

UFC埋設型枠RC床版の合成面のせん断強度および理論押抜きせん断耐力式

Shear strength and theoretical punching shear capacity formulas for the composite surface of RC slab using UFC permanent form

阿部忠*, 木田哲量*, 新見彩**, 高野真希子***, 田中敏嗣****

Tadashi Abe*, Tetsukazu Kida*, Aya Niimi**, Makiko Takano*** and Satoshi Tanaka****

*博(工), 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**日本大学大学院 土木工学専攻(〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***博(工), 越谷市役所 (〒 343-8501 埼玉県越谷市越ヶ谷四丁目 2-1)

****博(工), 太平洋セメント株式会社 (〒 285-8655, 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

In view of the fact that the RC slab and UFC permanent form composite structure failed in punching shear and at the same time the UFC permanent form separated from the composite surface, the authors clarified the shear strength of the RC slab and UFC permanent form composite surface and proposed a punching shear mechanical model and punching shear capacity formulas. The proposed punching shear mechanical model assumes that the model fails in punching shear at an angle of 45 degrees from the surface on which the load contacts, and takes into account the effect of the shear strength of concrete on the shear plane at the top of an equivalent stress block and the effect of the shear strength on the RC slab and UFC permanent form composite surface. As a result, a good agreement was obtained between the experimental values and the theoretical values .

Key words: *UFC permanent form slab , One-plane shearing test , Punching shear load-carrying capacity*

キーワード: *UFC 埋設型枠床版, 一面せん断実験, 押抜きせん断耐力*

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版は、施工の合理化・省力化、コスト縮減が重要課題として技術開発が行われている。その1つに、型枠施工の省力化を目的とした超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下, UFC とする)で製作した埋設型枠が提案されている^{1), 2)}。UFC は、セメント系材料に金属繊維を混入したものであり、圧縮強度が 200N/mm^2 を有し、通常の高強度コンクリートに比べ、じん性にも優れた構造材料である。また、耐久性の向上や長寿命化に寄与し、合板型枠を使用しないことから、森林資源を保護する環境保全効果も期待できる材料である^{3), 4)}。そこで筆者らは、UFC 材の有効的な活用方法を目的として、RC 床版の引張鉄筋かぶり内に UFC 型枠を埋設した合成構造(以下, UFC 埋設型枠 RC 床版とする)を提案し、静荷重・走行荷重実験および疲労荷重実験を行い実用性を評価した^{5), 6), 7)}。その結果、通常の型枠を用いて製作した RC 床版と UFC 埋設型枠 RC 床版を比較す

ると、耐荷力および疲労耐久性が向上することから実用性が評価できる構造であることを実験より実証した。

一方、道路橋 RC 床版を対象とした押抜きせん断耐力評価式は、土木学会式⁸⁾、松井式⁹⁾、角田式¹⁰⁾および筆者ら^{11), 12)}の提案式が用いられている。しかし、UFC 埋設型枠と RC 床版を含めた合成構造における押抜きせん断耐力評価式は提案されていない。

そこで本研究は、UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊状況を基に、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面のせん断強度を明らかにし、せん断強度を適用した押抜きせん断力学モデルおよび押抜きせん断耐力式の提案を目的とした実験研究である。本実験では、通常型枠を用いて製作した RC 床版供試体と RC 床版と同寸法とし、かぶり内に UFC 埋設型枠を用いた供試体および軽量化を目的として床版厚を 2cm 減少させた供試体の 2 タイプの UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を用いて静荷重実験を行い、最大耐荷力、荷重とひずみの関係および破壊形状を明らかにする。また、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面は、破壊時に RC 床版部のコンクリートの引

張強度と UFC の引張強度の差により、はく離している。これは、モード Ⅱ 型のずれによる一面せん断破壊と同様な破壊状況である。そこで、RC 床版部のコンクリートと UFC の合成面についてモード Ⅱ 型の一面せん断試験を行い、コンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係を解明し、このせん断強度を適用した押抜きせん断力学モデルおよび押抜きせん断耐力式を提案し、UFC 埋設型枠 RC 床版の面外せん断に対する設計法の一助とする。

2. 使用材料および寸法

2.1 使用材料

(1) RC床版

供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用した。また、鉄筋には SD295A, D10 を使用した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表 - 1 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度試験は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体によるものであり、鉄筋はミルシートの結果である。

(2) UFC 埋設型枠の使用材料

UFC 埋設型枠の使用材料は、水、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、プレミックス材料（密度 2.85g/cm^3 ）および鋼繊維（密度 7.85g/cm^3 ）とした。鋼繊維は、直径 0.2mm、長さ 15mm を体積比で 2.0 % 使用した。プレミックス材料は、セメント、シリカフューム、珪石粉末などが最密充填されるように配合されており、粗骨材は使用せずに最大粒径 2mm の珪砂を混合した。混和剤使用量は、目標フロー値を 240mm として決定した。UFC の材料特性値を表 - 2 に示す。

2.2 UFC埋設型枠の付着面および寸法

UFC 埋設型枠と RC 床版との合成効果を高めるためには、UFC 埋設型枠の合成面の構造が重要となる。そこで、本供試体の合成面は UFC 埋設型枠側に凹部を一樣に設けた構造を採用した（以下、P 型とする）。なお、P 型において RC 床版との打ち継ぎ面におけるせん断強度は、母材コンクリートと同程度の値を示していることから十分な付着力が得られることが確認されている¹³⁾。ここで、P 型の付着面形状および寸法を図 - 1 に示す。

次に、UFC 埋設型枠の寸法は、RC 床版の引張鉄筋かぶり内に埋設することから、幅 1450mm、板厚 20mm とし、付着面厚は 5mm とした。

2.3 供試体寸法および鉄筋配置

本供試体は、道路橋 RC 床版の施工の合理化を目的としたことから、道路橋示方書・同解説¹⁴⁾（以下、道示 とする）に基づいて、RC 床版の設計支間と大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量が 2000 台以

表 - 1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	鉄 筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
RC-13	35	368	568	200
U.RC13	35	385	520	200
U.RC11	35	357	507	200

表 - 2 UFC の材料特性値

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
U.RC13	219.4	34.9	55.0
U.RC11	200.4	32.7	55.0

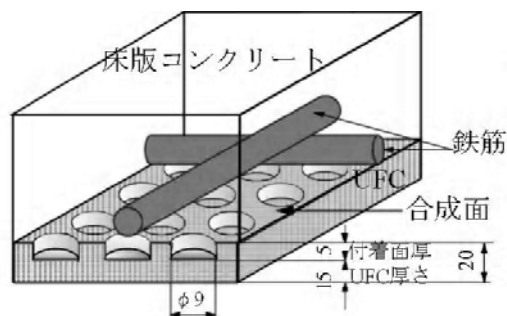


図 - 1 UFC 埋設型枠の付着面形状および寸法(mm)

