

トラス鉄筋ハーフプレハブ合成床版のずれ止めおよび押し抜きせん断特性

Push-out and Punching shear resistance of Half Prefabricated Composite Slab with Truss-Type Reinforcement

日野伸一^{*}, 甲斐田誠^{**}, 左東有次^{***}, 平岩昌久^{****}

Shinichi HINO, Makoto KAIDA, Yuji SATO, Masahisa HIRAIWA

^{*}工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

^{**}九州大学大学院生 工学府都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

^{***}(株) 富士ピー・エス 福岡支店 技術部設計課 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴 2 丁目 2 番 11 号 富士ビル赤坂)

^{****}日本カイザー (株) 本社土木製品グループ (〒150-0011 東京都渋谷区東 3-15-7)

The current research has confirmed that the half prefabricated composite slab (HPCa slab) with truss-type reinforcement has excellent fatigue durability. However, the experimental study concerning the structural effect of the truss-type reinforcement on the HPCa slab under construction stage and after constructed has been limited up to now.

In this study, a series of static bending test, push-out test and punching shear test of the HPCa slab are carried out to clarify the basic structural characteristics of the HPCa slab. This paper presents the result of the push-out test for truss-type reinforcements as well as the punching shear test for HPCa slab. It turns out that the truss-type reinforcement greatly contributed to the carrying load capacity and rigidity both before and after completion of construction. Also, it describes nonlinear FEM analysis of shear-slip relationship between precast and cast-in-place concrete interface.

key words : half prefabricated composite slab, truss-type reinforcement, shear connector, punching-shear

1. まえがき

自動化した加工・溶接組立て工程の下で製作されたトラス鉄筋を埋め込んだプレキャストPC板を埋設型枠として用い、その上部に場所打ちコンクリートを打設一体化したハーフプレハブ合成床版(以下、HPCa床版と称する)は、通常の場合打ちコンクリート床版に比べ、型枠、支保工等がほとんど不要なため、現場工期が短縮でき、かつ、床版としての疲労耐久性にも優れた構造であることから、近年道路橋床版などにも次第に採用されるようになった。実際、これまで行われた輪荷重走行試験からもその高い疲労耐久性が実証されている。その理由として、立体トラス構造をしたトラス鉄筋等のずれ止め、せん断抵抗、さらにはひび割れ制御等の構造的効果が考えられる。しかし、これまでトラス鉄筋の構造的機能に関する検討はほとんど行われておらず、トラス鉄筋を考慮した床版の設計・施工マニュアルも整備されていなかった。

それを受け、ハーフプレハブ合成床版研究会(松井繁之委員長、(社)災害科学研究所)が設置され、構造分科会の下で、HPCa床版の基本的構造特性を明らかにすることを目的として、架設系および完成系のはり供試体による静的曲げ試験、ずれ止め機能に対する静的押し抜き試験、および版供試体による静的押し抜きせん断試験などの一連の基礎実験を実施してきた¹⁾。本報ではそのうち、ずれ止め機能に対する静的押し抜き試験と版供試体による静的押し抜きせん断試験に関する実験ならびに

その解析的検討²⁾について報告する。

2. ずれ止め二面せん断押し抜き試験

2.1 試験方法

トラス筋によるずれ止め性能を把握するため、図-1に示すような供試体を製作し、二面せん断押し抜き試験を行った。供試体は表-1に示す5タイプを各2体製作した。

供試体は、ずれ止めのトラス鉄筋をせん断方向に対して、トラス軸方向筋を平行に配置した主鉄筋方向と、垂直に配置した配力鉄筋方向、およびトラス鉄筋無しのタイプを製作した。また、PC板の表面仕上げは、トラスを配置するタイプでは、こて仕上げとほうき目仕上げの2種類、トラス鉄筋無しではほうき目仕上げとした。なお、ほうき目の方向は、主鉄筋方向とした。

実験には、最大能力1000kNの構造物万能試験機を用いた。設置方法としては、左右均等に荷重が加わるように、モルタルを敷いた上から供試体のコンクリートブロックを置き、載荷面のレベルを調整した。また、荷重増加に伴いコンクリートの接合面が左右方向に剥離するのを防ぐため、鋼材を使い両側のコンクリートブロックをボルト止めして、供試体の開きを拘束した。載荷試験状況を写真-1に示す。載荷試験は、日本鋼構造協会の「頭付きスタッドの押し抜き試験方法(案)」に準じて行った。載荷にあたっては、トラス鉄筋のひずみとPC板と後打ちコンクリート接合面のずれ量を測定した。

