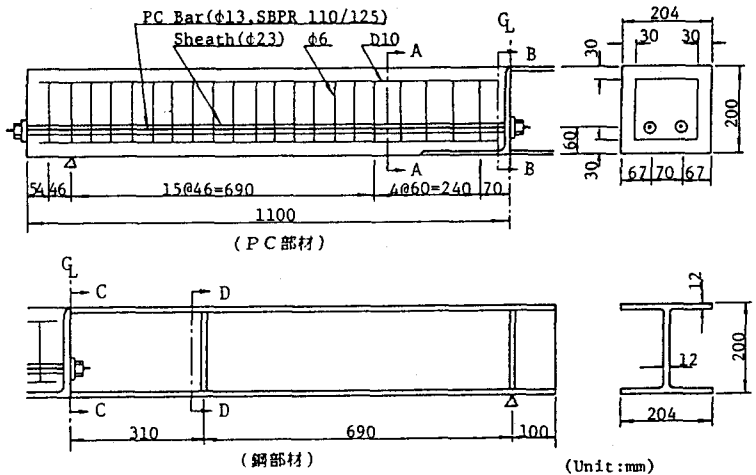


図-3 鋼・P C混合構造はり供試体

表-1 供試体断面の曲げ耐力と曲げ剛性

断 面	P C 部	継 手 部		鋼 部
	断面 A-A	断面 B-B	断面 C-C	断面 D-D
曲げ耐力 Mu (t・m)	5.25	4.48~ 12.67	6.47	11.95
曲げ剛性 EI (t・m ²)	0.43x10 ³ (0.14x10 ³)	0.70x10 ³ (0.64x10 ³)	0.98x10 ³	1.05x10 ³

注）（）内はコンクリートの引張抵抗を無視した場合

断面の曲げ破壊モーメントおよび曲げ剛性の計算値を示す。継手部（断面 B-B, C-C）の耐力ならびに曲げ剛性がP C母材の諸量を下回らないように設計上配慮している。

2.3 載荷試験

静的、疲労試験ともに、図-4に示すようなスパン2.0mの単純支持の2点線載荷方式により継手部に純曲げモーメントを作用させた。静的試験では、供試体が破壊に至るまで0.5t刻みで荷重を漸増させ、各荷重レベルにおいて、鋼、コンクリート部材および継手部の各変形量を測定した。

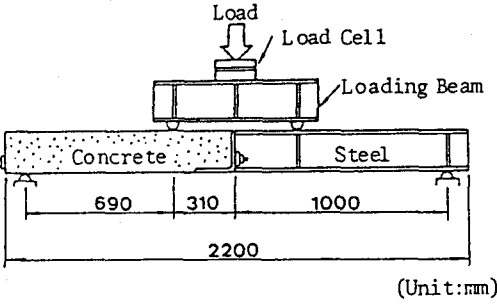


図-4 載荷試験方法

疲労試験では、静的試験結果に基づき、各タイプともに通常の設計荷重相当のディ・コンプレッションモーメント、すなわち静的荷重比（静的破壊耐力に対する繰り返し荷重の百分率比）40%、および高荷重レベルの荷重比70~85%を上限荷重に、また、荷重比10%を下限荷重に設定した。載荷速度は2~3 Hzで、任意回数繰り返し後、繰り返し載荷を中断して静的載荷を実施し、各データを測定した。なお、繰り返し回数 200万回において破壊しない供試体については以後の載荷を打ち切り、試験を終了した。使用した試験機および測定器は、島津サーボパルスEHF-30型（島津製作所、最大能力 静的:45t、動的:30t）、静ひずみ測定器TDS-301（東京測器研究所）である。