上を想定して床版厚、鉄筋量を算出し、その 1/2 モデルとした。ここで、本実験供試体の寸法および鉄筋配置を図 - 2 に示す。

供試体は、通常の型枠で製作した床版厚 130mm の RC 床版（図 - 2(1)）と、軽量化を目的とした床版厚 110mm の 2 タイプの UFC 埋設型枠 RC 床版（図 - 2(2)）を製作した。

(1) RC床版

通常の型枠を用いて製作した RC 床版供試体の寸法は、全長 1470mm、支間 1200mm、厚さ 130mm の正方形版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、主鉄筋および配力筋を 100mm 間隔とし、圧縮側は引張側の 1/2 を配置した。有効高さは主鉄筋が 105mm、配力筋は 95mm とした。供試体名称を RC13-S とした。

(2) UFC埋設型枠RC床版

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の寸法は基本的には RC 床版供試体と同様であり、RC 床版部の厚さが 110mm、UFC 埋設型枠が 20mm であり、合成後の床版厚は 130mm である。床版厚 130mm の供試体名称を U.RC13-S とした。

次に、軽量化を目的として床版厚を 20mm 減少した供試体は、全長 1470mm、支間 1200mm、厚さ 110mm とし、主鉄筋および配力筋量および配置間隔は RC 床版および床版厚 130mm の UFC 埋設型枠 RC 床版と同様である。有効高さは主鉄筋が 85mm、配力筋は 75mm である。床版厚 110mm の供試体名称を U.RC11-S とした。

(3) UFC埋設型枠RC床版供試体の作製

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の製作手順を写真 - 1

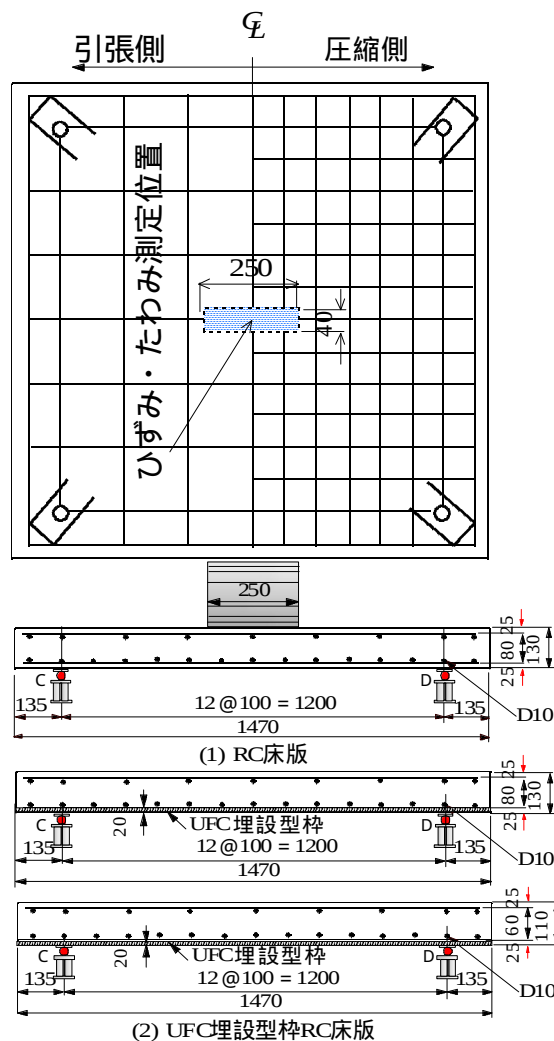


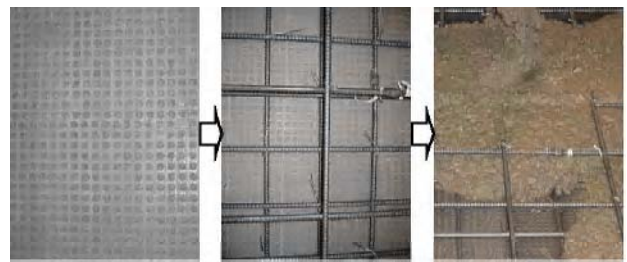
図 - 2 RC 床版・UFC 埋設型枠 RC 床版の寸法 (mm)

に示す。UFC 埋設型枠の作製は、凸型の型枠を用いて製作し、20℃で24時間養生(1次養生)、その後48時間90℃の蒸気養生(2次養生)を行った。次に、UFC 埋設型枠 RC 床版の作製は、予め製作した UFC 埋設型枠(1450×1450×20mm)を床版底面に設置し(写真 - 1(1))、その上に直接に鉄筋を配置し(写真 - 1(2))、コンクリートを打設(写真 - 1(3))して一体構造とした。

3. 実験方法

本研究は、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび押抜きせん断耐力式の提案を目的とした実験研究である。そこで実験は、走行振動試験装置を用いて静荷重実験を行い、荷重とひずみの関係および破壊形状を基に、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断耐力に関する力学特性を明らかにするものである。

静荷重実験方法は、曲げ応力が最大となる床版中央に車輪を停止した状態の実験である。載荷方法は荷重



(1)UFC埋設型枠 (2)鉄筋配置 (3)コンクリート打設

写真 - 1 UFC 埋設型枠 RC 床版の施工手順

表 - 3 実験耐力および破壊モード

供試体	最大耐力 力(P_{max}) (kN)	平均耐力 力(P_{cp}) (kN)	耐力力比 U.RC/RC	破壊モード
RC13-S1	235.2	237.7	—	押抜きせん断破壊
RC13-S2	240.2			押抜きせん断破壊
U.RC13-S1	299.6	294.7	1.26	押抜きせん断破壊
U.RC13-S2	289.7		1.22	押抜きせん断破壊
U.RC11-S1	245.0	245.0	1.03	押抜きせん断破壊
U.RC11-S2	245.0		1.03	押抜きせん断破壊