2.2 結果および考察

(1) せん断耐力

表-1 はずれ止めの押し抜き試験における最大せん断耐力の実験結果と破壊状況及び計算値を示している。実験結果から、主鉄筋方向、配力鉄筋方向とも、PC板にほうき目仕上げをすることで、最大せん断耐力はこて仕上げより大幅に増加することが確認された。また、C2-THとC2-N (II) を比較すると最大せん断耐力はほぼ等しく、トラス鉄筋の効果が顕著に見られなかった。ただし、トラス鉄筋がない場合は、2 供試体間で最大せん断耐力のばらつきが2 倍以上となっている。このことは、試験時の取り扱いの際に受ける接合面に垂直方向の抵抗力、すなわちアップリフトに対してのトラス鉄筋の効果と推測される。

(2) せん断耐力—相対ずれ関係

図-2 は作用せん断力—相対ずれ曲線の包絡線を示している。図より、主鉄筋、配力鉄筋方向ともほうき目仕上げはこて仕上げに比べて、せん断力に対する相対ずれ量が小さく、ほうき目を付けることでずれ抵抗性が向上することが確認された。また、ほうき目を付けておけば、トラス鉄筋の有無によるずれ抵抗性は大差なかった。トラス鉄筋のないほうき目仕上げでは、ずれ止め部は脆性的に破壊した。

図-3、図-4 は主鉄筋方向、配力鉄筋方向のそれぞれにおいて、ずれ止めの押し抜き試験から得られた作用せん断力—相対ずれ曲線上に最大せん断耐荷力 $Q_{max}/3$ 荷重点の初期割線直線 (Kst^0) を示したものである。これらより、主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともほうき目仕上

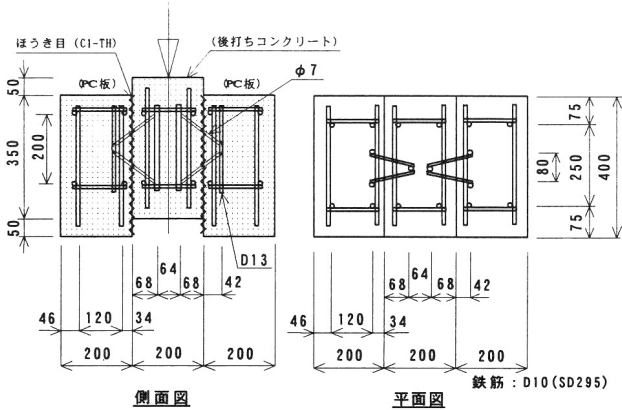


図-1 ずれ止め押し抜き試験供試体 (C1-TH)
(主鉄筋方向: C1-TH)

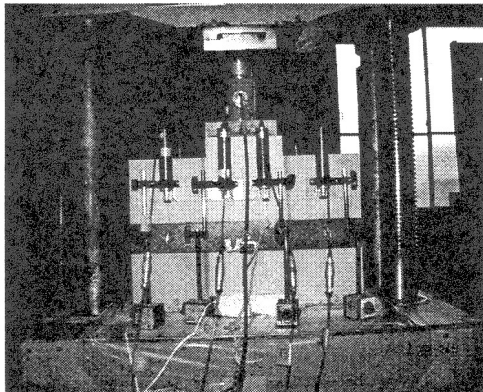


写真-1 押し抜きせん断試験状況

表-1 ずれ止め押し抜き試験の実験値と計算値の比較

種類	No.	せん断方向	トラス鉄筋	接合面の仕上げ	最大せん断耐力(kN)	計算値 (kN) *2			実験値/計算値			破壊状況
						①トラス筋を軸力部材	②トラス筋をせん断抵抗部材	③せん断伝達耐力	①トラス筋を軸力部材	②トラス筋をせん断抵抗部材	③せん断伝達耐力	
C1-TH	I	主鉄筋方向	有り	ほうき目	262.44	126.62	159.94	388.47	2.07	1.64	0.68	ずれ後下側鉄筋破断
	II				241.08	126.62	159.94	388.47	1.90	1.51	0.62	
C1-TK	I			こて	115.74	126.62	159.94	235.40	0.91	0.72	0.49	ずれ後下側鉄筋破断
	II				124.85	126.62	159.94	235.40	0.99	0.78	0.53	
C2-TH	I	配力鉄筋方向	有り	ほうき目	274.40	37.34	159.94	361.03	7.35	1.72	0.76	ずれ後下側鉄筋破断
	II				268.52	37.34	159.94	361.03	7.19	1.68	0.74	
C2-TK	I			こて	164.54	37.34	159.94	222.75	4.41	1.03	0.74	ずれ後下側鉄筋破断
	II				152.59	37.34	159.94	222.75	4.09	0.95	0.69	
C2-N	I	無し	無し	ほうき目 *1	135.14			280.00 *3			0.49	接合面のずれ破壊
	II				290.28			280.00 *3			1.06	