3. 静的試験結果および考察

3.1 接合面の相対変位とたわみ

端プレートとコンクリートの接合面の軸方向相対変位を図-5に、また、はりのスパン中央点の荷重-たわみ曲線を図-6に示す。各供試体の有効プレストレスに大差がないことから、ディ・コンプレッションモーメントに相当する荷重 P_{de} およびひびわれ発生荷重 P_{cr} の平均値を図中に示す。理論的には、ディ・コンプレッションモーメント以下の荷重に対しては、接合面に開口などの相対変位が発生しないはずであるが、実験ではわずかながら測定され、ディ・コンプレッションモーメントを超えて以後は、次第に増加している。また、端プレート圧着のみのNタイプが補強材を有する他の3タイプに比べて増加量が大きくなっている。この現象は、はりのたわみに直接的に現れており、接合面の相対変位が全体構造の曲げ剛性の低下を招くことが明らかである。また、継手補強材を有するR、S、Bの3タイプの間に今回の実験上、特に有意差は認められない。

この種の混合はりのはりのたわみ算定に対して、コンクリート部分の曲げ剛性を換算断面2次モーメントを用いて表し、計算した結果を図中に破線で示した。図より、ひびわれ発生以前においていずれの実験値に対しても過小評価している。継手部のセミ・リジッド特性をも考慮した適正な曲げモーメント剛性の評価について検討の必要があろう。

3.2 耐力

表-2に静的試験における各供試体のひびわれならびに曲げ破壊耐力の比較と破壊状況を示す。これらの値はいずれもPC断面におけるものである。ひ

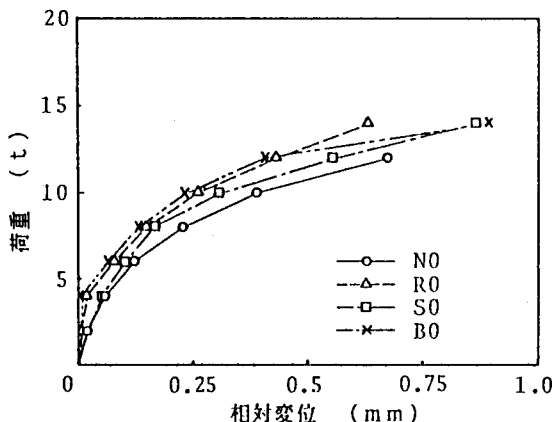


図-5 鉛直接合面の荷重-相対変位曲線

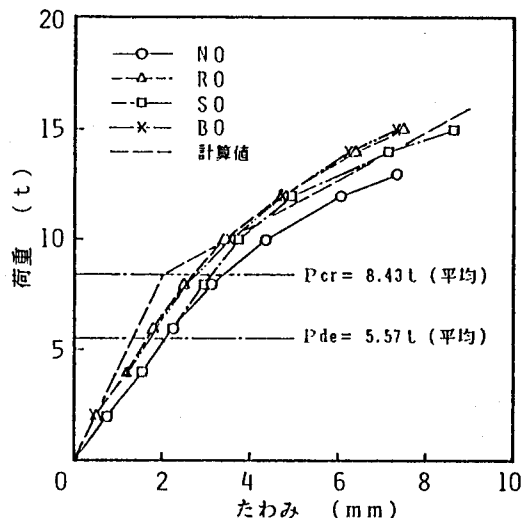


図-6 スパン中央点の荷重-たわみ曲線

表-2 静的試験結果

供試体	ひびわれ耐力 (tf・m)			終局耐力 (tf・m)			破壊状況
	実験値 M_{cr}	計算値 M_{cr}	$\frac{M_{cr}}{M_{cr}}$	実験値 M_u	計算値 M_u	$\frac{M_u}{M_u}$	
N O	2.07	2.92	0.71	4.83	5.25	0.92	接合面のPC鋼棒の破断 PC部の曲げ破壊
R O	3.11	2.87	1.07	5.73	5.25	1.09	
B O	2.76	2.91	0.95	5.62	5.25	1.07	
S O	3.11	2.91	1.08	5.59	5.25	1.06	