制御により 10kN ずつ荷重を増加し、鉄筋が降伏した後は 5.0kN ずつ破壊するまで荷重を増加させた。

4. 実験結果および考察

4.1 実験耐力

静荷重実験における最大耐力および破壊モードを表 - 3 に示す。

静荷重実験における最大耐力の平均は、RC 床版供試体 RC13-S が 237.7kN であり、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体 U.RC13-S が 294.7kN であった。また、床版厚 110mm の供試体 U.RC11-S は 245.0kN であった。静荷重実験における RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体 U.RC13-S が 1.24 倍の耐力となり、軽量化を目的とした供試体 U.RC11-S が 1.03 倍の耐力となった。したがって、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は UFC 埋設型枠と RC 床版部のコンクリートとの合成作用により耐力が向上する結果となった。また、床版厚 130mm の RC 床版と床版厚 110mm の UFC 埋設型枠 RC 床版は、ほぼ同程度の耐力であり、床版厚を 20mm 減少できることから RC 床版に比して 15 %の軽量化が図られた。

4.2 破壊状況

本実験における RC 床版および UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊後のひび割れ状況の一例を図 - 3および軸直角方向の切断面を図 - 4に示す。

(1) RC床版

RC 床版供試体 RC13-S1 のひび割れ状況は 図 - 3(1)に示すように、主鉄筋および配力筋の配置位置に発生

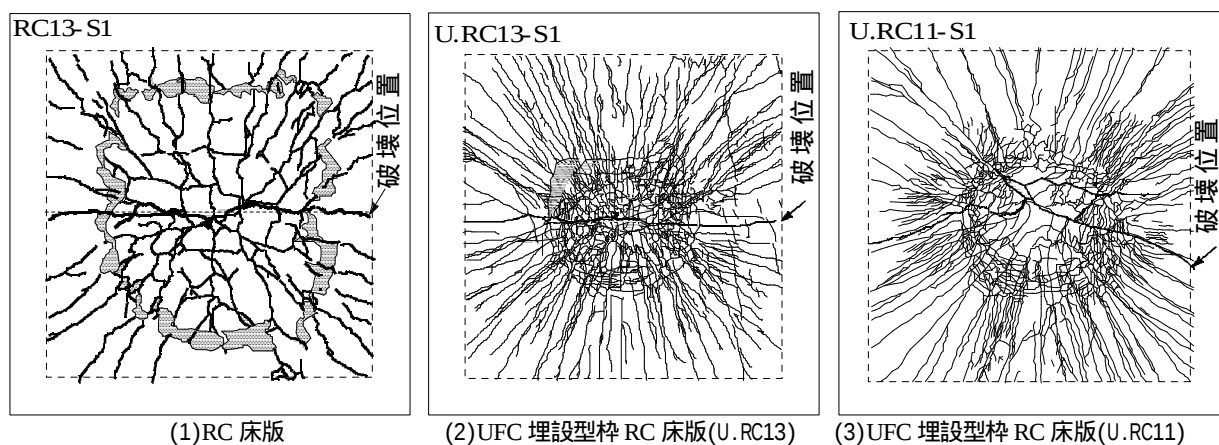


図 - 3 ひび割れ状況の一例



図 - 4 切断面のひび割れ状況の一例

している。車輪の接地面 (250mm×40mm) から床版底面方向に約 45 度の拡がりで荷重が分布した底面コンクリートがはく離している。これは引張鉄筋のダウエル効果によるものである。

次に、軸直角方向の切断面は図 - 4(1)に示すように、荷重載荷位置から約 45 度傾斜で押抜きせん断破壊となり、引張鉄筋かぶりはダウエル効果によりはく離した。破壊モードは荷重増加中に押抜きせん断破壊となった。

(2) UFC埋設型枠RC床版

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体 U.RC13-S1 の破壊状況は図 - 3(2)に示すように、輪荷重の接地面から約 45 度底面の内側は、微細なひび割れが軸方向および軸直角方向に発生している。また、45 度底面の外側は降伏線方向にひび割れが分散して発生している。破壊は RC 床版が押抜きせん断破壊となり、RC 床版と UFC の合成面ははく離している。次に、軸直角方向の破壊断面は図 - 4(2), (3)に示すように、荷重載荷位置から約 45 度の傾斜で押抜きせん断破壊となり、UFC 埋設型枠と RC 床版部の合成面は、RC 床版がダウエル効果の影響を受ける範囲で、横ずれによるはく離が生じている。

供試体 U.RC11-S1 の底面のひび割れ状況および断面方向の破壊状況は図 - 3(3)、図 - 4(3)に示すように、

供試体 U.RC13-S1 と同様なひび割れ状況を示している。

以上より、UFC に配合された直径 0.2mm、長さ 15mm を体積比で 2.0 % の鋼繊維により微細なひび割れが分散され、鋼繊維がひび割れと交差し、ひび割れ発生後も耐力を維持している。すなわち鋼繊維の架橋効果と UFC 埋設型枠の付着面を P 型としたことにより、破壊荷重付近までははく離が見られなく、合成効果が得られている。

4.3 鉄筋およびUFC埋設型枠のひずみ

(1) 荷重と鉄筋ひずみの関係

RC 床版供試体および UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の荷重と鉄筋ひずみの関係について軸直角方向 (主鉄筋) を図 - 5(1)、軸方向 (配力筋) を図 - 5(2)に示す。なお、本供試体に用いた鉄筋の降伏ひずみは RC 床版の場合は 1840×10^6 、床版厚 130mm および 110mm の UFC 埋設型枠 RC 床版は、それぞれ 1925×10^6 、 1785×10^6 となった。

RC 床版供試体の軸直角方向の荷重と鉄筋ひずみの関係 (図 - 5(1), 1)) は、両供試体ともに荷重 60kN 付近まで線形的に増加した。その後の荷重増加でひずみは増加し、荷重 205kN 付近までは線形的に増加した。その後の荷重増加からひずみの増加も著しくなり、終局時では供試体 RC13-S1 が荷重 235.2kN で 5870×10^6 であり、供試体 RC13-S2 は荷重 240.2kN で 5260×10^6 となった。

次に、軸方向の荷重と鉄筋ひずみの関係 (図 - 5(2), 1)) は、荷重 60kN 付近まで線形的に増加し、その後の荷重増加ではややひずみが増加し、荷重は 200kN 付近まで線形的に増加した。終局時では供試体 RC13-S1 のひずみは 8710×10^6 であり、供試体 RC13-S2 は 7230×10^6 となった。軸直角方向に比して軸方向のひずみの増加が著しいのは、供試体は 4 辺支持であり、輪荷重は軸直角方向が 250mm、軸方向は 50mm であり、軸方向の分布幅は線荷重状態であったためと考えられる。

