

各種の継手による鋼・コンクリート混合構造部材の曲げ性状

日野 伸一*・浜田 純夫*・兼行 啓治*
長谷川 博**・中野 浩明***

Flexural Behavior of Mixed Steel-Concrete Beams with Various Joints

Shinichi HINO, Sumio HAMADA, Keiji KANEYUKI,
Hiroshi HASEGAWA and Hiroaki NAKANO

Abstract

Mixed steel-concrete construction is very interesting and attractive to bridge engineers, who are eager to promote technological innovation. The mechanical joints such as used in Flehe Bridge and Mosel Bridge play an important role in the creative design of mixed structures. Fundamental research related to the joint of mixed structures is little presented, whereas the practical application has been extensively made in several countries.

The purpose of this study is to provide general information with regard to the optimum method of connection for mixed structures. Three types of mechanical joints were proposed herein, which can be applied to mixed steel-prestressed concrete (PC) or steel-reinforced concrete (RC) beams subjected to bending moment. A series of failure bending tests were carried out, in order to study strength and flexural behavior of the joints.

1. まえがき

従来の土木構造物は、鋼構造あるいはコンクリート構造（ここではRCまたはPC構造を意味する）というように、単一の構造体として建設されてきたが、最近、製作および維持費が安価で、騒音や低周波空気振動の発生率が低いコンクリート構造と、軽量でかつ靱性に富む鋼構造とを組合せた鋼・コンクリート合成構造物の有用性が着目されるようになってきた。

その中で、混合構造システムは、合成桁や合成床版のように部材断面が異種材料から構成されたものと異なり、異種材料から成る多数の異種部材の組合せによって構成された構造システムである¹⁾。その実施例は、西ドイツにおけるMosel橋²⁾ (Fig. 1(a))やFlehe橋³⁾ (Fig. 1(b))など、欧米を中心とした近代橋梁や石油生産プラントホームなどに多数見られるが、わが国に

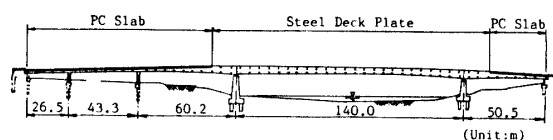


Fig. 1(a) Mosel Bridge

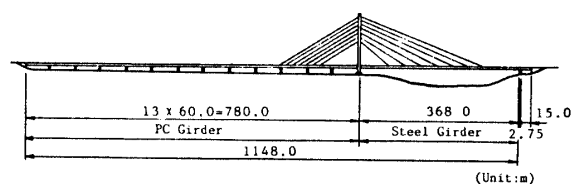


Fig. 1(b) Düsseldorf-Flehe Bridge

においては、現在のところ、国鉄の合成ラーメン高架橋⁴⁾など少数の土木構造物に適用されている程度である。言うまでもなく、この種の混合構造システムにおいては、鋼部材とコンクリート部材の合理的な接合方法およびその接合部の設計法を確立することが最重要課題であるが、現在、実用化のための技術開発が先行し、それらに関する基礎的研究は、著者らの知る限

*土木工学科

**短期大学部土木工学科

***大学院土木工学専攻

り少ないようである^{5) 6)}。

そこで、本研究は、鋼・コンクリート混合構造における継手の開発に対する基礎資料を得ることを目的に、3種類の継手構造を鋼・PC合成ばりおよび鋼・RC合成ばりに適用して曲げ破壊実験を行い、それぞれの混合構造部材および継手部の曲げ性状について比較検討するものである。

2. 実験方法

2.1 継手構造

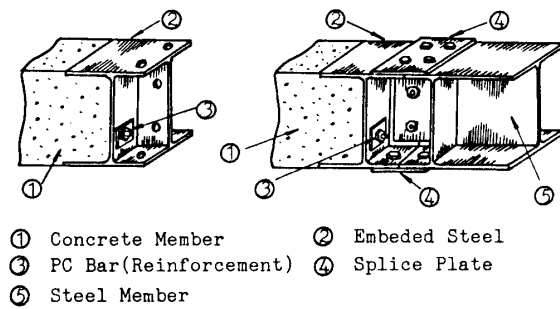


Fig. 2 Mechanical joint with channel steel

本研究で提案する継手構造の概略をFig. 2に示す。すなわち、そのメカニズムは、引張鋼材によるプレス

トレスまたは圧着力と継手補強材を併用して、溝形鋼を応用した継手金具を、弱点となる継手部のコンクリート端部に二軸方向から圧着することにより、接合面のずれやはだ離れを防止し、継手部の耐力および剛性の低下を抑制せんとするものである。

本実験で用いた3種類の継手には、いずれも継手金具とコンクリート部材との鉛直接合面に対して、PC鋼棒によるプレストレスあるいはPC鋼棒、引張鉄筋の定着による圧着力を与え、さらに各種の継手補強材をコンクリート中に配した。それらの詳細をFig. 3に、また、特徴を以下に示す。