びわれ耐力の実験値は目視によるものであり、計算値との間に多少の誤差を含むが、このことを考慮してもひわれおよび破壊とも、耐力的にはNタイプはわずかに不足し、また、他のタイプはほぼ満足しうる結果といえよう。この原因としては、Nタイプを除く3タイプが典型的なPC断面の曲げ破壊パターンを示したのに対し、Nタイプでは、特にディ・コンプレッションモーメント以降、接合面に変形が集中し、PC鋼棒のみで引張力を負担するメカニズムとなり、最終的には接合面位置のPC鋼棒破断による破壊となったためと考えられる。

3.3 応力分布

図-7にN、R、Sタイプの鋼断面(D-D)、PC断面(A-A)および継手部断面(B-B、C-C)における断面高さ方向のひずみ分布を示す。鋼、PC部材のひずみ分布は平面保持則がほぼ成立しており、それに基づく計算値とも一致した。これに対し、端プレート圧着方式のNタイプでは継手部コンクリート圧縮縁付近の応力集中が顕著である。崎元ら⁷⁾によると、この応力集中を緩和させるためには端プレートの厚さを大きくすることが必要であり、本実験供試体の場合では2倍程度のプレート厚が必要となる。一方、補強材を配したR、Sタイプでは応力集中が緩和され、比較的スムーズな応力伝達が行なわれていることを示している。以上のことより、継手構造として、プレストレスと共にずれ止めやアンカー鉄筋などの継手補強材の併用が所要の耐力、剛性の確保と継手部のスムーズな応力伝達に有用であることが明らかにされた。

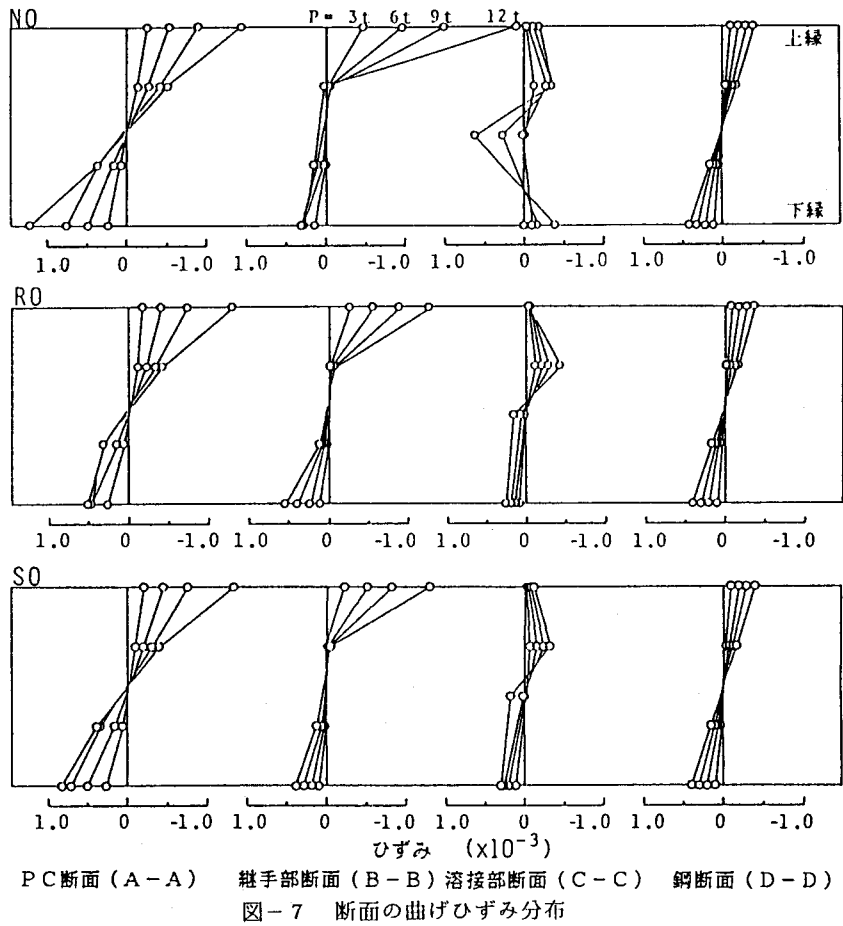


図-7 断面の曲げひずみ分布

4. 疲労試験結果および考察

4.1 低荷重繰返し下での疲労性状

表-3 に疲労試験結果の概要を示す。接合面にプレストレスが残存するディ・コンプレッションモーメント（静的荷重比40％）以下の繰返し載荷に対しては、各タイプともに破壊現象は観察されなかった。