UFC 埋設型枠 RC 床版の軸直角方向の荷重とひずみ

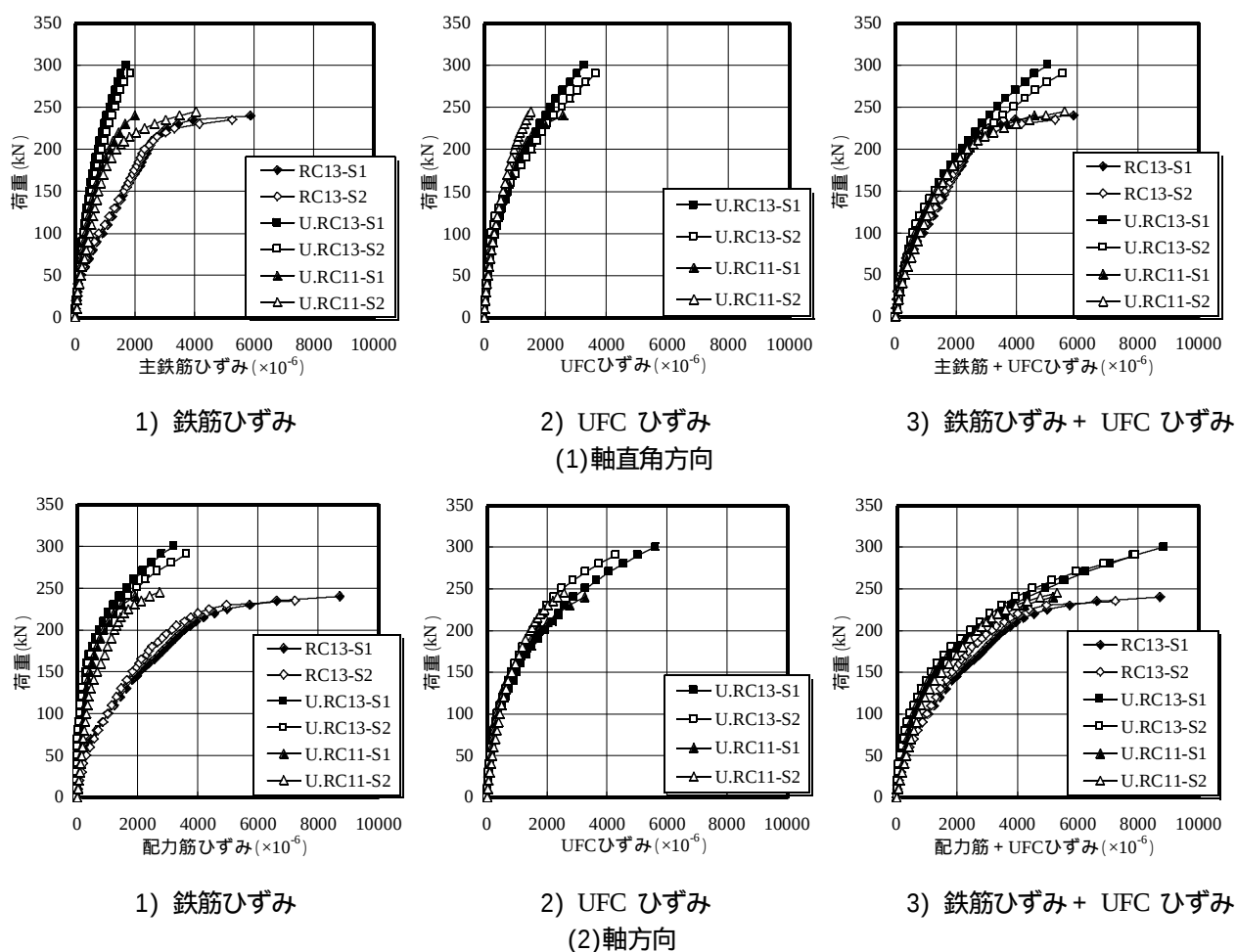


図 - 5 鉄筋・UFC 埋設型枠の荷重とひずみの関係

の関係(図-5(1), 1))は, 供試体 U.RC13-S の場合は終局時までほぼ線形的に増加した。終局時のひずみは供試体 U.RC13-S1 が荷重 299.6kN で 1730×10^{-6} , 供試体 U.RC13-S2 は荷重 289.2kN で 1870×10^{-6} であり, 両供試体ともにほぼ鉄筋の降伏ひずみ程度であった。次に, 供試体 U.RC11-S のひずみは荷重 200kN 付近までは線形的に増加し, その後の荷重増加からひずみの増加が大きくなった。終局時のひずみは供試体 U.RC11-S-1, S2 が荷重 245.0kN で, それぞれ 2000×10^{-6} , 4050×10^{-6} である。

次に, 軸方向の荷重とひずみの関係(図-5(2), 1))は, 軸直角方向とほぼ同様な増加傾向を示した。終局時のひずみは供試体 U.RC13-S1, S2 で, それぞれ 3220×10^{-6} , 3630×10^{-6} であり, RC 床版供試体と同様に軸直角方向を上回った。供試体 U.RC11-S のひずみは, 供試体 U.RC13 に比して 20mm 薄いために荷重 140kN 付近からひずみの増加が大きくなっている。終局時のひずみは, 供試体 U.RC11-S1, S2 で, それぞれ 1930×10^{-6} , 2740×10^{-6} であった。

以上より, RC 床版供試体に比して UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は, 軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋ひずみが大幅に抑制された。

(2) UFC埋設型枠のひずみ

UFC 埋設型枠の支間中央底面における荷重とひずみの関係を軸直角方向を図-5(1)2), 軸方向を図-5(1), 2)に示す。軸直角方向の UFC 埋設型枠のひずみは, 各供試体ともに荷重 100kN までは線形的に増加し, その後の荷重増加ではひずみの増加はやや大きくなるものの, 終局時では供試体 U.RC13-S1, S2 で, それぞれ 3300×10^{-6} , 3660×10^{-6} であった。次に, 軽量化を図った供試体 U.RC11 は, 荷重 180kN 付近までは供試体 U.RC13-S と同様な増加傾向を示している。供試体 U.RC11-S1 は終局時でややひずみが増加するものの 2580×10^{-6} 程度であった。また, 供試体 U.RC11-S2 は終局時までほぼ線形的に増加し, 終局時のひずみは 1520×10^{-6} 程度であった。

次に, 軸方向の荷重と UFC ひずみの関係は, 供試体 U.RC13-S1 は荷重 100kN 付近までは線形的に増加し, 荷重 200 付近からひずみの増加が大きくなり, 終局時は 5630×10^{-6} であった。また, 供試体 U.RC13-S2 は荷重 230kN 付近まで線形的に増加し, その後荷重増加でややひずみの増加が大きくなるものの, 終局時は 4290×10^{-6} であった。

