

(10) 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

○ 日 野 伸 一※ 太 田 俊 昭※※

1. まえがき

コンクリート構造物に対するプレキャスト化は、工期の短縮化や省力化などから今や世界的な趨勢にある。また、従来単一の構造物として建設されてきた土木構造物が、最近、鋼構造とコンクリート構造の両者の長を合理的に組合せた鋼・コンクリート合成構造物として、その有用性を高く評価されるようになってきた。しかし反面、それらの歴史がまだ浅いこともあって未解明な問題が少なからず残されており、特にその中でも合理的な継手構造の開発は最重要課題といえよう。

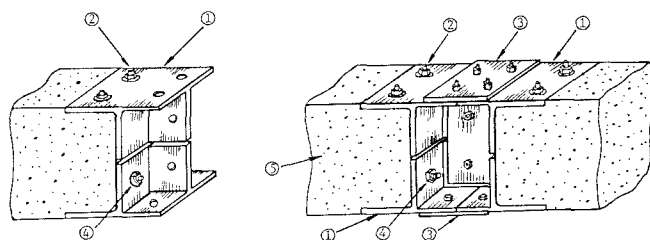
以上の背景より、本研究は、プレキャスト構造物や鋼・コンクリート合成構造物に対して、社会的ニーズに対応し、かつ力学特性のすぐれた新しい継手構造の開発とその合理的設計手法の確立に必要な基礎的知見を得ることを目的とするものである。本論文では、その一例としてボルト締め鋼継手構造を提案すると共に継手部の解析法を示し、その有用性について考察する。また、今日損傷の著しい道路橋鉄筋コンクリート床版の取換え等に活用されているプレキャスト合成床版を取り上げ、その床版相互の継手構造への適用性について検討する。

2. 曲げを受けるボルト締め鋼継手構造

2.1 継手構造と連結部材の曲げ性状

鋼継手を用いてプレキャストコンクリート部材を連結する場合、または鋼部材とコンクリート部材を直接連結する場合に最も問題となるのは、鋼・コンクリート接合面の一体性である。すなわち、本来異種材料である鋼とコンクリートの接合面における不完全剛結現象（はだ離れ、ずれ）に起因した連結部材の耐力や変形性能の低下をいかに抑制するかが重要な問題である。

本章では、上記接合面の不完全剛結現象を、引張鋼材の定着と断面高さ方向のボルトの締付けによって対処する継手構造を提案し、長方形断面のコンクリート部材相互の連結に適用した例



- ① Steel Angle Plate
- ② Connecting Bolt
- ③ Splice Plate
- ④ Reinforcing Bar (or PC Bar)
- ⑤ Precast Concrete Member

図-1 ボルト締め鋼継手構造

※ 山口大学工学部土木工学科

※※ 九州大学工学部土木工学科

を図-1に示す。これは、あらかじめコンクリート部材の製作時に接合端部に取付けた鋼製金具を、架設現場において接合一体化するもので、現場での連結または取換え作業の急速化、単純化が可能となる。もちろん、連結部材の片方が鋼部材である場合にも従来の鋼部材相互の連結方法をそのまま適用することができる。

そこで、このボルト締め鋼継手を用いた鉄筋コンクリート連結部材およびそれと同一諸元を有する比較用単体部材の曲げ試験を実施し、その結果の一部を写真-1および図-2

に示す。なお、はり供試体の諸元は幅10cm、高さ20cmの長方形断面でスパン150cmに対し、使用した鋼継手のそれは、板厚10mm、水平長

9cmの山形鋼と締付け軸力2tの連結用ボルトM12である。また、接合面にはエポキシ樹

脂接着剤を塗布した。これより、連結および単体部材の終局曲げ耐力はほぼ同等の値を示すと共に、継手部を除いて両者のひびわれパターンは同様の傾向が認められた。また、連結部材の継手部の剛性は終局時まで高く、たわみは単体部材のそれを下回った。

以上のように、この種の継手構造を有する連結部材の力学特性は、接合面の剛結性を確保することによって、同一諸元の単体部材のそれと全く遜色のないものにすることが可能であることが明らかにされ、ゆえに、これら継手諸元をいかに合理的かつ経済的に設計するかが今後の重要な課題となる。

2.2 不完全剛結性を考慮した継手部の解析法

前記の継手構造を合理的に設計するためには、やはり鋼・コンクリート接合面の不完全剛結現象によって継手部に発生する局所的な変形や応力を無視することはできない。したがって、継手諸元の設計にあたっては、まず継手部の挙動を的確に解明しうる平易な解析方法を明らかにする必要があると思われる。