(a) R型継手：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棒鋼D13 (SD30)をフープ筋として幅方向に3本溶接した。Mosel橋の継手構造に類似した構造である。

(b) S型継手：ずれ止めとしてスタッドジベルを用いた構造で、合成桁の他、Flehe橋などの混合構造橋梁などに最も実施例が多い。ここでは、異形棒鋼D13、高さ75mm (SD30)を上下の水平プレートに各3本溶接した。

(c) B型継手：ボルト接合を応用したもので⁷⁾、高力ボルト (F10T, M10)をおよそ2~3tのボルト軸力で締めつけ、接合面の圧着力とボルト自身の水平せん断抵抗力の相乗効果を期待する構造である。

2.2 供試体

供試体は、鋼部材としてH形鋼材 (200×200×8×12mm, S S41)を、また、コンクリート部材としてPCポストテンション部材またはRC部材をそれぞれ用いたはり構造とし、中央で上記の各継手を介して連結した。供試体の種類をTable 1に示す。PC、RC部材の断面および配筋をFig. 4に、また、これらのコンクリート配合をTable 2に示す。使用材料として、宇部早強ポルトランドセメント (比重3.12)、北九州市若松産海砂 (比重2.55, FM2.73)、山口市宮野産砕石 (最大寸法20mm, 比重2.71, FM6.81)およびマイティー150 (花王石鹼製)を用いた。

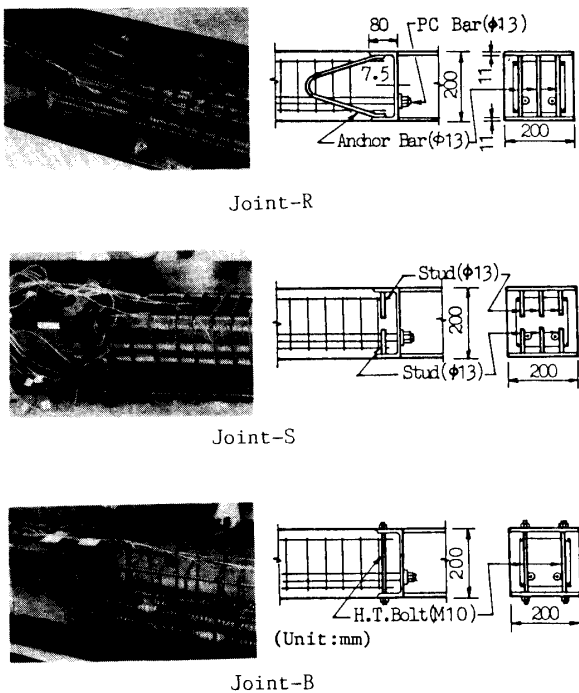


Fig. 3 Details of test joints

Table 1 Test specimens

Beam	Steel-PC	Steel-RC
Joint-R	RPC	RRC
Joint-S	SPC	SRC
Joint-B	BPC	BRC

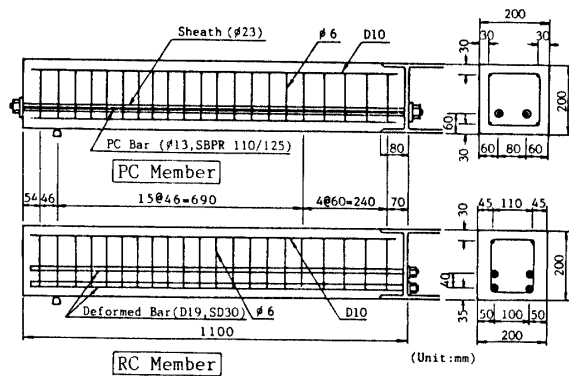


Fig. 4 Dimensions of concrete specimens

Table 2 Mix proportion of concrete

Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Content (kg/m ³)				
			Water W	Cement C	Fine Ag- gregate S	Coarse Ag- gregate G	Ad- mixture
12	40	44	179	447	742	1008	3.353

PC部材のプレストレス導入は、コンクリート材令14日目に50tセンターホールジャッキを用いて行い、PC鋼棒(SBPR 110/125, φ13)を緊張した後、シーす内をグラウトした。載荷試験までのPC鋼棒の導入引張力の減少量は、あらかじめ鋼棒に貼付したワイヤ・ストレーンゲージにより測定し、その結果の一部をFig. 5に示す。これより、載荷時におけるPC鋼棒の有効引張力およびコンクリート下縁の有効プレストレスを求め、ひびわれおよび破壊曲げモーメントを計算した。また、RC部材の主鉄筋にはネジフシ鉄筋D19(SD30)を用い、継手金具に端部をナット定着した。鋼材およびコンクリートの力学的性質は、それぞれTable 3, 4に示すとおりである。