図-8 に繰返し回数 1,100万,200万回におけるN、Rタイプ継手部の上、下縁の荷重-ひずみ曲線を示す。なお、Sタイプは定性的にも定量的にもRタイプと同様の傾向が認められたので、ここでは割愛する。図より、R、Sタイプのようにコンクリートと水平接合面をもつ下縁鋼板が引張応力を伝達しており、繰返し回数の増加に対して残留ひずみもほとんど生じないのに対し、Nタイプでは100万回から200万回にかけて圧縮縁、引張縁共にコンクリートの最大ひずみや残留ひずみの増加が認められる。

これら圧縮縁コンクリートの繰返し載荷によるひずみ振幅の変化をタイプ別に比較し、図-9 に示す。R、Sタイプ継手部のひずみ振幅は繰返し回数の増加に対して特に増加傾向が認められないのに対し、Nタイプ継手部のそれは100万回以上の載荷に対して増加しており、目視では観察できなかった継手部の疲労損傷が認められた。

4.2 高荷重繰返し下での疲労性状

表-3 に示すように、静的荷重比70％の繰返し載荷に対してはSタイプを除きいずれも継手部のウェブ溶接部の脆性亀裂による疲労破壊を起こした。また、Sタイプの85％荷重比の場合はやはり同様の破壊パターンを示した。破壊回数は、N70が23～35万回、R70が47～51万回、またS85が52万回であった。これらの破壊状況を図-10および写真-1に示す。図中の実線は初載荷時、破線は繰返し載荷時におけるひびわれを示している。このように、典型的なPC断面の曲げ破壊という静的試験のパターンとは異なるウェブ溶接部の脆性破壊を起こしたことは注目すべきことであり、改めて溶接部の疲労安全性の重要性を示唆したものといえる。

表-3 疲労試験結果

継手構造	供試体	繰返荷重 (t)		コンクリートひずみ ($\times 10^{-6}$)		最大繰返し回数 (万回)	破壊状況
		P _{min}	P _{max}	P _{min} 時	P _{max} 時		
N	N40	1.5 (10%)*	6.0 (40%)	101 (370) **	402 (884) ***	200.00	破壊せず
	N70-1	1.5 (10%)	10.0 (70%)	130 (124)	1101 (1596)	23.80	接合面の開口破壊 (継手ウェブ溶接部亀裂)
	N70-2	1.5 (10%)	10.0 (70%)	84 (157)	693 (1193)	34.90	接合面の開口破壊 (継手ウェブ溶接部亀裂)
R	R40	1.5 (10%)	6.0 (40%)	81 (141)	371 (596)	200.00	破壊せず
	R70-1	1.5 (10%)	11.0 (70%)	95 (126)	1122 (1204)	47.78	継手ウェブ溶接部亀裂 (PC鋼棒ねじ部破断)
	R70-2	1.5 (10%)	11.0 (70%)	80 (111)	822 (959)	50.72	継手ウェブ溶接部亀裂
S	S40	1.5 (10%)	6.0 (40%)	71 (116)	308 (482)	200.00	破壊せず
	S70	1.5 (10%)	11.0 (70%)	93 (81)	1054 (1299)	200.00	破壊せず
	S85	1.5 (10%)	14.0 (85%)	80 (101)	1300 (1199)	52.00	継手ウェブ溶接部亀裂