そこで、鋼・コンクリート接合面の不完全剛結性を考慮した、曲げを受ける継手部の解析法を以下の仮定のもとに提案する。

- (1) 継手部を、鉛直プレートで固定端とする一種の片持ばりとみなす。
- (2) コンクリート部材と鋼継手の水平プレートは、ボルト結合点A、Bで完全剛結されている。
- (3) 継手内部のコンクリート部材が剛体的に回転し、それに伴い水平プレートは弾性変形を生じる。
- (4) 引張側の水平プレートとコンクリート部材の接合面に、両者の相対的なすべりに伴うせん断応力 $f(x)$ が発生する。また、端部におけるすべり量は F/kA_0 (F : 水平接合面の全せん断力、 k : 単位面積あたりの平均せん断力とすべり量との比を表わす定数、 A_0 : 引張側水平接合面の断面積)で



写真-1 連結部材および単体部材の破壊状況

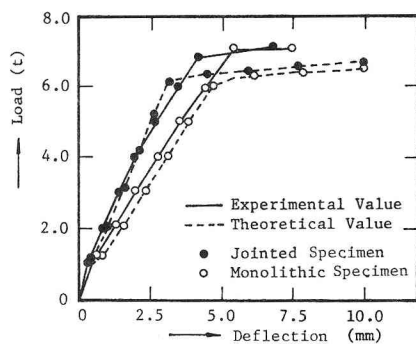


図-2 支間中央点の荷重-たわみ曲線

線形表示される²⁾。

さて、継手内部におけるコンクリート部材の剛体的回転変形に対しては、載荷状態や構造条件などを考慮して、最適な回転中心を選ぶことが必要であるが、ここでは、最も一般的な圧縮側隅角部を中心とする³⁾回転変形を起こす場合について理論を展開する。すなわち、図-3に示すように、水平プレートとコンクリート部材の結合点A、Bは、水平、垂直および回転変位 (w_A, v_A, ϕ_A)、(w_B, v_B, ϕ_B) を起こし、それぞれA'、B'に移動する。したがって、これらの変位に対応する力およびモーメント Z, Y, M がコンクリート部材と水平プレートに相互に作用し、伝達される。また、引張側水平接合面にせん断応力 $f(z)$ 、鉄筋定着点に引張力 T_S 、さらには回転中心R点に反力 R_Y, R_Z がそれぞれ作用する。よって、継手部におけるこれらの力およびモーメントのつり合い条件式は次式のように与えられる (図-4 参照)。

$$\{P\} = [A]\{S\} \quad \text{————— (1)}$$

ここに、 $\{P\}$: 継手部にはたらく外力ベクトル、 $\{S\}$: 接合面に作用する内力ベクトル、 $[A]$: 係数マトリックス。また、接合面のボルト結合点や鉄筋定着点などの幾何学的変位量は ϕ を用いて次式で示される。

$$\{u_g\} = \phi \{B\} \quad \text{————— (2)}$$

ここに、 $\{u_g\}$: 接合面の幾何学的変位ベクトル、 $\{B\}$: 係数ベクトル。

一方、水平プレートは仮定(3)より弾性変形し、それに伴う接合面の弾性変位は次式のように表わされる。

$$\{u_e\} = [F]\{S\} \quad \text{————— (3)}$$

ここに、 $\{u_e\}$: 接合面の弾性変位ベクトル、 $[F]$: 継手に関する柔性マトリックス。また、接合面の変位に関する適合条件より次式の関係が成り立つ。

$$\{u_g\} = \{u_e\} \quad \text{————— (4)}$$

以上の各式を連立して解くことにより、接合面に作用する諸力 $\{S\}$ および回転変位 ϕ が求められ、これによ

って接合面の不完全剛結性により発生する継手の変形および応力が比較的平易に算定される。

したがって、以上の解析結果から継手金具水平プレートの諸元を許容応力度設計法に基づき決定することができる。また、接合面の付着力や接着剤による接着力を無視できるならば、図-4の Z_A およ