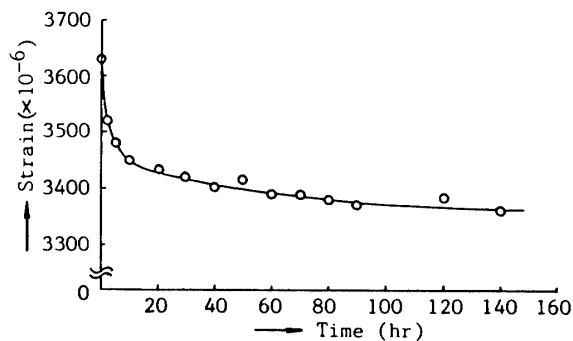


Fig. 5 Reduction in strain in the prestressing steel

Table 3 Material properties of steel

	Yield Point (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
PC Bar φ13 (SBPR 110/125)	14500	15000	2.10 × 10 ⁶
D19 (SD 35)	3620	5390	2.06 × 10 ⁶

Table 4 Material properties of concrete

Specimen	Compressive Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
PC	RPC	674	36.2
	SPC	613	39.0
	BPC	627	38.3
RC	RRC	692	37.3
	SRC	668	33.8
	BRC	662	34.3

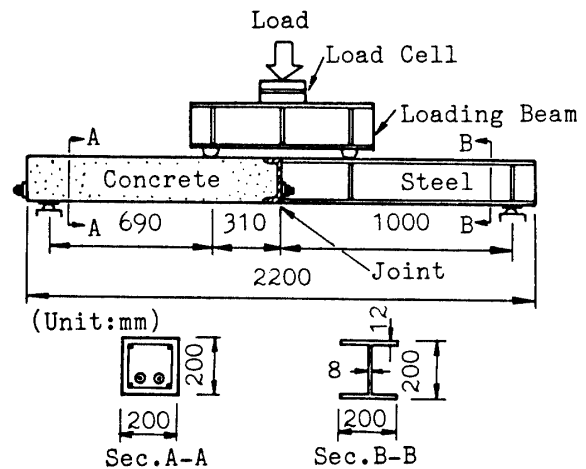


Fig. 6 Setup of test specimen

以上より、H形鋼断面の降伏曲げモーメント、PC、RC断面の破壊曲げモーメントおよび各々の弾性曲げ剛性は、それぞれH形鋼：11.8tm, 9.91 × 10²tm², PC：5.34tm, 4.94 × 10²tm², RC：5.29tm, 2.20 × 10²tm²である。

2.3 載荷試験

載荷試験は、継手部に純曲げモーメントを作用させるため、Fig. 6に示すように支間2.00mの単純支持による2点集中載荷とし、部材が破壊に至るまで荷重を

0.5 t 刻みに漸増した。そして、各荷重段階ごとに、ひびわれ、たわみ、ひずみおよび接合面のずれを測定した。ひびわれの観測は目視によるものとし、たわみ、ひずみおよびずれの測定には、それぞれダイヤルゲージ、ワイヤ・ストレインゲージおよびパイ型変位計(P I-2-50, 東京測器研究所製)を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 合成部材の耐力と変形状

3.1.1 ひびわれ耐力および終局耐力

供試体のひびわれモーメントおよび破壊モーメントについて、実験値と計算値の比較をTable 5に示す。

Table 5 Cracking and Ultimate moments of specimens

Specimen	Cracking Moment (tf.m)			Ultimate Moment (tf.m)			
	Test	Theory	M_{cr}	Test	Theory	M_u	
	M_{cr}	\bar{M}_{cr}	\bar{M}_{cr}	M_u	\bar{M}_u	\bar{M}_u	
PC	RPC	2.10	2.05	1.02	5.59	5.12	1.09
	SPC	1.59	2.09	0.76	4.80	5.03	0.95
	BPC	2.10	2.08	1.01	5.04	5.05	1.00
RC	RRC				5.78	5.29	1.09
	SRC				5.01	5.26	0.95
	BRC				5.52	5.26	1.05

ここで、 M_{cr} は目視によるひびわれ発見時の曲げモーメントであり、 \bar{M}_{cr} および \bar{M}_u はいずれも道路橋示方書⁸⁾に基づく計算値である。これより、鋼・PC合成部材のひびわれ耐力の実験値をその計算値と比較すると、S型継手の場合におよそ25%の耐力低下がみられたが、R型、B型継手の場合はほぼ同一の強度を示した。

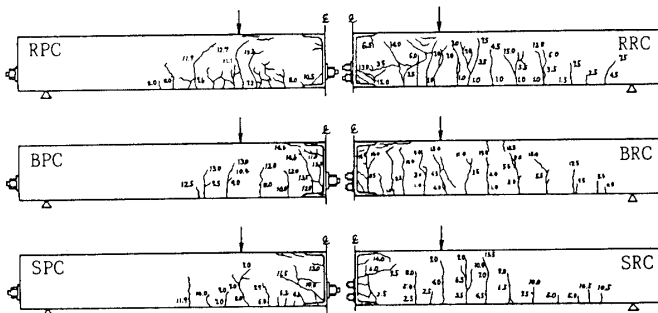


Fig. 7 Crack pattern of test specimens

また、終局耐力については、鋼・PCおよび鋼・RC合成部材のいずれもS型継手でわずかな耐力低下が認められたのに対し、R型、B型継手では両者とも全く遜色のない結果を示した。