注) * 静的荷重比 (繰返荷重/静的耐力) ** PC部 (断面A-A) のひずみ *** 継手部 (断面B-B) のひずみ

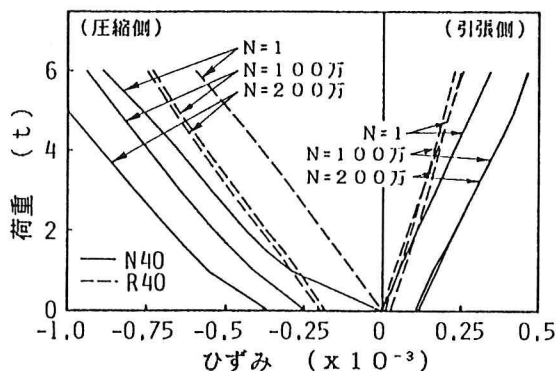


図-8 継手部の荷重-ひずみ曲線

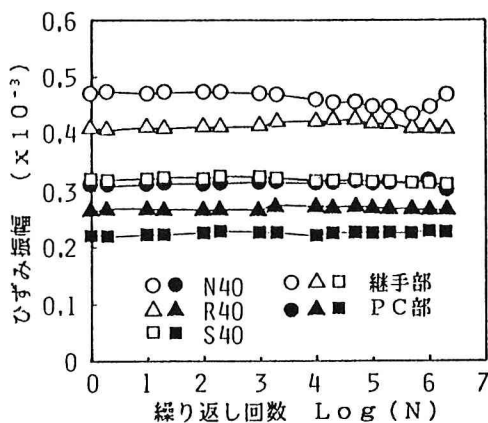


図-9 コンクリートのひずみ振幅-繰り返し回数曲線

次に、継手部上、下縁の荷重-ひずみ曲線を繰り返し回数 1、100万、200万回について図-11に示す。また、繰り返し回数とコンクリート圧縮ひずみ振幅の関係を図-12に示す。R、Sタイプでは疲労破壊に至るまでの性状は低荷重繰り返しの場合と特に差異はなく、繰り返し回数の増加に対して特にひずみ振幅の増加は認められない。これに対して、Nタイプでは荷重の増加につれて引張ひずみの増加が停滞し、接合面での引張応力の流れが次第にPC鋼棒へ移っていくのが推察される。また、それにともない荷重に対する圧縮縁ひずみの増加率が上昇し、同時に繰り返し回数の増加にとまなうひずみ振幅も10万回以降急増して、明らかに破壊の前兆が見られた。

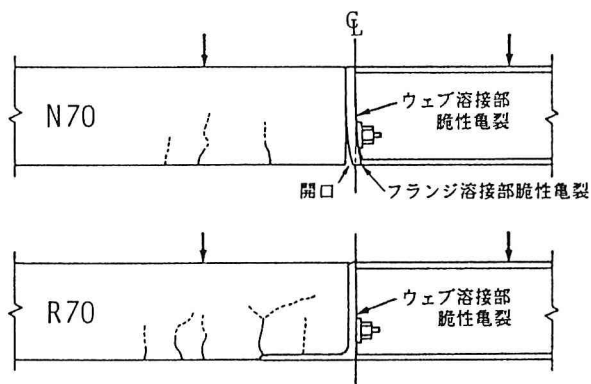


図-10 疲労破壊状況

5. まとめ

4種類の継手構造を有する鋼・コンクリート混合形式はりの静的ならびに疲労試験を行い、得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 端プレート圧着方式のNタイプ継手では、継手部の圧縮縁コンクリートへの応力集中が著しく、かつ耐力、曲げ剛性ともに不足する。これを回避するためには、端プレートの厚さをかなり大きくする必要があると思われる。

(2) 端プレートへのプレストレスとともに水平接合面へのアンカー鉄筋の定着による軸方向抵抗機能、スタッド、高力ボルトなどによるせん断抵抗機能を併用したR、S、Bタイプ継手では、Nタイプと同等の端プレート厚ながら、継手部の応力集中が著しく緩和され、所要の曲げ性能を保有することが示された。