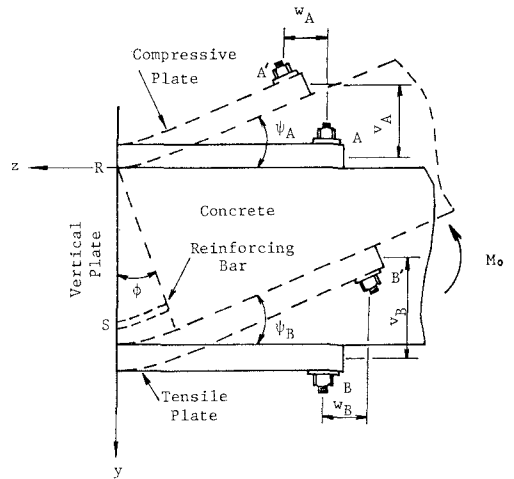


図-3 継手部の変形状態

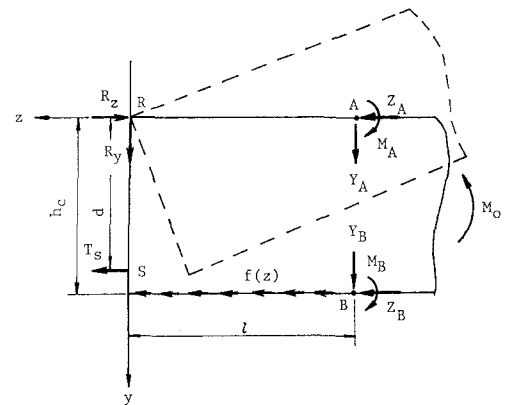


図-4 継手部に作用する力

び Z_b は接合面の相対的なすべりに対するボルトのずれ止めとしてのせん断抵抗力を表わし、また $f(z)$ はボルトの締付け軸力に伴う水平接合面のせん断力を示すものと考えられるので、これを考慮して連結ボルトの材質、寸法と締付け軸力を決定することができる。

2.3 実験による解析法の検討

(1) 実験方法

実験供試体は図-5に示すようなH形鋼部材-鉄筋コンクリート部材から成る連結部材とし、継手部に純曲げモーメントが作用するように2点集中荷重によるはりの曲げ試験として載荷試験を実施した。この供試体(設計曲げモーメント0.70tm)に対する継手諸元を2.2

の解析法に基づき算定した結果、水平プレートの所要厚さ3mm、長さ6.3cm(使用鋼材SS41)、また、連結ボルト(F10T)M10、その所要締付け軸力0.5tとなった。そこで実験変数として、連結ボルト(F10T,M10)の締付け軸力、水平プレート

の板厚、引張鉄筋の継手金具への定着の有無を取り上げ、上記算定値を含む表-1に示す範囲の組合せにより6体の供試体を作製し、連結部材としての曲げ性状と継手部の変形(応力)状態について比較検討を行った。ここで、算定値どおりの継手諸元を有する供試体はTB2である。

(2) 実験結果および考察

供試体の終局耐力について実験値および計算値を表-2に示す。ここに、 $\bar{M}_u, \bar{M}_{fu}$ は弾塑性はり理論ならびに道路橋示方書⁵⁾による鉄筋コンクリート断面の曲げ破壊モーメントである。これより、継手金具へ鉄筋が定着されていないTA4、連結ボルトの代わりにスタッドを用いたTA1を除き、他の連結部材は所定の耐力を有しているのがわかる。

図-6に支間中央点の荷重-たわみ曲線を示す。図中の破線は接合面を完全剛結と仮定した計算結果である。算定値の継手諸元を有するTB2は、耐力同様、

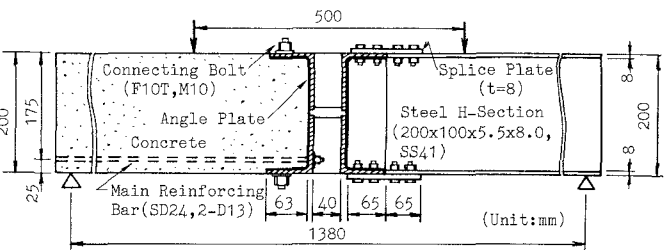


図-5 H形鋼-鉄筋コンクリート連結部材

表-1 実験変数および供試体の種類

Specimen	Axial Force in Bolt (t)	Angle Plate		End Anchorage of Reinforcing Bar	Cylinder Strength (kg/cm ²)	
		l (cm)	t (cm)		σ_{cu}	σ_{tu}
TA1	---	6.3	0.5	Welded	452	29
TA2	0.5					
TA3	4.0					
TA4	0.5			Free		
TB1	0**	0.3	0.3	Welded	558	34
TB2	0.5					

Note: ---* = Without Bolt but with 4φ10X50 Stads.
0** = No Axial Force in Bolt.
l = Horizontal Length of Angle Plate.
t = Thickness of Angle Plate.
 σ_{cu} = Cylinder Compressive Strength of Concrete.
 σ_{tu} = Cylinder Tensile Strength of Concrete.