*1 C2-Nのほうき目仕上げの方向は、C2-THと同方向。

*2 ①トラス鉄筋に軸力が作用し、引張降伏すると仮定して算出した値

②トラス鉄筋にせん断力が作用し、せん断破壊すると仮定して算出した値。

③「コンクリート標準示方書 設計編6.3.7設計せん断伝達耐力」に準じて算出したせん断伝達耐力。

*3 C2-Nのせん断伝達耐力は「PC合成床版工法設計施工指針(案)」(土木学会)p.89より、PC版と場所打ちコンクリートの接触面のせん断応力度を10kgf/cm²として計算した値。

げはこて仕上げに比べて、初期割線直線 (Kst^0) の傾きが明らかに大きく、特に図-4 の配力鉄筋方向では $Q_{max}/3$ 荷重点の初期割線剛性値の低下はほとんど確認できず、ほうき目をつけておけば、トラス鉄筋の有無によるずれ抵抗性も大差なかった。また主鉄筋方向と配力鉄筋方向を比較すると、配力鉄筋方向の押し抜きに対する Kst^0 の方が大きく、ほうき目の方向がずれ抵抗性に大きく影響していることが確認された。

表-2 は最大せん断耐荷力 $Q_{max}/3$ 荷重点の初期割線剛性値 (Kst^0)、および Kst^0 をずれ断面積で割った値 Kst を示している。これらの結果から、主鉄筋、配力鉄筋方向とも、PC板にほうき目仕上げをすることで、最大せん断耐力同様、初期割線剛性値もこて仕上げより大幅に大きいことが確認された。この傾向は特に配力鉄筋方向で顕著に見られる。これは主鉄筋方向ではほうき目とずれ方向が平行であるのに対し、配力鉄筋方向ではほうき目がずれ方向に垂直に設けているからである。また、C2-TH と C2-N を比較すると初期割線剛性値はほぼ等しく、トラス鉄筋の効果が顕著に見られなかった。

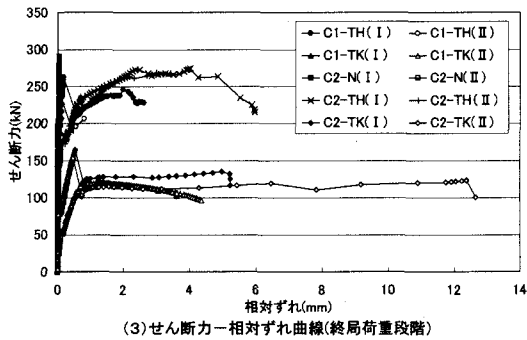


図-2 せん断力-相対ずれ曲線

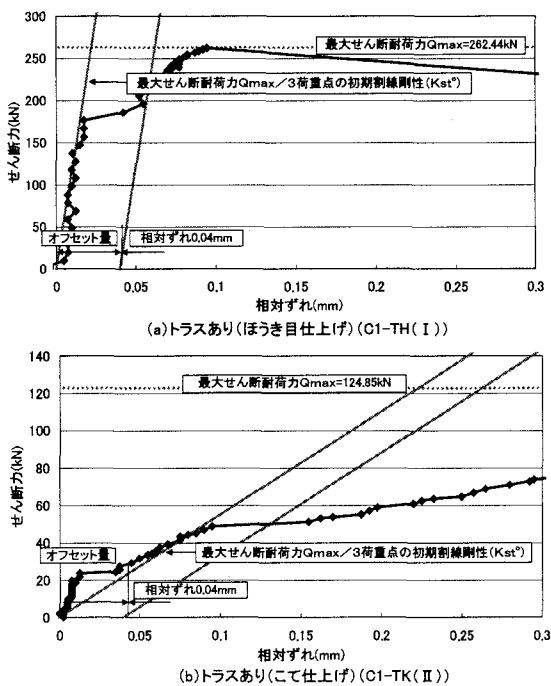


図-3 最大せん断耐荷力/3荷重点の初期割線剛性 (主鉄筋方向)