3.1.2 ひびわれ性状

Fig. 7に各供試体のひびわれ分布状況を示す。継手部を除くコンクリート部材のひびわれ分散性は、継手形式によらずほぼ同様である。特に、RC部材において分散性が良好であるのは、主鉄筋として異形棒鋼を用いたためである。継手形式で比較すると、R型継手では終局荷重近くまで継手部にひびわれがほとんど発

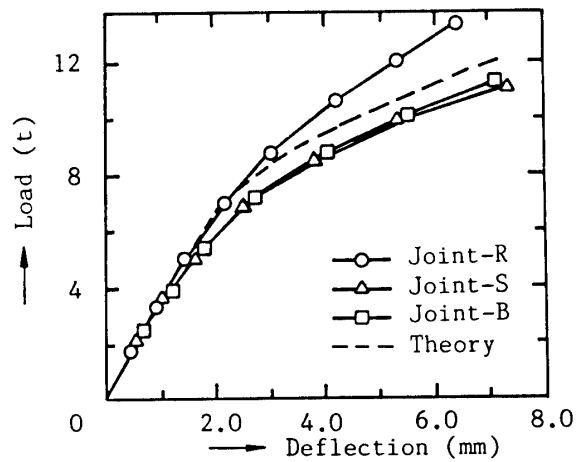


Fig. 8 Load-deflection relationships (Steel-PC beams)

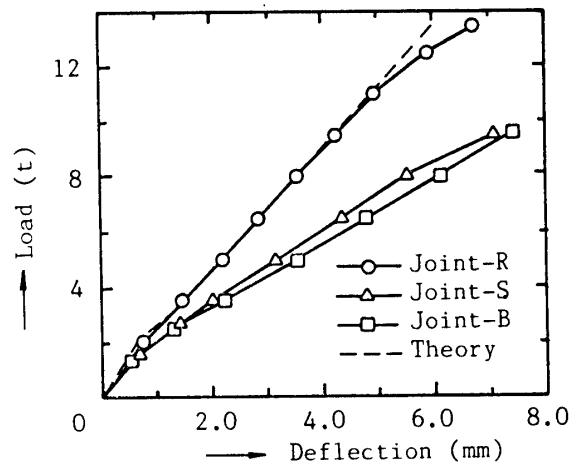


Fig. 9 Load-deflection relationships (Steel-RC beams)

生しなかったのに対し、S型、B型継手では、比較的早期の荷重段階より接合面のずれや継手内部のひびわれが認められた。しかし、それが部材として致命的欠陥となるほどのものではなかった。

破壊パターンは、PC、RC合成部材を問わず、R型継手の場合には載荷点付近のフープ筋端部、S型、B型継手の場合には継手金具の水平プレート端部のコンクリートがそれぞれ圧潰し、部材の破壊に至った。

3.1.3 たわみ性状

鋼・PC、鋼・RC合成部材の荷重-たわみ曲線を Fig. 8, 9に示す。ここで、計算値は弾塑性はり理論⁹⁾

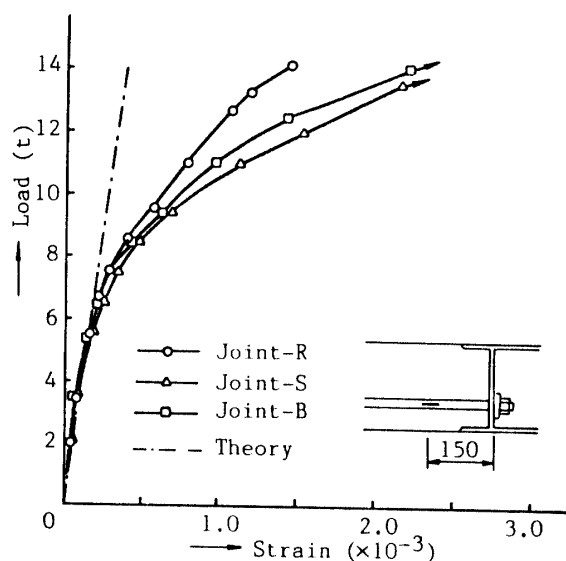


Fig. 10 Load-strain relationships in prestressing steel (Steel-PC beams)