表-2 連結部材の終局耐力

Specimen	P_u (t)	M_u (tm)	$\bar{M}_u$ (tm)	$\bar{M}_{fu}$ (tm)	$M_u / \bar{M}_u$	$M_u / \bar{M}_{fu}$
TA1	5.7	1.25	1.41	1.27	0.89	0.98
TA2	6.7	1.47			1.04	1.16
TA3	6.7	1.47			1.04	1.16
TA4	2.2	0.48	1.50	1.27	0.32	0.38
TB1	6.9	1.52			1.01	1.20
TB2	7.1	1.56			1.04	1.23

Note: P_u = Experimental Ultimate Load.
 M_u = Experimental Ultimate Moment.
 $\bar{M}_u$ = Theoretical Ultimate Moment Given by Elasto-Plastic Beam Theory.
 $\bar{M}_{fu}$ = Theoretical Ultimate Moment Given by Specifications for Road Way Bridge.

ば所定の曲げ剛性を有しているといえる。

次に、継手部の鉛直接合面の相対水平変位（はだ離れ量）および連結ボルト軸力（ひずみ）の実測結果をそれぞれ図-7、図-8に示す。当然のことながら、継手部の一体性に対する鉄筋の定着効果はきわめて大きい。また、水平プレートの板厚および連結ボルトの締付け軸力が小さい程、一体性に対するボルトの効果が顕著に発揮されていることが明らかである。そして、2.2の解析法に基づき算定された継手諸元を有する連結部材の一体性は、終局時までかなり良好に保持されることが認められた。

図-9、10は、継手内部の圧縮域および引張域のコンクリートの軸方向ひずみの実測値を示したものである。これより、継手内部のコンクリートの応力は一様に小さく、その大きさは終局時でさえ、 50 kg/cm^2 程度の圧縮応力にすぎず、コンクリートが剛体的変形を起こすとした仮定の妥当性を裏づけるものと推察される。

(3) 解析結果との比較

次に、水平プレートのひずみ性状について実験値と解析値との比較を図-11、12に示す。ここで対象とする連結部材は、鋼部材の剛性が鉄筋コンクリート部材のそれに比べて過大なために非対称な変形状態を示し、よって継手中央部（実験では添接を省略した左右一体

の継手金具を使用している）の弾性変形も無視できない。したがって、この場合には最も剛性の高い鋼部材—継手金具の添接個所を固定端として継手金具全体の弾性変形を考慮する必要がある。また、図-3のように接合面の圧縮隅角部を回転中心とすることは適当でなく、ゆえに継手部の解析モデル