供試体 U.RC11 は, 供試体 U.RC13 と同様な増加傾

向を示しており、供試体 U.RC11-S1, S2 で、それぞれ 3250×10^6 、 2560×10^6 であった。

(3) 鉄筋ひずみとUFC埋設型枠のひずみの合計

鉄筋ひずみと UFC 埋設型枠のひずみを合計した荷重とひずみの関係を軸直角方向を図 - 5(1), (3)、軸方向を図 - 5(2), (3)に示す。UFC 埋設型枠 RC 床版の鉄筋と UFC 埋設型枠のひずみの合計をみると、軸直角方向、軸方向ともに、RC 床版供試体のひずみの増加傾向と同様な増加傾向を示している。これは、UFC 埋設型枠と RC 床版が合成され UFC 埋設型枠と鉄筋で応力を分担していることが確認できる。

5. コンクリートのせん断強度評価式

5.1 コンクリートのせん断強度

RC 床版の押抜きせん断破壊は図 - 3, 4に示すように、輪荷重設置面から 45 度でせん断破壊となっている。松井らが提案する RC 床版の押抜きせん断力学モデルは、45 度で傾斜するせん断面の中立軸の位置までコンクリートのせん断強度の影響を考慮して押抜きせん断耐力を評価している。この場合のコンクリートのせん断強度式は、普通コンクリート（圧縮強度が 50 N/mm^2 ）までの場合が伊東式¹⁵⁾、高強度コンクリート（圧縮強度が $60 \text{ N/mm}^2 \sim 80 \text{ N/mm}^2$ ）の場合は並木式¹⁶⁾を適用している。また、東山¹⁷⁾は伊東・並木らの実験式における圧縮強度 $50 \text{ N/mm}^2 \sim 60 \text{ N/mm}^2$ 付近のデータが不足しているとして、管理供試体（角柱； $\square 100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ）を用いて二面せん断試験を行い、圧縮強度 $20 \text{ N/mm}^2 \sim 80 \text{ N/mm}^2$ までのせん断強度式を提案し、松井らが提案する押抜きせん断耐力評価式に適用している。また、コンクリートのせん断強度について筆者ら^{11), 12), 18)}は、モード 型の一面せん断試験装置を開発して一面せん断試験を行い、圧縮強度が $20 \text{ N/mm}^2 \sim 80 \text{ N/mm}^2$ までのせん断強度式を提案し、押抜きせん断耐力式に適用した。ここで、伊東式、並木式、東山式および筆者らが提案するコンクリートのせん断強度評価式は、それぞれ式(1)、式(2)、式(3)、式(4)として与えられている。

伊東式；($f_c \leq 49 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2 \quad (1)$$

並木式；($60 \text{ N/mm}^2 \leq f_c \leq 80 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = -264 + 53.1L_n(f_c) \quad (2)$$

東山式；($f_c \leq 80 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = 0.656f_c^{0.606} \quad (3)$$

筆者ら；($20 \text{ N/mm}^2 \leq f_c \leq 80 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \quad (4)$$

ここで、 f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

筆者らが提案するせん断強度 f_{cv0} は伊東、並木らが提案するせん断応力度（式(1)、(2)）を上回る結果が

得られた。東山式(3)は、伊東・並木らの実験を含めて算定したせん断強度式であり、同一試験から得た結果でないために差が生じたものと考えられる。よって、RC 床版の押抜きせん断評価式には筆者らの提案式(4)を適用する。

5.2 RC床版とUFC埋設型枠の合成面のせん断強度

UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊状況は、RC 床版部が押抜きせん断破壊と同時に UFC 埋設型枠との合成面で RC 床版がダウエル効果の影響を受ける範囲ではなく離が生じた（図 - 4(2)、(3)）。よって、理論押抜きせん断耐力の評価式においては UFC 埋設型枠の RC 床版との合成面のせん断強度を明らかにする必要がある。つまり、RC 床版部と UFC 埋設型枠との合成面は、せん断力によっては離するため、一面せん断試験を行い、合成面におけるコンクリートのせん断強度を明らかにする必要がある。そこで、筆者ら¹¹⁾が開発したモード 型（縦ずれ）の一面せん断試験装置を用いて一面せん断試験を行い、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面のせん断強度($f_{cv0,P}$)を評価した。本一面せん断試験装置の特長は、コンクリートの圧縮強度とせん断強度との関係を明確にできることである。つまり、管理供試体の角柱（ $\square 100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ）を用い、その供試体を $1/2$ に切断し、 $\square 100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ に加工して、せん断試験と圧縮試験を同一供試体で行うことができるので両者の関係が明確になる。

(1) 一面せん断試験用供試体寸法および圧縮強度

一面せん断試験用供試体の製作方法を図 - 6に示す。UFC とコンクリートの合成面の供試体は、角柱（ $\square 100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ）用の管理供試体型枠を用いて、型枠片面に P 型の型枠を設置して UFC を打設した。養生終了後、付着面側から 100 mm の位置で切断し、一面せん断試験用と圧縮強度試験用に分離した。次に、分離した UFC 供試体の付着面の P 型面を内側にして一面せん断試験用の型枠に設置した（図 - 6(1)）。そして、コンクリートを打設して一体化した（図 - 6(2)）。養生終了後は角柱供試体を長さ方向 $1/2$ の位置で切断し、一面せん断試験と圧縮試験に用いた（図 - 6(3)）。

UFC 埋設型枠の付着面を P 型とした場合の付着面の比率は、UFC 埋設型枠側が 60 %、RC 床版側 40 %であることから、一面せん断破壊は RC 床版側のコンクリートの圧縮強度が顕著となる。そこで、本実験ではコンクリートの圧縮強度を $30 \text{ N/mm}^2 \sim 45 \text{ N/mm}^2$ までの供試体を 12 体製作した。

(2) 圧縮試験およびモード 型一面せん断試験方法

コンクリートの圧縮試験は、図 - 6に示した圧縮試験用の供試体を用いて、コンクリートの圧縮載荷法 JIS A 1108の規定に基づき、加圧速度を毎秒 0.6 N/mm^2 で行った。