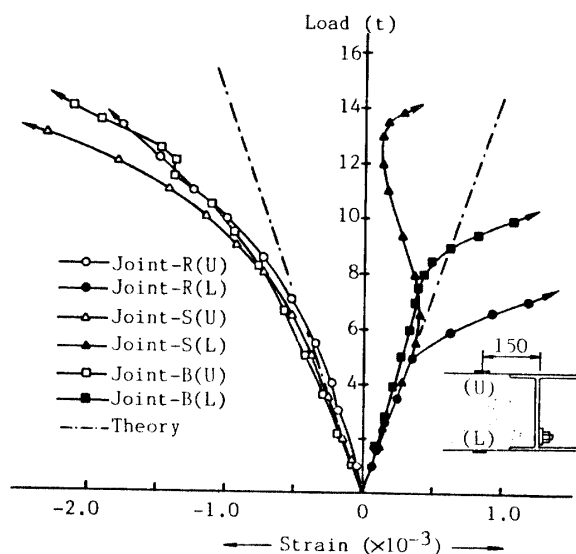


Fig. 11 Load-strain relationships in concrete (Steel-PC beams)

によるものである。これより、PC合成部材では、コンクリートのプレストレスが消失する。いわゆるDecompression・モーメントに相当する荷重4 t付近までは、継手形式に関わらず、継手部の一体性が十分に保持され、所要の曲げ剛性を有していることがわかる。しかし、接合面のプレストレスが消え、引張応力が増加し始めると共に、S型、B型継手を有する合成部材の曲げ剛性は次第に低下している。これに対して、R型継手を有する合成部材は終局時まで高い剛性を保持しており、継手部の一体性の良さを示している。このようなDecompression・モーメント以降にみられたPC合成部材のたわみ性状は、RC合成部材においても同様で、載荷初期より顕著に認められた。

3.1.4 鋼およびコンクリートのひずみ性状

鋼・PC合成部材について、接合面より15cm離れた部材本体におけるPC鋼棒、コンクリートおよびH形鋼の荷重-ひずみ関係を、Fig. 10, 11, 12に示す。図中、破線は通常の単体断面諸元を用いた弾性解である。以上の結果より、接合面より15cm（継手金具の水平プレート端部より7cm）離れた位置では、継手形式に関わりなく、いずれも単体部材としての応力性状を示していることがわかる。

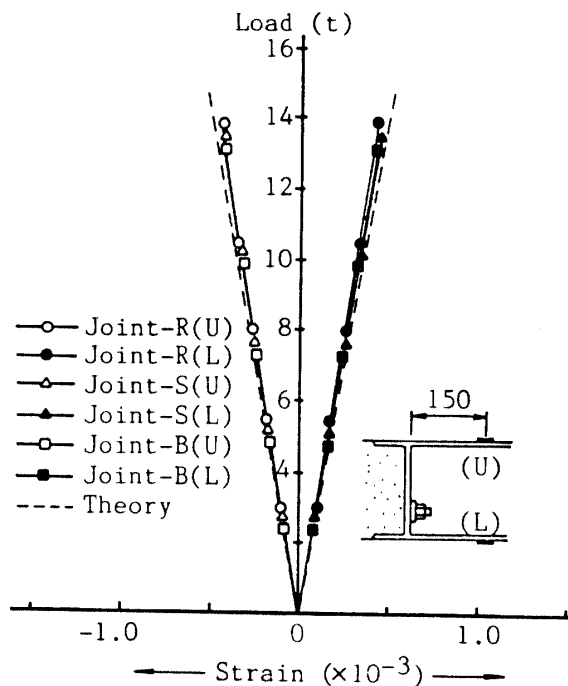


Fig. 12 Load-strain relationships in steel H-section (Steel-PC beams)

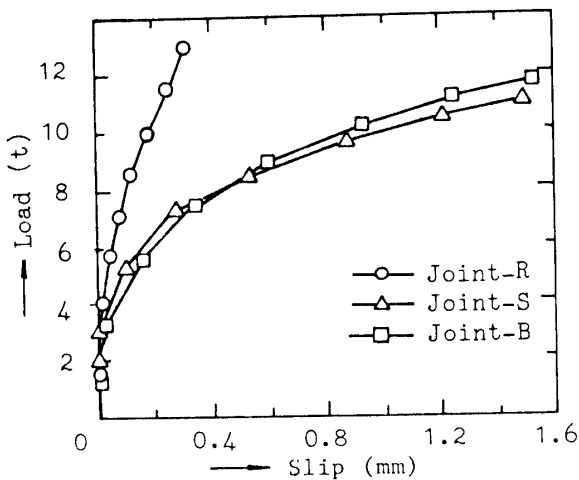


Fig. 13 Load-slip relationships on the steel-concrete contact surface (Steel-PC beams)

3.2 継手部の変形状

3.2.1 接合面の相対的ずれ

継手金具とコンクリート部材との接合面の相対的ずれ（鋼・PC合成部材）をFig. 13に示す。R型継手のずれは、コンクリート部材にひびわれ発生が認められた6 t 載荷時で0.05mm、終局時で0.39mmと小さく、部材に生じた主たるひびわれ幅以下に抑えられた。これに対して、S型、B型継手における接合面のずれは、6 t 載荷時にそれぞれ0.15, 0.19mmとR型継手に比べてかなり大きく、かつその後の増加が顕著であった。これは、接合面のずれもさることながら、継手内部のコンクリートに生じたひびわれの成長が測定値に含まれているためと考えられる。