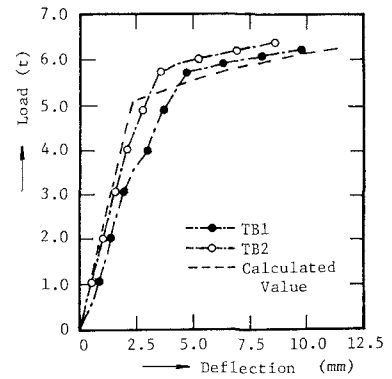


図-6 荷重—たわみ曲線

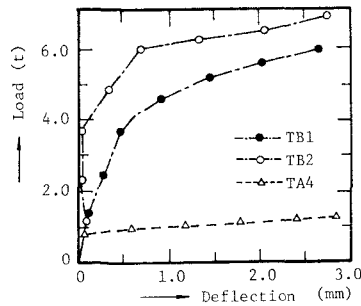


図-7 接合面の相対変位

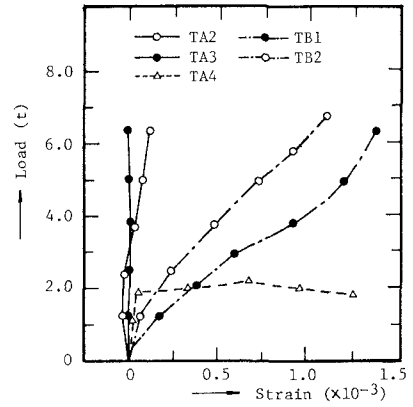


図-8 連結ボルトのひずみ

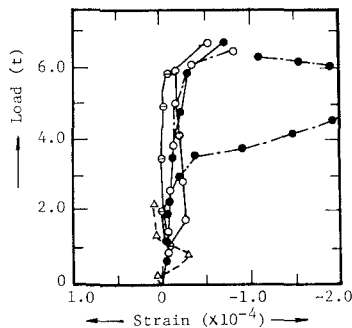


図-9 継手部圧縮域の
コンクリートひずみ

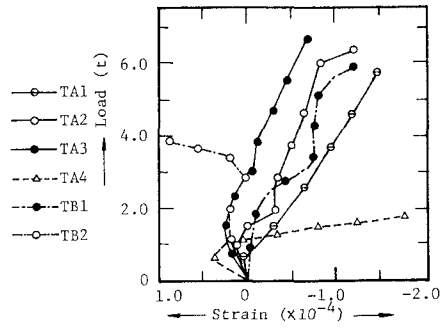


図-10 継手部引張域の
コンクリートひずみ

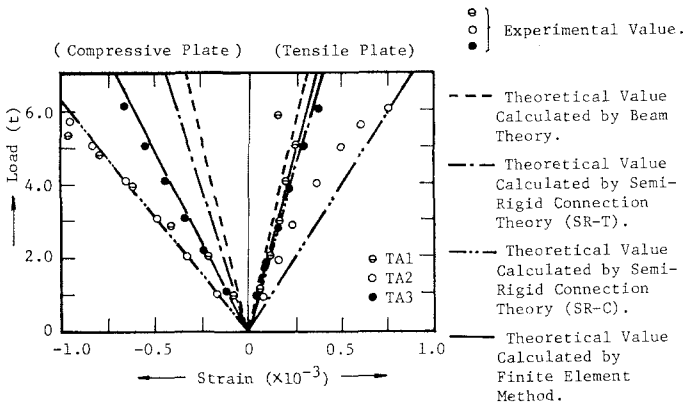


図-11 水平プレート付け根のひずみ

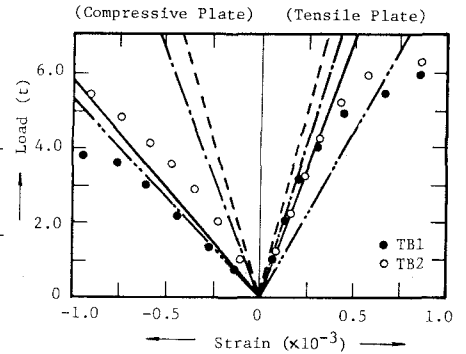


図-12 水平プレート付け根のひずみ

として次の2つを設定した。すなわち、引張鉄筋の継手金具への定着点を回転中心とするSR-Tモデル、および圧縮側ボルト結合点を回転中心とするSR-Cモデルである。なお、これらの解析の展開骨子は2.2で示したものと同様であり、記述を省略する。さらに、以上の不完全剛結理論による解析のほかに、ボルト結合点および鉄筋定着点以外の接合面をリンケージ要素⁶⁾で連結した有限要素法⁷⁾による解析も合わせて行った。

まず実験結果については、引張側プレートのひずみが継手諸元の差にほとんど無関係に、同様の変化を示しているのに対して、圧縮側プレートでは引張側プレートに比べてひずみが大きく、また、それに対する継手諸元の影響が顕著に表われている。一方、解析結果は、SR-T解が比較的一体性の良好な継手部の性状を、SR-C解が不完全剛結性の顕著な継手部の性状を比較的良好にとらえている。

したがって、これらの解析値と実験値を比較対照すると、一体性の良いTA3を除く継手の圧縮側プレートに対してはSR-C解が、逆に引張側プレートに対してはSR-T解が、それぞれひずみ性状を定性的によく追跡している。一方、有限要素解は、このように継手部の不完全剛結性の異なる両プレートのひずみ性状を比較的良好に求めていると思われる。

以上より、不完全剛結性を考慮した本解析法は、今後検討すべき問題もあるが、この種の継手部の挙動を追跡して継手諸元の算定を合理的に行うことができ、さらに有限要素法以上に平易であるということを考慮すれば、その有用性は高いと考えられる。

3. プレキャスト合成床版の継手構造

3.1 プレキャスト合成床版の在来継手構造

昨今の道路橋における鉄筋コンクリート床版の損傷は著しく、全面的打換えを必要とするケースも少なくない。このような場合には、主桁の構造的制約や交通事情などの面から床版死荷重の軽減や工期の大幅な短縮が強く要求されるが、薄鋼板とコンクリートを合成したプレキャスト合成床版は、このような条件を満足しうる有用な床版構造の一つといえよう。しかしながら、現在行われているプレキャスト床版相互の連結方法は、図-13に示すように主桁（または縦桁）上で目地部の鉄筋をラップ