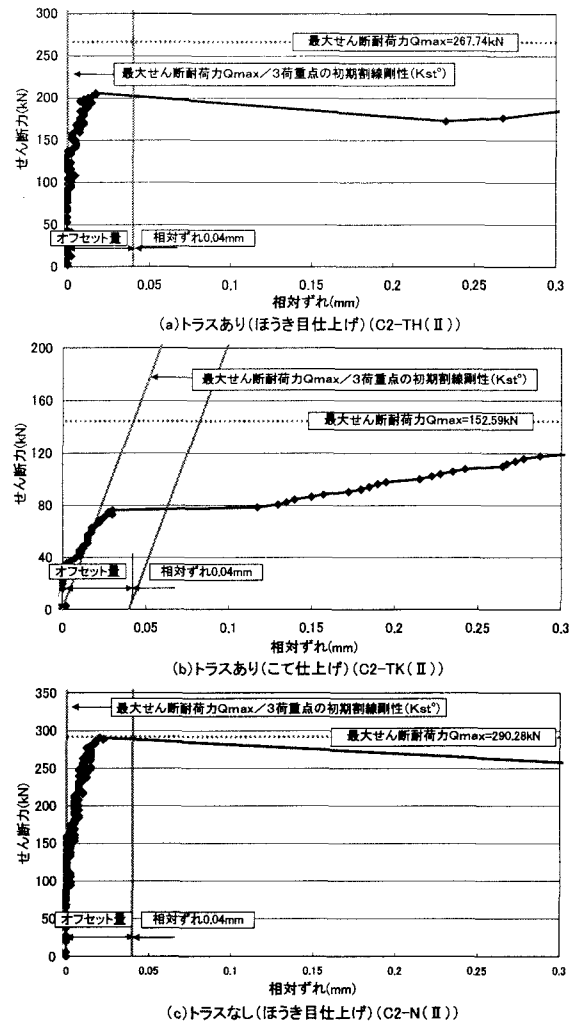


図-4 最大せん断耐荷力/3荷重点の初期割線剛性 (配力鉄筋方向)

表-2 ずれ止め押し抜き試験の初期割線係数

種類	No.	せん断方向	トラス鉄筋	接合面の仕上げ	Q_{max} (kN)	Kst^0 (kN/mm)	Kst (kN/mm ² /mm)
C1-TH	I	主鉄筋方向	有り	ほうき目	262.44	11747	0.042
	II				241.08	-	-
C1-TK	I			115.78	740	0.003	
	II			124.85	551	0.002	
C2-TH	I	ほうき目		274.40	12021	0.043	
	II			268.52	9.470E+10	3.382E+05	
C2-TK	I	配力鉄筋方向		こて	164.54	-	-
	II			152.59	3397	0.012	
C2-N	I	無し	ほうき目*	135.14	-	-	
	II			290.28	1.030E+11	3.679E+05	

2.3 3次元 FEM 解析による検討

(1) 解析概要

図-5 に FEM 解析モデルを示す。モデルは対称性から試験体の 1/4 とし、モデル化については、コンクリートは 3次元 8 節点ソリッド要素、補強筋には軸力のみ考慮の 2 節点棒要素、トラス鉄筋には 2 節点棒要素と、軸力・曲げを考慮できる 2 節点はり要素の 2 タイプを用いて相互比較した。また、接合面における付着を考慮するため、3次元 Interface 要素を用い、構成則として Delamination Damage Model³⁾を使用した。これに基づき各モデルを用いた付着特性値を図-6 に示す。これらの値は既往の実