モード 型一面せん断試験装置およびせん断面を図 - 7に示す。



図 - 6 一面せん断試験用供試体の製作方法



図 - 7 モード Ⅰ 型一面せん断試験装置およびせん断面

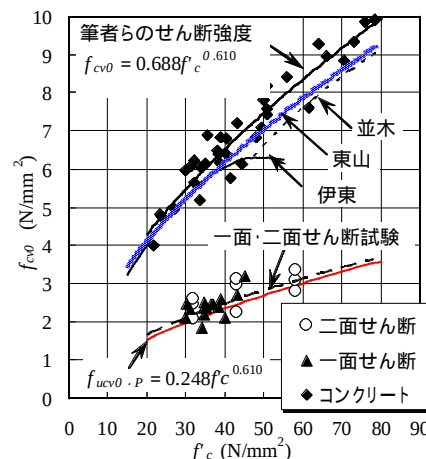


図 - 8 コンクリートせん断強度と圧縮強度の関係

また、モードⅠ型一面せん断試験装置を用いて、一面せん断試験用供試体（図 - 7(2)）を UFC とコンクリートの接合面でせん断されるように供試体を設置した（図 - 7(1)）。荷重の載荷方法は、圧縮試験方法と同様である。破壊形状は図 - 7(3)に示すように、UFC とコンクリートの合成面で一面せん断破壊に至った。

次に、一面せん断試験法によるせん断強度は、モードⅠ型による一面せん断試験によって得られるコンクリートのせん断応力度をせん断強度 f_{cv0} と定義し、式(5)より算出する。

$$f_{cv0,P} = P/A_s \quad (5)$$

ここで、 $f_{cv0,P}$ ：P 型付着面を有するコンクリートのせん断応力度、 P ：破壊荷重、 A_s ：一面せん断破壊面積
(3) コンクリートのせん断強度

UFC 埋設型枠表面の P 型合成面におけるコンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係を図 - 8 に示す。また、二面せん断試験の結果を図 - 8 に併記した。さらに、伊東、並木、東山、筆者らが提案するコンクリートのせん断強度の結果も図 - 8 に併記した。

本実験に用いた RC 床版のコンクリート圧縮強度が 35N/mm^2 の平均せん断強度は 2.37N/mm^2 である。また、小幡ら¹⁹⁾は UFC の P 型合成面に関する二面せん断試験を行っている。これによるとコンクリートの圧縮強度が 32N/mm^2 のせん断強度の平均が 2.38N/mm^2 となっており、本実験の場合はほぼ近似した結果が得られた。

図 - 8 より P 型合成面の一面せん断試験と二面せん断試験の結果の累乗近似曲線は、筆者らが提案するコンクリートのせん断強度（式(4)）の約 40 % 付近である。また、P 型付着面の凹凸面における凹の比率は全体面積の 40 % である。しかし、本提案式では、一面せん断試験における UFC 埋設型枠の凹部の位置のばらつきによる損失を考慮してコンクリートが占める面積の約 10 %、すなわち、全体の 36 % として、せん断

強度評価式を提案する。よって、UFC 合成面に P 型を採用した場合のせん断強度 $f_{cv0,P}$ は、式(6)として与えられる。

$$f_{cv0,P} = 0.248 f_c^{0.610} (f_c \leq 80\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

ここで、 f_c ：RC 床版部のコンクリート圧縮強度

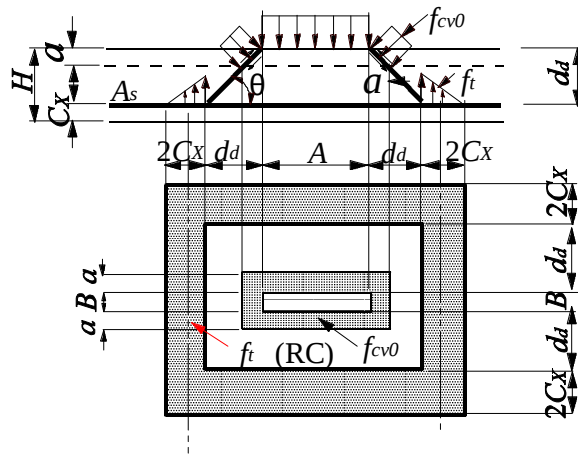
以上より、UFC 埋設型枠と RC 床版合成面におけるせん断強度の算出には式(6)を適用する。

6. 理論押抜きせん断耐力式およびせん断強度

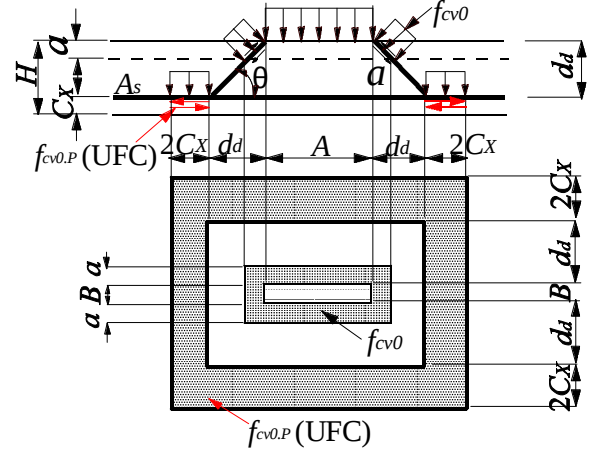
道路橋 RC 床版を対象とした押抜きせん断耐力式には、土木学会式⁸⁾、松井式⁹⁾および角田式¹⁰⁾が用いられている。一方、筆者らは、道路橋 RC 床版に作用する輪荷重走行を対象として提案されている松井式に着目し、押抜きせん断破壊への影響因子として、コンクリートの圧縮強度、有効高、鉄筋比の異なる RC 床版供試体を製作し、静荷重実験を行い、押抜きせん断力学モデルおよび耐力式の提案を行ってきた^{11), 12)}。さらに、松井式に適用されているコンクリートのせん断強度式についても提案し、RC 床版の実験耐力と理論耐力を近似させた。そこで、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび耐力式には、松井式を修正した筆者らの押抜きせん断力学モデルおよび耐力式を用いる。

6.1 RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび耐力式 (1) RC 床版の押抜きせん断力学モデル

松井らが提案する RC 床版の押抜きせん断力学モデルは、輪荷重接地面の周長から 45 度の傾斜でせん断破壊することから、中立軸から上縁のせん断断面はコンクリートのせん断強度の影響を考慮し、引張鉄筋かぶり内のはく離面、すなわちダウエル効果が及ぼす範囲にはコンクリートの引張強度を考慮している。これに