させた後に目地コンクリートを打設して一体化するため、鉄筋の定着長に相当するだけの目地幅が必要であり、したがって、継手部のコンクリート打設量がプレキャスト部分の割には多量になること、新旧コンクリート打継面の連続性の確保などが問題とされている。

そこで、この鉄筋ラップ方式に代わる継手構造として、2種類の鋼継手構造を提案し、主桁上での負の曲げに対する静的性状について実験的検討を試みる。⁸⁾

3.2 実験方法

供試体は、図-14に示すような3種類の継手構造を有する連結床版と比較用の継手のない単体床版（NJ床版）の4種類8体である。すなわち、連結床版は、主鉄筋として用いたネジ筋鉄筋を接合端部のC T形鋼のフランジ切欠部にナット定着し、相互のフランジをボルト接合によって一体化したC T床版、継手中央部で左右千鳥に配置したネジ筋鉄

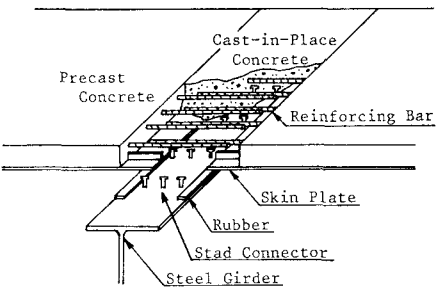


図-13 プレキャスト合成床版の
在来の連結方法

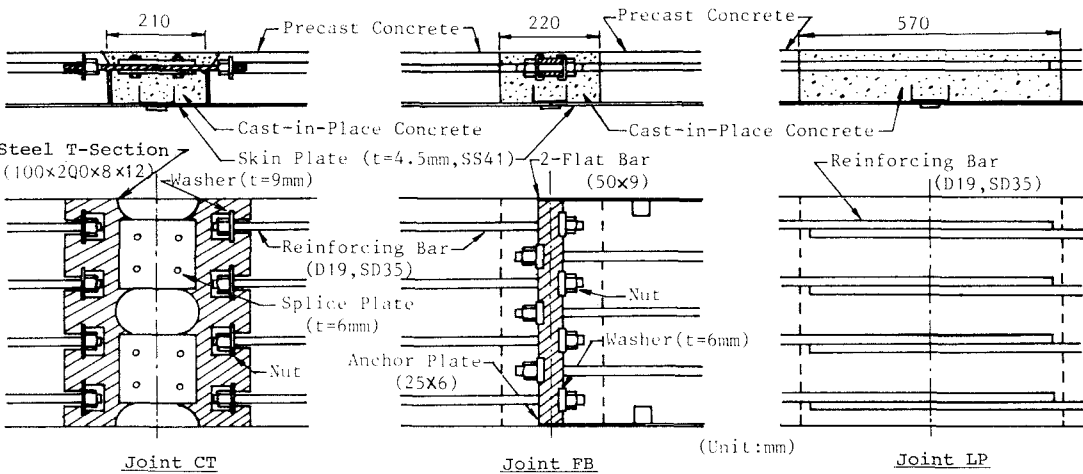


図-14 継手構造の種類

筋を2枚のフラットバーを介してナット定着し、鉄筋引張力の伝達を図るFB床版、および在来の鉄筋ラップ方式によるLP床版である。供試体の形状、寸法は継手部を除いてすべて同一とし、その一例（NJ床版）を図-15に示す。

載荷試験は、継手部に負の曲げモーメントを作用させるため、供試体を実際の使用状態とは上下逆にした2点線荷重による単純曲げ試験として静的繰り返し載荷を行った。

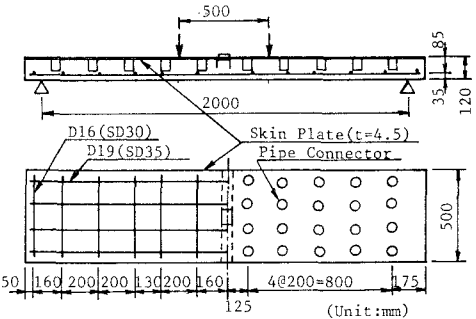


図-15 NJ床版の諸元と配筋

3.3 実験結果および考察

供試体の破壊形式は、すべて鉄筋の降伏に伴う曲げ破壊であった。連結床版ではコンクリート打継面においてプレキャスト部分に先行してひびわれの発生がみられたが、その後の変形状態への影響は認められなかった。表-3に終局耐力の比較を示す。連結床版の終局耐力は単体床版の実験値 M_{un} やその計算値 $\bar{M}_u^{(5)}$ と比べてもほとんど遜色なく、設計モーメント M_d に対しても3.5倍以上の安全率を示した。