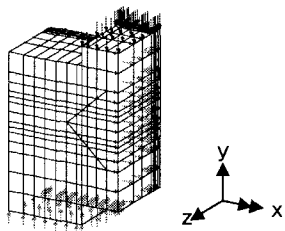


図-5 FEM 解析モデル

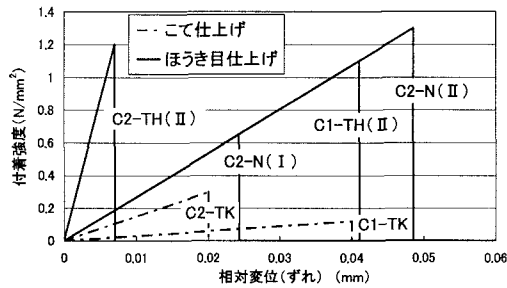


図-6 解析モデルの付着特性値

験データが不十分であったため、本実験からの逆解析により決定した。

(2) 実験および解析結果の比較

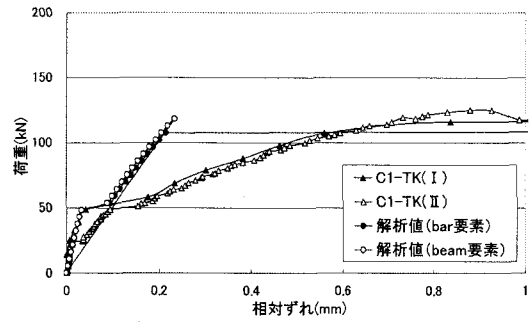
図-7に、こて・ほうき目仕上げ、主鉄筋・配力鉄筋方向などのケースごとに、荷重-相対ずれ関係についての実験および解析結果の比較を示す。これらより以下の考察を得た。

①こて仕上げ接合面

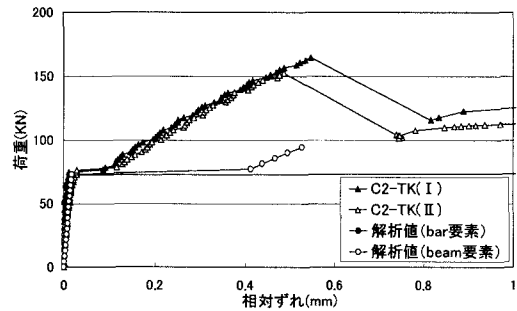
こて仕上げ接合面は、ほうき目仕上げ接合面に比べ、相対的に滑面であるため、実験および解析結果ともに、接合面の付着力が消失する、水平せん断力 50kN (主鉄筋方向)、75kN (配力鉄筋方向) 程度までの荷重に対しては、接合面の付着力とトラス鉄筋により抵抗し、付着力の消失後は、トラス鉄筋によって荷重を負担している。最終的には、引張側トラス斜筋が降伏して破壊に至っている。ずれ性状については、実験値と解析値に定量的な差異が見られるが、定性的には実験挙動を概ね追跡できていると思われる。トラス鉄筋の解析モデルとして、棒(軸力)要素とはり(曲げ)要素の両方について検討したが、主鉄筋方向(C1-TK)については棒・はり要素モデルによる差異は認められないが、配力鉄筋方向(C2-TK)については、はり要素が相対的に実験結果と類似した結果を示した。このことは、図-8に示すようにトラス鉄筋の傾斜角によって、主鉄筋方向は軸力卓越型、また配力鉄筋方向は曲げ・せん断卓越型の抵抗メカニズムであることを示唆するものと考えられる。

②ほうき目仕上げ接合面

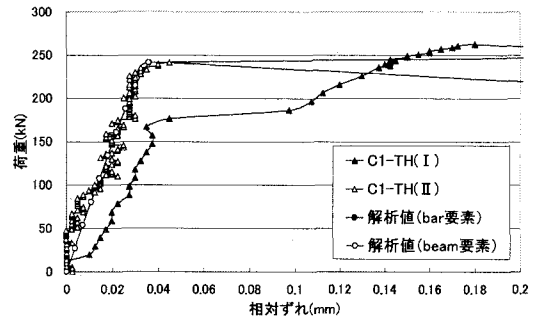
主鉄筋、配力鉄筋方向ともに、実験値にばらつきが見られるが、解析結果はどちらも実験値の挙動を良く再現しており、付着消失とともに引張側トラス斜筋が降伏し破壊に至った。トラス鉄筋の効果は、ほうき目による接合面の付着抵抗が卓越するため、ほとんど見られなかった。したがって、トラス鉄筋の解析モデルの違いによる影響は認められなかった。以上より、ほうき目仕上げは、



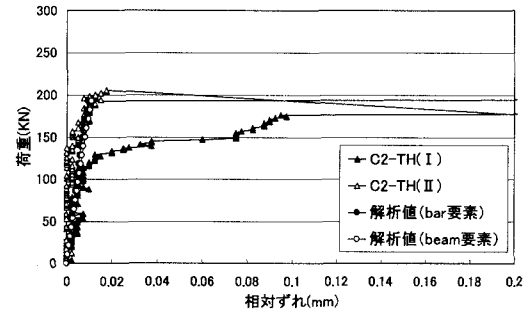
(1) こて仕上げ・主鉄筋方向(C1-TK)