(1) RC 床版



(2) UFC 埋設型枠 RC 床版

図 - 9 押抜きせん断力学モデル

対して筆者らが提案する押抜きせん断力学モデルは、終局時には鉄筋が降伏し、底面はひび割れが発生している。また、終局状態における等価応力ブロック (\$a\$) の算出は、圧縮鉄筋が降伏しない場合の条件式を適用して算出し、等価応力ブロック (\$a\$) の範囲のせん断面にせん断強度 (\$f_{cv0}\$) が影響を及ぼすものとして解析した。引張鉄筋かぶり内は、松井らが提案する押抜きせん断力学モデルと同様である。いずれも実験値と提案式は良く近似する結果が報告されている^{11), 12)}。また、本実験における RC 床版の破壊状況 (図 - 3(1), 図 - 4(1)) においても、押抜きせん断破壊は輪荷重の接地面から 45 度の傾斜で押抜きせん断面を形成し、引張鉄筋かぶりはダウエル効果の影響によりはく離している。そこで、これらを考慮した RC 床版の押抜きせん断力学モデルを図 - 9(1)に示す。

(2) RC床版の押抜きせん断耐力式: $V_{cp,RC}$

RC 床版の理論押抜きせん断耐力は図 - 9(1)に示す力学モデルより、押抜きせん断耐力は式(7)として与える。

$$\begin{aligned} V_{cp,RC} &= f_{cv0} \{ 2(B+2a)a + 2(A \times a) \} \\ &+ f_t \{ 2(4C_x + 2d_d + B)C_x + 2(A + 2d_d)C_x \} \quad (7) \\ f_{cv0} &= 0.688f_c^{0.610} \quad f_c = 80\text{N/mm}^2 \\ f_t &= 0.269f_c^{2/3} \end{aligned}$$

ここで、 A, B : 載荷版の主鉄筋、配力筋方向の辺長 ($A = 250\text{mm}, B = 40\text{mm}$), a : 主鉄筋 (a_x) と配力筋方向 (a_y) の等価応力ブロックの大きさの平均 ($= (a_x + a_y)/2$), f_{cv0} : コンクリートのせん断強度 (N/mm^2)¹¹⁾, f_t : コンクリート引張強度 (N/mm^2)²⁰⁾, C_x : ダウエル効果の及ぼす影響範囲, C'_d : 主鉄筋のかぶり (d'_x) と配力筋方向のかぶり (d'_y) の平均 ($= (d'_x + d'_y)/2$), d_d : 主鉄筋の有効高さ (d_x) と配力筋方向の有効高さ (d_y) の平均 ($= (H - C_x)$), f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

式(7)より算出した RC 床版の理論押抜きせん断耐力

を表 - 4に示す。

6.2 UFC埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび耐力式

(1) UFC埋設型枠RC床版の押抜きせん断力学モデル

UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊状況は (図 - 3(2), (3), 図 - 4(2), (3)) に示すように、輪荷重接地面から 45 度の傾斜で押し抜かれ、UFC 底面はひび割れが分散している。RC 床版部は RC 床版と同様な破壊形状を示しているが破壊時に UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面は、RC 床版のダウエル効果が及ぼす範囲で、UFC 埋設型枠の凹凸面に挿入されたコンクリート面が横ずれによりはく離している。これは、RC 床版のコンクリートの引張強度 $f_t (= 0.269f_c^{2/3}, f_c$: コンクリートの圧縮強度 ($= 35\text{N/mm}^2$))²⁰⁾ が 2.8N/mm^2 に対して合成面の一面せん断強度は 2.37N/mm^2 である。また、UFC の引張強度 $f_t (= (f_b - 1.54)/2.59, f_b$: UFC 材の曲げ強度 ($= 34.9\text{N/mm}^2$))¹³⁾ は 12.9N/mm^2 であり、普通コンクリートの引張強度に比して 4.6 倍となる。したがって、引張鉄筋のダウエル効果が及ぼす範囲で一面せん断強度に達した後、はく離したものと考えられ。よって、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断力学モデルは、RC 床版のダウエル効果が及ぼす範囲で UFC 埋設型枠と RC 床版がはく離するものとして RC 床版の押抜きせん断モデルを基に、押抜きせん断力学モデルを提案する。UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断力学モデルを図 - 9(2)に示す。

(2) UFC埋設型枠RC床版の押抜きせん断耐力: $V_{cp,UFC}$

UFC 埋設型枠 RC 床版は、図 - 9(2)に示す押抜きせん断力学モデルより、コンクリートのせん断強度 (f_{cv0}) は終局時における等価応力ブロック (a) の範囲に及ぼすとする。また、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面は P 型の一面せん断試験によるせん断強度 ($f_{cv0,P}$) が RC 床版のダウエル効果が及ぼす面ではく離破壊するもの

とし、RC 床版の押抜きせん断耐力式を発展させて UFC 埋設型枠 RC 床版に適用した提案式とする。よって、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断耐力は式(8)として与えられる。なお、本供試体は道示の規定に基づいて設計した寸法および鉄筋量の 1/2 モデルとし、床版厚を 130mm の供試体と軽量化を目的とした 110mm の 2 タイプについて実験を行った。その結果、はく離面が押抜きせん断強度に及ぼす影響は引張鉄筋の有効高とかぶり厚、すなわち UFC の厚さが顕著となり、床版厚 130mm の供試体は実験耐力に比して理論耐力が 10 %程度下回り、軽量化した床版厚 110mm の供試体の理論耐力が実験耐力を 5 %程度上回る結果となった。そこで、この耐力差を近似させるためにダウエル効果が及ぼす範囲に、床版厚 h を関数とする寸法効果係数 κ_h を乗じることとする。

$$V_{cp,UFC} = f_{cv0}\{2(B+2a)a+2(A\times a)\} + f_{cv0,P}\{4(4C_x+2d_d+B)C_x+4(A+2d_d)C_x\}\kappa_h \quad (8)$$

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \quad f_c = 80\text{N/mm}^2$$

$$f_{cv0,P} = 0.248f_c^{0.610} \quad f_c = 80\text{N/mm}^2$$

$$\kappa_h = (0.085h - 0.02)$$

ここで、 $f_{cv0,P}$: P タイプの一面せん断強度(N/mm²)、 κ : 高さ方向の寸法効果係数、 h : 床版厚(cm)

式(8)より算出した UFC 埋設型枠 RC 床版の理論押抜きせん断耐力を表 - 4に示す。

6.3 RC床版・UFC埋設型枠RC床版の押抜きせん断耐力

本実験に用いた RC 床版および UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の最大耐力、理論押抜きせん断耐力の結果を表 - 4に示す。

(1) RC床版

RC 床版の理論押抜きせん断耐力は、主要因であるコンクリートの圧縮強度、鉄筋比、有効高を考慮して数十体の試験体を用いて静荷重実験を行った結果より提案した理論式¹²⁾であることから、破壊時の実験耐力を下回る安全性を考慮した押抜きせん断耐力式として提案している。したがって、実験値に比して理論耐力が 10 %程度下回る結果となった。