C T, F B床版の継手部の鋼板表面における最大主応力度について3方向ゲージの実測値より求めた結果を図-16に示す。ここに、() 外の数値は設計荷重時、() 内の数値は終局荷重時における最大主応力度をそれぞれ表わしている。なお、※印は降伏点以上であることを意味している。これより、C T床版の鉄筋が定着された切欠隅角部付近の応力は、設計荷重時においては使用鋼材 (SS41) に対して十分に許容応力度以下に抑えられているのに対し、

終局時においてはその降伏点を超過しており、設計荷重以上の繰り返し载荷によって鉄筋定着部へかなりの応力集中の起こることが推定される。また、F B床版については、終局時においてもフラットバーに発生する応力は十分小さいことが判明した。

以上の特徴は、継手部コンクリートの最大ひびわれ幅 (図-17参照) や床版のたわみ性状 (図-18, 19参照) にも顕著に表われている。すなわち、F B床版は、打継

表-3 供試体の終局耐力

Type of Specimen		Ultimate Strength		M_u	M_u	M_u
		$P_u(t)$	$M_u(t)$	$M_d(1)$	$\bar{M}_u^{(2)}$	$M_{un}^{(3)}$
CT	No.1	10.50	3.94	3.53	0.92	0.94
	No.2	10.75	4.03	3.61	0.94	0.96
FB	No.1	10.71	4.02	3.61	0.93	0.96
	No.2	10.80	4.05	3.63	0.94	0.97
LP	No.1	11.33	4.25	3.81	0.99	1.01
	No.2	12.06	4.52	4.05	1.05	1.08
NJ	No.1	11.03	4.14	3.71	0.96	0.99
	No.2	11.32	4.25	3.81	0.99	1.01

- 1) M_d : Design Moment (=1.115tm)
 2) $\bar{M}_u$: Theoretical Ultimate Moment (=4.30tm)
 3) M_{un} : Average Ultimate Moment of Specimens NJ

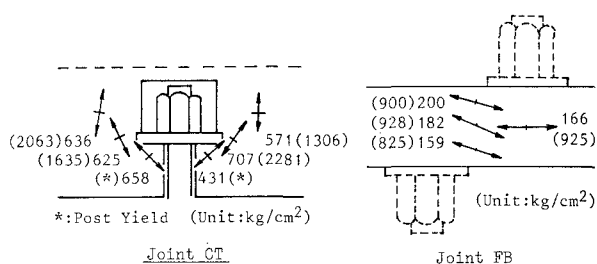


図-16 鋼継手部の最大主応力度

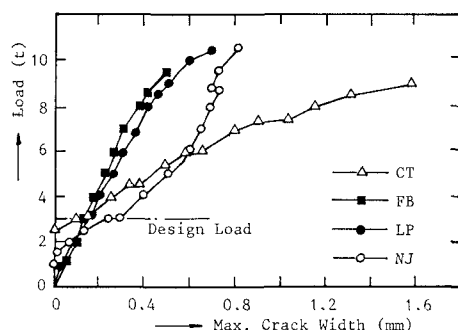


図-17 最大ひびわれ幅

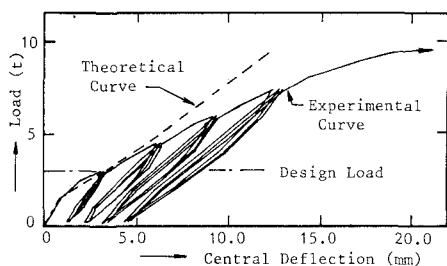


図-18 C T床版のたわみ性状

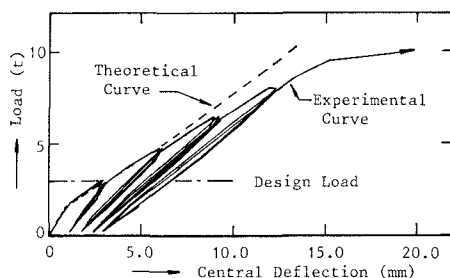


図-19 F B床版のたわみ性状

面の最大ひびわれ幅や残留ひびわれ幅についてもLP床版と同程度に小さく、また曲げ剛性も設計荷重の2倍以上の繰返しからわずかずつ低下したのに対して、CT床版では設計荷重を上回る荷重レベルより、コンクリート打継面ではなく、鉄筋定着位置（座金上）に顕著なひびわれの集中およびそれに伴う曲げ剛性の低下がみられた。