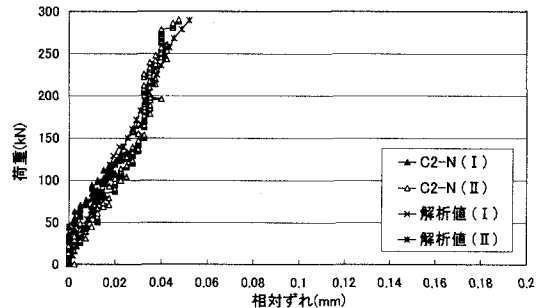
(2) こて仕上げ・配力鉄筋方向(C2-TK)



(3) ほうき目仕上げ・主鉄筋方向(C1-TH)



(4) ほうき目仕上げ・配力鉄筋方向(C2-TH)



(5) ほうき目仕上げ・トラス鉄筋なし(C2-N)

図-7 荷重-相対ずれ関係

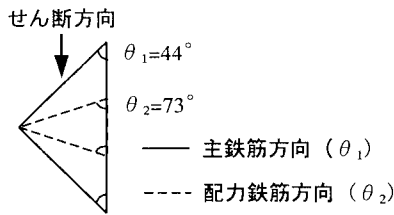


図-8 せん断方向に対するトラス鉄筋の傾斜角

表-3 版供試体のタイプ

タイプ	トラス鉄筋の配置	荷重載荷位置
D-15	150mmピッチ	トラス鉄筋上
D-30a	300mmピッチ	トラス鉄筋上
D-30b		トラス鉄筋間
D-N	トラス鉄筋無し	—

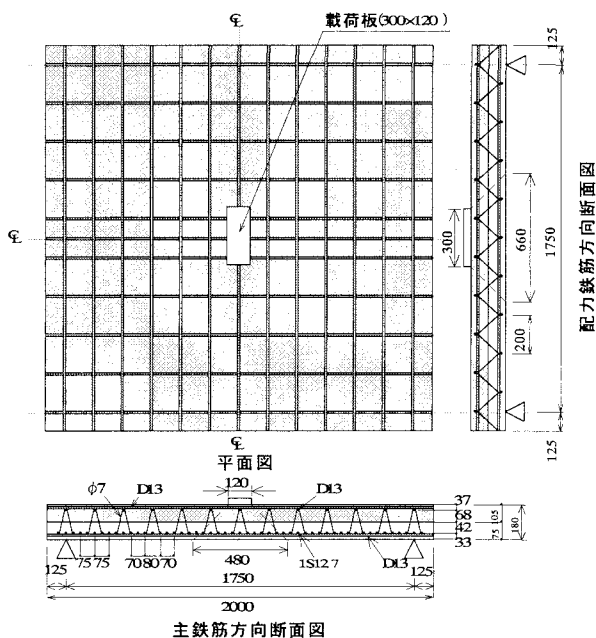


図-9 版供試体構造図 (D-15)

接合面での付着強度、ずれ剛性が大きいため、終局時までトラス鉄筋によらず、ほとんど付着抵抗により荷重負担し、付着力の消失と同時に、引張側トラス斜筋が降伏し破壊に至ること、また、接合面の仕上げ精度により、図-6に示した付着特性のばらつきは大きい、適正な付着特性値を用いることにより、本解析法によるずれ性状の精度良い把握が可能であることが判明した。

3. 版供試体による押し抜きせん断試験実験概要

3.1 試験方法

床版の合成後の押し抜きせん断性能を把握するため、図-9に示すような版供試体を製作し、静的押し抜きせん断試験を行った。供試体はPC板厚75mm、現場打ち床版厚105mm、床版全厚180mm、縦横2000mmの正方形の合成版である。トラス鉄筋の配置間隔は150mm、300mm、トラス鉄筋無しとし、配置間隔300mmの供試体については、載荷点をトラス鉄筋上とトラス鉄筋間で

比較するため、トラス鉄筋の配置を変えた2種類を製作した。以上、表-3に示す4タイプを各1体製作した。

載荷は図-9に示すように、支間1.75mの4辺単純支持で版中央部に1点集中載荷させた。載荷パターンは、100kN毎に載荷、除荷を繰り返す、400kNからは破壊まで単調載荷した。