また、鋼・RC合成部材の場合についても、継手形式によるずれ性状は同様であり、特に、接合面にプレストレスが存在しないために、S型、B型継手におけるずれの進展は、鋼・PC合成部材の場合よりも早くかつ大きくなっている。

以上より、接合面の相対的ずれが、明らかに合成部材としての曲げ剛性に顕著な影響を及ぼしており、本実験におけるR型継手構造は、この種の混合構造部材の一体性に対してきわめて効果的であったといえる。

3.2.2 鋼およびコンクリートのひずみ性状

継手金具およびその付近の鋼部材のひずみ（鋼・PC合成部材）をFig. 14, 15に示す。図中、破線はFig.

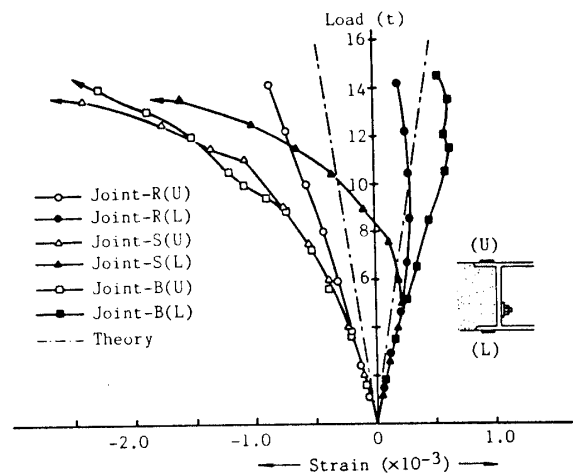


Fig. 14 Load-strain relationships in joint plate (Steel-PC beams)

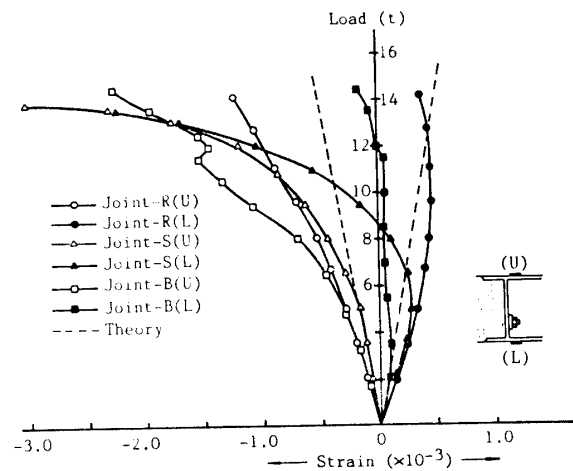


Fig. 15 Load-strain relationships in steel H-section near the joint (Steel-PC beams)

10~12と同様に、H形鋼断面または換算断面の諸元に基づく弾性計算値である。これより、通常の弾性応力式による計算結果は継手部の変形および応力をかなり過小評価することがわかる。したがって、継手部の設計に際してはこの点に留意することが重要であり、たとえば、継手部の不完全剛結性を考慮した応力解析法¹⁰⁾の適用は有用な一方法であると考えられる。

また、高荷重領域において、圧縮ひずみが卓越しており、特にS型継手においてその傾向が著しくなっているが、これは、継手内部のコンクリートの回転変形

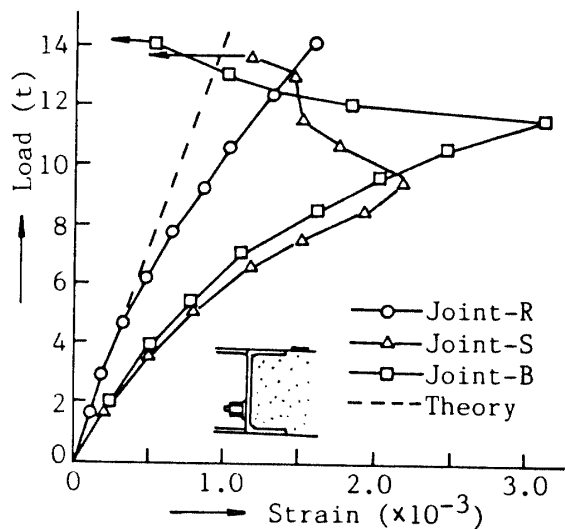


Fig. 16 Load-strain relationships in concrete near the joint (Steel-PC beams)