(2) UFC埋設型枠RC床版

本提案する押抜きせん断耐力は、等価応力ブロックの上縁にコンクリートのせん断強度の影響を考慮し、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面ははく離することから、RC 床版のダウエル効果が及ぼす範囲として解析した。UFC 埋設型枠 RC 床版についても UFC 埋設型枠と RC の合成面のせん断強度および本提案する押抜きせん断耐力は実験値と良く近似し、整合性が得られた。

筆者ら¹²⁾が提案する RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび評価式は、コンクリートの圧縮強度、有効高、鉄筋比、載荷板等の押抜きせん断耐力に関する影響因子を考慮した多くの試験体を用いての実験結果より提案したものであり、この提案式を用いて UFC 埋

表 - 4 実験および理論耐力

供試体	最大耐力 (P_{max}) (kN)	理論耐力 ($V_{cd,R}, V_{cd,UFC}$) (kN)	耐力比 (kN)
RC13-S1	235.2	217.6	1.08
RC13-S2	240.2		1.10
U.RC13-S1	299.6	287.7	1.04
U.RC13-S2	289.7		1.01
U.RC11-S1	245.0	236.5	1.04
U.RC11-S2	245.0		1.04

設型枠 RC 床版へ適用したものである。本供試体では実験耐力と理論耐力とは良く近似する結果が得られているが、今後は合成面の付着強度をさらに改善し、UFC の特徴である鋼繊維配合による架橋効果を活用すれば、さらに耐力の向上を図ることが可能であると考えられる。

7. まとめ

(1)UFC 埋設型枠を用いた RC 床版と通常の型枠を用いた RC 床版の耐力を比較すると、UFC 埋設型枠を用いた RC 床版は、UFC と RC 床版の合成効果により、1.24 倍耐力が向上した。また、軽量化を目的として床版厚を 20mm 減少させた床版厚 110mm の供試体は、床版厚 130mm の RC 床版と同等な耐力を有した。したがって、軽量化が図られる構造であることが実証された。

(2)通常型枠使用による RC 床版供試体と UFC 埋設型枠と RC 床版を合成させた供試体の主鉄筋および配筋筋のひずみを比較すると UFC 埋設型枠を用いた供試体のひずみの増加が大幅に抑制された。また、UFC 埋設型枠底面の荷重とひずみの関係より、UFC 埋設型枠に配合された鋼繊維の架橋効果により UFC 埋設型枠も耐力を分担していることが確認された。

(3)RC 床版の破壊モードは、押抜きせん断破壊となり、UFC 埋設型枠 RC 床版は押抜きせん断破壊と同時に RC 床版のダウエル効果を示す位置で UFC 埋設型枠がはく離した。また、軸直角方向の切断面は 45 度の傾斜角で押し抜かれた。

(4)RC 床版と UFC 埋設型枠との合成面で押抜きせん断破壊と同時に UFC 埋設型枠がはく離することから、UFC 埋設型枠の付着面を P 型とした合成面の一面せん断試験を行った結果、埋設型枠面の凹部に挿入されたコンクリートの面積が 40 %のため、筆者らが提案するせん断強度式(5)のせん断強度の 40 %と同様な結果となった。

(5)破壊状況による力学モデルから得られた押抜きせん断耐力は、通常の RC 床版の場合は等価応力ブロックの範囲にせん断強度の影響、底面のダウエル効果が及ぼす範囲は引張強度の影響を考慮することで実験値と理論値が近似した。また、UFC 埋設型枠 RC 床版の場

合は等価応力ブロックの範囲はせん断強度の影響、底面は RC 床版のダウエル効果が及ぼす面に本実験から得られたせん断強度を適用することで近似した結果が得られた。

参考文献

- 1) 牧隆輝, 田中敏嗣, 阿部忠, 木田哲量: RPC 製埋設型枠を用いた RC はりの載荷試験, コンクリート工学年次論文集 Vol. 27, No.1, pp. 289-294, 2005.
- 2) 土木研究センター: 土木系材料技術・技術審査証明報告書「FRP と高強度モルタルの複合部材による高耐久性埋設型枠材「H・R フォーム」」, 1995.
- 3) 下山善秀, 鶴澤正美: ダクタルの特性と応用分野, 太平洋セメント研究報告, No. 142, pp. 55-62, 2002.
- 4) 小沢満三, 鶴田健, 内藤隆史: ポリマー含浸コンクリート板を永久型枠として用いた PC 梁の基礎研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 7, pp. 473-476, 1985.
- 5) 阿部忠, 木田哲量, 新見彩, 片桐誠: 低環境負荷型 UFC 埋設型枠を用いた RC 床版の実験耐荷力および破壊メカニズム, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.462-469, 2008.
- 6) 新見彩, 阿部忠, 木田 哲量, 片桐誠: UFC 埋設型枠 RC 床版の静的耐荷力と疲労特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp.1441-1446, 2008.
- 7) 新見彩, 阿部忠, 木田哲量, 澤野利章, 片桐誠: UFC 埋設型枠 RC 床版の疲労耐久性, 第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 69-74, 2008.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 土木学会, 2002.
- 9) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号, -1, pp.133-141, 1984.
- 10) 角田与史雄, 伊藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp. 105-115, 1974.
- 11) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 澤野利章, 加藤清志: 静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 919-926, 2004.
- 12) 阿部忠, 木田哲量, 徐銘謙, 澤野利章: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 199-207, 2007.
- 13) 土木学会, コンクリートライブラリー 113「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」, 2004.
- 14) 日本道路橋会: 道路橋示方書・同解説, , , 2004.
- 15) 伊東茂富: コンクリート工学, 森北出版, pp.75, 1972.
- 16) 並木哲, 山本康弘, 戸際邦之, 黒羽健嗣: 高強度コンクリートの各種強度の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概要, pp. 737-738, 1989.
- 17) 東山浩士, 松井繁之, 水越睦視: PC 床版の押し抜きせん断耐荷力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1347-1354, 2001.
- 18) 高野真希子, 木田哲量, 阿部忠, 加藤清志: コンクリートの圧縮応力場におけるせん断強度と一面せん断強度との多要因相関に関する研究, セメント・コンクリート論文集, pp. 232-237, 2001.
- 19) 小幡浩之, 西澤辰男, 佐々木蔵, 國府勝郎: UFRC-コンクリート複合部材の界面におけるせん断特性, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp. 217-218, 2005.
- 20) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法, コンクリートセミナー 4, 共立出版, pp.17-18, 1979.

(2009 年 9 月 18 日受付)