3.2 結果および考察

(1) 押し抜きせん断耐力

版供試体の押し抜きせん断試験の破壊荷重の実験値と計算値及び破壊パターンを表-4に示す。計算値は押し抜きせん断耐力式(松井式)⁴⁾を使用し、後打ちコンクリートの圧縮強度を使用し、トラス鉄筋の斜め鉄筋を無視して算出した。

いずれの供試体においても静的押し抜きせん断耐力は大きく、その中でもD-N、D-30a、D-30b、D-15の順に増加し、D-15はD-Nより15%程度大きくなっている。このことより、トラス鉄筋の有無や量が破壊荷重に影響することが認められる。また、計算値と比較すると、計算値と実験値の比はいずれの供試体とも1程度であったが、トラス鉄筋を多く配置した供試体ほどその比は大きくなった。

表-4 破壊荷重の実験値と計算値の比較

タイプ	後打ちコンクリートの圧縮強度 (kN/mm ²)	破壊荷重(kN)		実験値/計算値	破壊パターン
		実験値	計算値*		
D-15	377	664.2 (1.17)	620.4	1.071	押し抜きせん断破壊
D-30a	377	594.1 (1.04)	620.4	0.958	押し抜きせん断破壊
D-30b	466	619.8 (1.09)	677.4	0.915	押し抜きせん断破壊
D-N	466	569.4 (1.00)	677.4	0.841	押し抜きせん断破壊

*押し抜きせん断耐力式(松井式)により算出。

$$P_{max} = \tau_{smax} [2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m] + \sigma_{tmax} [2(a+2d_m)C_d + 2(b+2dd+4C_d)C_m]$$

ここに、a, b : 載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長(cm)

X_m, X_d : 主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸深さ(cm)

d_m, dd : 引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(cm)

C_m, C_d : 引張側主鉄筋、配力鉄筋のかぶり厚さ(cm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度 = $0.252 \cdot \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$ (kgf/cm²)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度 = $0.583 \cdot \sigma_{ck}^{2/3}$ (kgf/cm²)

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

(2) ひび割れ状況

図-10は供試体下面のひび割れ図を示している。これより、いずれの供試体も、配力鉄筋方向の曲げに対する曲げひび割れが先行し、次に主鉄筋方向の曲げに対する曲げひび割れが発生し、最終的に押し抜きせん断破壊した。また、D-15以外は下面に押し抜きによる剥離が見られ、特にD-Nの剥離が大きかった。

図-11は切断面のひび割れ図示している。実験結果より、押し抜きせん断断面がトラス鉄筋を避けるように入り、トラス鉄筋の押し抜きせん断ひび割れに対する効果が見られた。また、トラス鉄筋のずれ止め効果により、従来弱いとされているPC板と後打ちコンクリートの打継面や引張鋼材に沿って生じる水平ひび割れを抑制