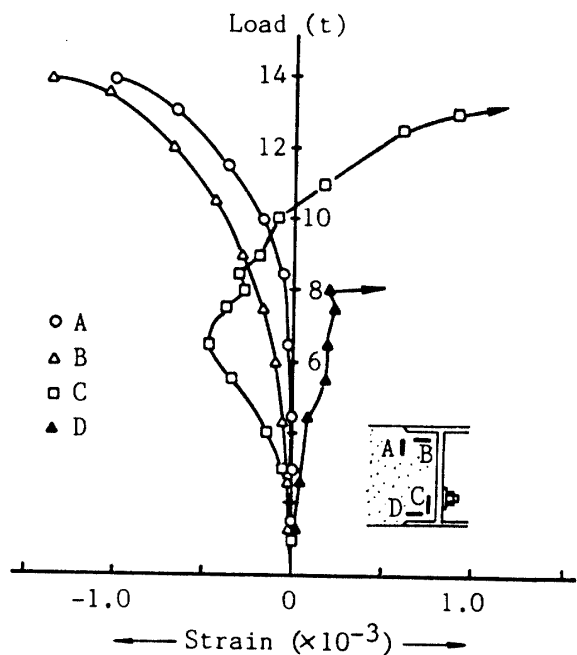


Fig. 17 Load-strain relationships in concrete in the joint (Steel-PC beams)

に伴い、水平プレートに二次的な曲げ応力が発生したためであり、これを抑制する上でも上下の水平プレートを直結したR型継手あるいはB型継手は効果的である。

Fig. 16に、継手金具の水平プレート端部のコンクリートひずみ（鋼・PC合成部材）を示す。先に破壊

パターン(3.1.2)で述べたように、S型、B型継手では、継手金具とコンクリート部材の境界付近で過大の応力集中が認められた。これに対して、R型継手では、実験値が単体断面としての計算結果とよく一致しており、R型継手におけるフープ筋は、継手部の一体性を保持するだけでなく、継手部とコンクリート部材との極端な曲げ剛性の不連続を緩和し、円滑な応力伝達を行う相乗効果を発揮すると考えられる。

Fig. 17は、S型継手を有する鋼・PC合成部材における継手内部のコンクリートひずみを示したものである。継手内部に発生したひずみとしては、このS型継手が最大であるが、総体的に判断して、継手内部のひずみは終局付近まで比較的小さく、内部のコンクリートがSemi-rigidな変形を起こしていると推測される。

3.2.3 継手補強材のひずみ性状

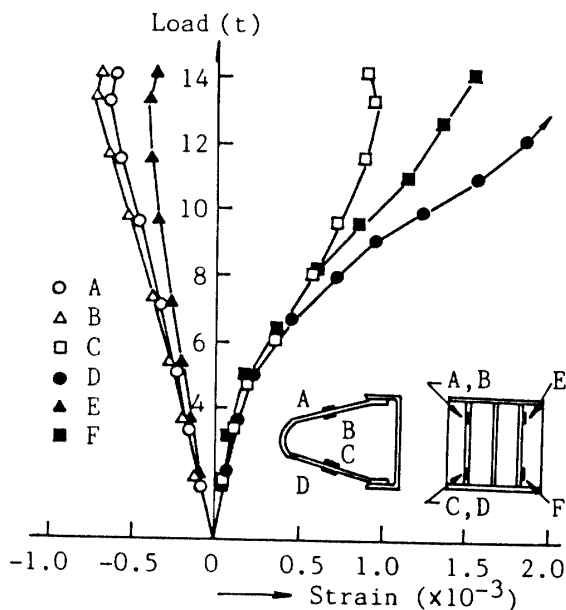


Fig. 18 Load-strain relationships in hoop reinforcement of Joint-R (Steel-PC beams)

Fig. 18に、R型継手におけるフープ筋のひずみ（鋼・PC合成部材）を示す。荷重の増加と共にフープ筋のひずみは線形的に増加しており、これが継手部の一体性、そして継手部付近の応力分担に有効に作用したことを示している。

S型継手におけるスタッドのひずみ（鋼・PC合成部材）をFig. 19に示す。スタッドには、せん断と引

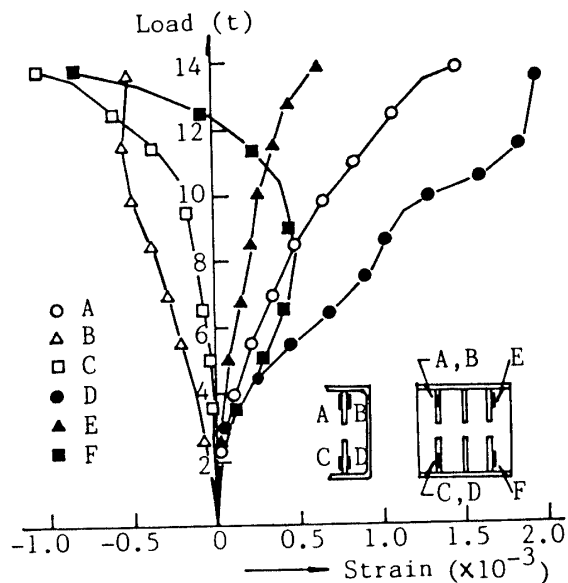


Fig. 19 Load-strain relationships in stud connector of Joint-S (Steel-PC beams)