LP床版は、NJ床版と同程度の曲げ性能を有し、今回の実験において特に力学的問題は認められなかった。なお、図-18、19の破線は、有効断面二次モーメント⁹⁾を用いた計算結果を示しており、これは、鉄筋の降伏する10t載荷付近までNJ床版の実験値を精度よく追跡したことを付記しておく。

4. むすび

本研究は、プレキャストコンクリート構造物や最近注目されてきた鋼・コンクリート合成構造物を対象とした新しい継手構造として、鋼継手構造の開発とその実用化に必要な基礎的知見を得ることを目的に行ったものである。その結果、ボルト締め鋼継手構造の継手性能およびその解析方法について一応の有効性が得られたものと思われる。また、プレキャスト合成床版に対する継手構造のうち、FB型式継手に関しては比較的良好な静的曲げ性状を発揮することが認められたが、CT型式継手に関しては鉄筋定着部の構造的問題が判明し、その改良の必要性が指摘された。

なお、本研究はいずれも曲げモーメント荷重のみを対象とした小型供試体による実験的検討に限られており、今後、この種の継手構造の実構造物への適用性について、繰返し荷重を含む各種の荷重条件のもとで実際の構造に即した大型供試体による検討が必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、多大なご協力をいただいた九州大学土木工学科橋梁研究室の卒研生諸君ならびに石川島建材工業（株）の関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 太田俊昭・日野伸一，土木学会論文報告集，第303号，1980年11月．
- 2) 徳澤正和，九州大学工学部土木工学科卒業論文，1980年3月．
- 3) 山崎徳也・樗木武，土木学会論文集，第130号，1966年6月．
- 4) 太田俊昭・中沢隆雄，土木学会論文報告集，第276号，1978年2月．
- 5) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説（Ⅱ），1978年1月．
- 6) Ngo, D. and A.C. Scordelis, Jour. ACI, 1967年3月．
- 7) 三本木茂夫・吉村信敏，コンピュータによる構造工学講座I-1-B，培風館，1970年．
- 8) 日野伸一・太田俊昭・富沢三郎，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，1983年9月．
- 9) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1971年11月．

DEVELOPMENT OF MECHANICAL JOINTS FOR STEEL-CONCRETE COMPOSITE CONSTRUCTION

by SHINICHI HINO * and TOSHIAKI OHTA **

Precast elements are popularly used in concrete construction such as bridges and buildings. A new type of composite construction in steel and prestressed (or reinforced) concrete which is interconnected longitudinally has attracted special interest recently, because of its economic and structural advantages.

But basic and practical researches on the joints for the above construction are seldom found. Hence, the purpose of the present investigation is to obtain the fundamental data to develop a new type of mechanical steel joint and its rational design method.

First in this paper, a bolted steel joint for precast concrete and steel-concrete composite construction is proposed. An analysis of the above joint considering semi-rigid connection based on a few assumptions is presented, and a series of bending tests are carried out on steel-reinforced concrete beams interconnected with the joint, in order to evaluate the availability of the analysis.

The main results are summarized as follows; (1) The connected beam with the joint estimated by the analysis had the required strength and flexural rigidity. (2) Anchorage of reinforcing bars and the axial load in connecting bolt had the multiplication effect to prevent the slip and separation at the contact surface and to keep the flexural rigidity of the joint. (3) The proposed analysis provides a powerful means as well as the finite element method of analysis, for making clear the behavior of the joint and estimating its dimensions plainly.

Secondly, two types of mechanical joints for precast RC composite slab decks on the steel girder are proposed and static bending tests are carried out on six RC composite slabs with the joints including the lapped joint. From the results, the following conclusions are obtained; (1) In a joint splicing the flange of a steel cut T-section, where reinforcing bars were anchored, a significant stress concentration was measured at the notch of the flange and considerably reduced the rigidity of the slab. (2) In a joint using the flat plates, where reinforcing bars were anchored alternately, there were no significant differences between connected and monolithic slabs in flexural behavior except the deflection under the higher bending moment.

* Lecturer, Department of Civil Engineering, Yamaguchi University.

** Professor, Department of Civil Engineering, Kyushu University.