することが確認された。

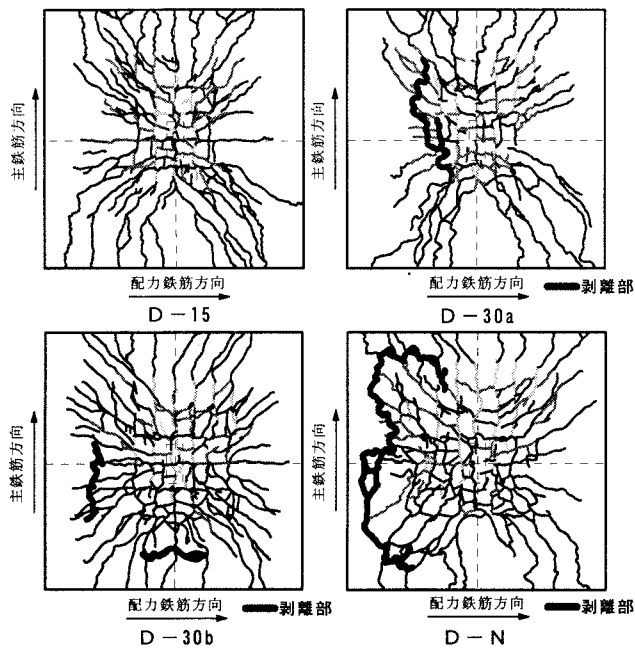


図-10 床版下面のひび割れ状況

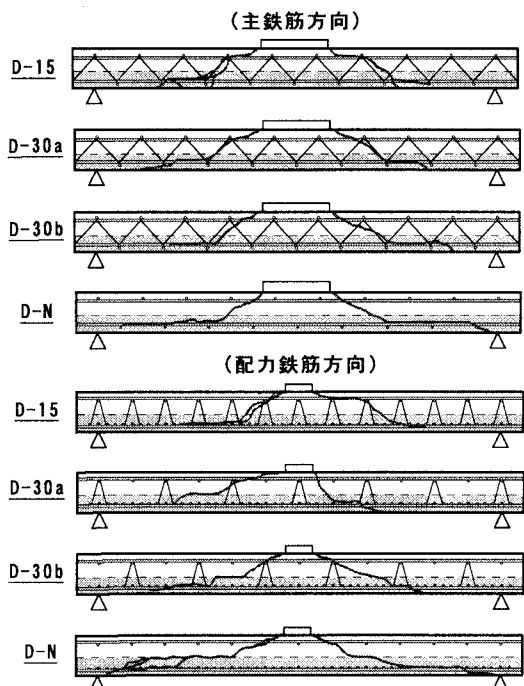


図-11 切断面のひび割れ状況

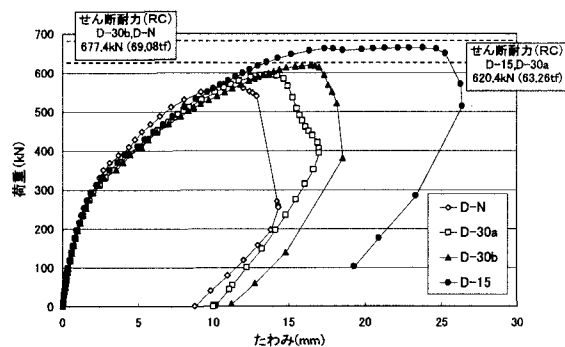


図-12 荷重載荷直下の荷重-たわみ曲線
(3) 荷重-たわみ曲線

図-12 は荷重点直下の荷重-たわみ曲線を示している。実験結果より、曲げ剛性に対するトラス鉄筋の有無や量の影響は見られなかった。ただ、トラス鉄筋を多く配置した供試体ほど最大荷重後の粘りがあり、脆性的な破壊を抑制するトラス鉄筋の効果が確認された。

4. まとめ

ずれ止め二面押し抜き試験からは

- ① ほうき目仕上げをすることで、こて仕上げより最大せん断耐力、ずれ抵抗性とも大幅に大きくなる。
- ② こて仕上げ接合面は、付着強度がトラス斜筋のせん断耐力より小さいため、付着力の消失後はトラス鉄筋が荷重に抵抗し、引張側トラス斜筋が降伏する。
- ③ ほうき目仕上げでは、接合面の粗度による付着強度およびずれ剛性が過大なため、トラス鉄筋のずれ止め抵抗は相対的に考慮しないのが妥当であると考えられる。
- ④ 接合面の粗度とトラス鉄筋をモデル化した FEM 解析により、この種のずれ性状を解明することが可能であると考えられる。

完成系版供試体による押し抜きせん断試験からは

- ① 破壊荷重については、トラス鉄筋の有無や量など、トラス鉄筋の影響による効果が確認された。
- ② トラス鉄筋を多く配置した供試体ほど最大荷重後の粘りがあり、脆性的な破壊を抑制するトラス鉄筋の効果が確認された。
- ③ トラス鉄筋が押し抜きせん断補強筋として有効に機能していることが確認された。

最後に、本実験は「ハーフプレハブ合成床版研究会」(委員長: 松井繁之大阪大学教授)の構造分科会における研究活動の一環として行われたものである。供試体製作ならびに実験実施に際し、多大なご協力を戴いた東海コンクリート工業(株)、阪神高速道路公団(当時 九大大学院生)児玉崇氏、貴重なご助言を賜った本研究会委員各位に対し、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) ハーフプレハブ合成床版研究会: トラス形鋼材を有するハーフプレハブ合成床版の構造特性に関する調査報告書, 2002.10
- 2) 甲斐田誠, 日野伸一, 左東有次, 徐聖卓: トラス形鉄筋を有する鋼板系及びコンクリート系合成床版の接合面におけるずれ止め挙動, 土木学会西部支部発表会講演概要集, 2003. 3
- 3) FEA Ltd.: LUSAS ver. 13.4
- 4) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, pp133~141, 1984. 8