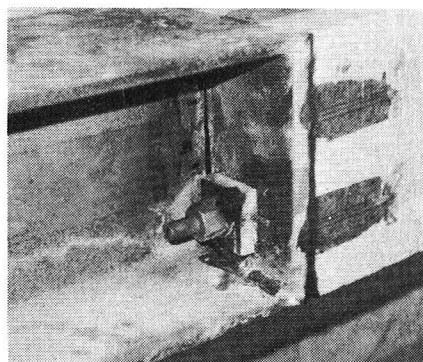


写真-1 ウェブ溶接部の疲労亀裂

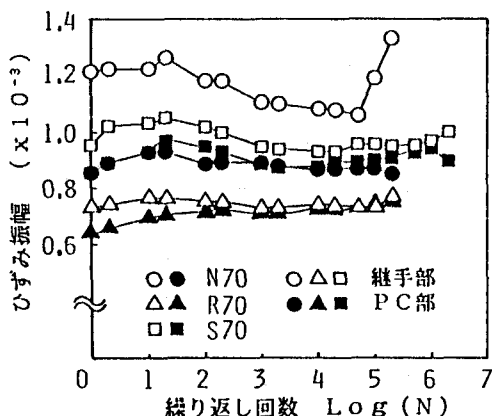


図-1 1 継手部の荷重-ひずみ曲線

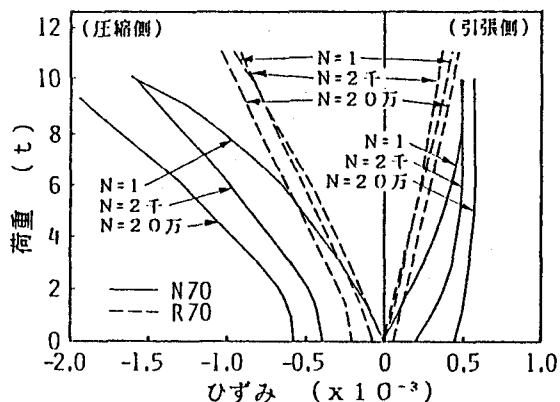


図-1 2 コンクリートのひずみ振幅-繰返し回数曲線

(3) ディ・コンプレッションモーメント相当の荷重レベルを上限荷重とする繰返し载荷に対しては、継手構造の種類によらず、いずれも200万回の繰返しに耐え、破壊に至らなかった。しかし、Nタイプ継手部では、100万回以降、圧縮縁コンクリートのひずみ振幅が急増し、疲労損傷が認められた。

(4) 静的荷重比70%以上の繰返し载荷に対しては、静的試験とは異なる継手部のウェブ溶接部の脆性亀裂による疲労破壊を起こした。また、破壊に至るまでの継手部のひずみ性状は静的荷重比40%の場合と特に顕著な差異は認められないが、Nタイプの変形性能の低下はさらに著しいものがあつた。

この種の混合構造形式の継手構造としては、まず接合面へのプレストレス導入(圧着方式)が基本になり、継手部でのスムーズな応力伝達を図るための構造検討が必要である。今後、継手諸元の定量的評価についてさらに検討を継続する予定である。

最後に、本研究を行うにあたり、昭和63年度文部省科学研究費(奨励研究(A))の補助を受けたことを記し、ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Modemann, J., Thönnissen, K.: Die Neue Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe/Neuss-Vedesheim, Bauingenieur, 54, 1979.
- 2) Kahmann, R., Köger, E.: Die Neue Tjörnbrücke, Konstruktion, Statik und Montage der Stahlkonstruktion, Bauingenieur, 57, 1982.
- 3) 森邦久: 生口橋の設計、鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、土木学会、1989.
- 4) 田島二郎、町田篤彦、睦好宏史: 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、7, 1983.
- 6) 日野伸一、浜田純夫、中野浩明、太田俊昭: 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、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1986.
- 7) 崎元達郎、須崎浩二、梶川靖治、平井一男: 鋼・コンクリート結合はりの曲げ強度実験、構造工学論文集、35A, 1989.