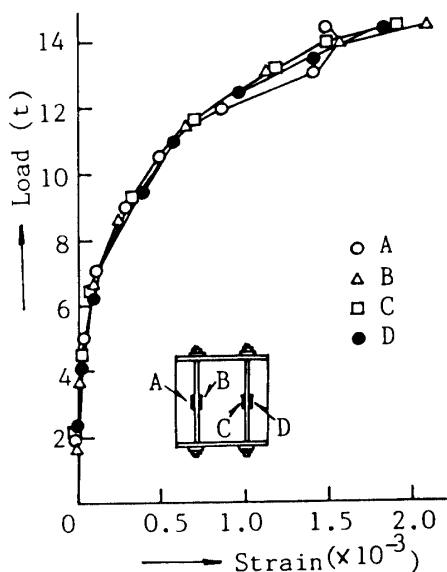


Fig. 20 Load-strain relationships in H.T.bolt of Joint-B (Steel-PC beams)

き抜きによる複合応力が作用し、しかも継手内部のコンクリートに斜めひびわれが発生することもあり、各スタッドのひずみは複雑に変化している。S型継手の有効性に関しては、供試体寸法ならびに継手諸元などのために、本実験では十分な説明はできず、さらに継続的検討を行う必要がある。

Fig. 20にB型継手における連結ボルトのひずみ(鋼

・PC合成部材)を示す。図より、コンクリート部にひびわれの発生するおよそ6 t 載荷時まで、ボルトの軸力増加はみられない。これは、あらかじめボルトに与えた締付け軸力による接合面への圧着力のためと考えられる。また、荷重6 t 以上ではボルト軸力は次第に増加し、終局時には載荷前に比べておよそ4500 kg/cm²もの応力増加となっている。これは、継手部の一体性に対するボルトの有効性を示唆するものである。

なお、以上の各継手補強材について、今後、さらに繰り返し荷重下での挙動、ならびにそれらの定性的、定量的評価についての詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究は、鋼・コンクリート混合構造における継手の開発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。得られた結果を要約すれば、次のとおりである。

(1) 混合構造部材の接合には、鋼・コンクリート接合面における部材軸方向のプレストレス導入がきわめて効果的である。

(2) R型継手におけるフープ筋は、継手部の一体性確保および曲げ剛性の不連続性の緩和に対する相乗効果を発揮し、合成部材として所要の耐力や変形性能を保有することができた。

(3) スタッドジベルやボルト接合を応用したS型およびB型継手に関しては、本実験の範囲内では継手部の一体性に対し満足しうる結果が得られなかったが、それが、これらの継手構造の本質的問題を直接的に示唆するものではなく、あくまで量的評価の差異によるものと考えられる。

(4) この種の混合構造部材の、合成部材としての耐力や変形挙動は、通常の単体構造物に対する解析法で十分に追跡できるが、継手部の応力や変形については過小評価するため危険である。したがって、それに対しては、接合面の不完全剛結性を考慮した解析法が有用な一方法であると考えられる。

なお、本研究は、静的曲げモーメント荷重のみを対象としたが、今後、せん断力、さらには繰り返し荷重の作用下で、継手構造の有用性について検討を行う予定である。

最後に、本研究について、いろいろと御指導、御助言を賜った九州大学太田俊昭教授、および卒業研究として御協力いただいた梅枝寿臣氏(現(株)銭高組)に対し、心より感謝の意を表します。また、本研究は、昭

和58年度文部省科学研究費（奨励研究A）の補助を受けた。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 前田幸雄：土木における合成構造，コンクリート工学，21，No. 12（1983）
- 2) Lehmann, G., Schaber, E. und Aschrafi, M. : Bau der Moselbrücke zwischen Kobern-Gondorf und Niederfell, Der Stahlbau, 49（1980）
- 3) Kahmann, R. und Koger, E. : Die Neue Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe, Bauingenieur, 54（1979）
- 4) 阿部英彦：鉄道用合成構造についての研究，鋼構造の研究（奥村敏恵教授還暦記念会）（1977）
- 5) 田島二郎，町田篤彦，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）
- 6) 若下藤紀：合成構造橋梁の継手部の応力，橋梁と基礎（1983）
- 7) 太田俊昭，日野伸一：鋼ジョイントで接合されたプレキャストコンクリート部材の強度と変形，土木学会論文報告集，No303（1980）
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅲ（1978）
- 9) 太田俊昭，中沢隆雄：はり理論による鉄筋およびプレストレストコンクリートばりの弾塑性解析，土木学会論文報告集，No276（1978）
- 10) 日野伸一，太田俊昭：鋼・コンクリート合成構造物における継手構造の開発に関する研究，第30回構造工学シンポジウム論文集（1984）

（昭和59年10月15日受理）