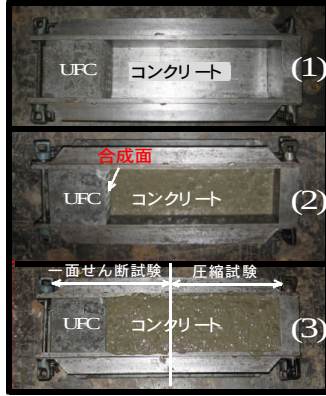


日大生産工 阿部 忠・木田 哲量・澤野 利章
太平洋セメント(株) 田中 敏嗣

表－3 最大耐荷力および破壊モード

供試体	最大耐荷力 (kN)	平均耐荷力 (kN)	耐荷力比 U.RC / RC	破壊モード
RC-S-1	235.2	237.7	—	押抜きせん断破壊
RC-S-2	240.2			押抜きせん断破壊
U.RC-S-1	299.6	294.7	1.24	押抜きせん断破壊
U.RC-S-2	289.7			押抜きせん断破壊



図－3 供試体の作成方法

床版供試体と同様であり、RC 床版部厚 110mm、UFC 埋設型枠厚 20mm であり、合成後の床版厚は 130mm である。供試体名称は U.RC-S とする。

2.4 静荷重実験方法

静荷重実験は、曲げ応力が最大となる床版中央に輪荷重を停止した状態の実験である。荷重載荷方法は鉄筋が降伏するまでは 10kN ずつ増加させ、

鉄筋降伏後は破壊に至るまで 5.0kN ずつ増加させた。

2.5 実験耐荷力

静荷重実験における最大耐荷力および破壊モードを表－3 に示す。

最大耐荷力の平均は、RC 床版供試体、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体でそれぞれ 237.7kN、294.7kN であった。耐荷力を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体の 1.24 倍となった。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作用により耐荷力が向上する結果となった。

3. コンクリートのせん断強度評価式

3.1 コンクリートのせん断強度

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による押抜きせん断耐荷力を評価している。この場合のコンクリートのせん断強度の式は、普通コンクリート（圧縮強度が 50N/mm^2 ）までの場合が伊東式⁴⁾、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⁵⁾を適用している。また、東山⁶⁾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荷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⁷⁾は、モードⅡ型の一面せん断試験装置を開発して一面せん断実験を行い、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、押抜きせん断耐荷力式に適用した。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；($f_c \leq 49\text{N/mm}^2$)

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

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

$$f_{co} = -264 + 53.1L_u(f_c) \quad (2)$$

東山式；($f_c \leq 80\text{N/mm}^2$)

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

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

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

ここで、 f_{co} ：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_{co} は伊東・並木らが提案するせん断応力度（式(1)、(2)）を上回った。これは、伊東・並木らが用いた 1960 年代のコンクリートに対して、近年のコンクリートは品質が向上したためであると考えられる。また、東山式(3)は、伊東・並木の実験を含めて算定した値と併せ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。

3.2 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く離が生じる。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く離するため、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、モードⅡ型（縦ずれ）により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 ($f_{co,P}$) を評価した。

(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－3 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 100mm 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－3(1)）。そして、コンクリートを打設して一体化した（図－3(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－3(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) モードⅡ型一面せん断試験方法

圧縮試験は、図－3(3)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 0.6N/mm^2 で行った。

また、モードⅡ型による一面せん断試験は UFC とコンクリートの合成面でせん断されるように供試体を設置し、荷重載荷方法は圧縮試験と同様とした。破壊形状は UFC とコンクリートの合成面で一面せん断破壊に至った。

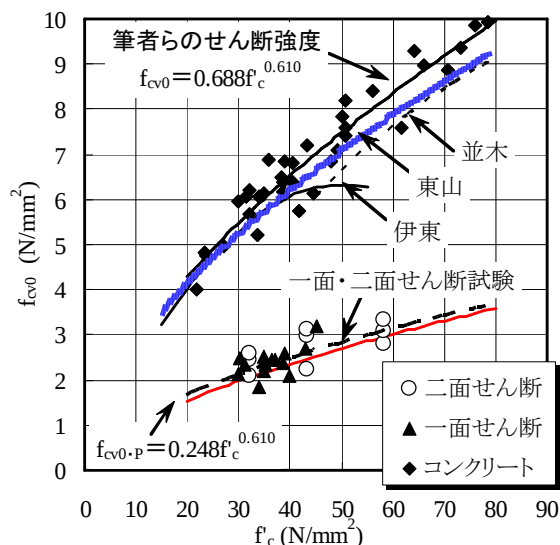
次に、一面せん断試験法によるせん断強度は、モードⅡ型による一面せん断試験によって得られるコンクリートのせん断応力度をせん断強度 (f_{co}) と定義し、式(5)より算出する。

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

ここで、 $f_{co,P}$ ：P 型の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



図－４ コンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係

の圧縮強度とせん断強度の関係を図－４に示す。また、二面せん断試験の結果を図－４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－４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⁸⁾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、本実験の場合はやや下回ってはいるもののほぼ近似した結果が得られた。

図－４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(5)) の約 40 %付近である。また、P 型付着面の凹凸面における凹部の比率は全体面積の 40 %であり、筆者らが提案するコンクリートのせん断強度式(4)の結果の 40 %とほぼ同等な結果となっている。しかし、本提案式では UFC 埋設型枠の凹部のばらつきによる損失を約 10 %考慮して、せん断強度評価式を提案する。つまり、UFC 合成面に P 型を採用した場合のせん断強度 f_{cv0P} は、式(6)として与える。

$$f_{cv0P} = 0.248f_c^{0.610} \quad (f_c \leq 80\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

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。

4. 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⁹⁾、松井式¹⁰⁾が用いられている。

一方、筆者らは、道路橋 RC 床版を対象に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、押抜きせん断破壊モデルおよび耐力式の提案を行ってきた⁷⁾。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。

4.1 RC 床版の破壊力学モデルおよび耐力式

(1) RC 床版の破壊力学モデル

松井らが提案する RC 床版の押抜きせん断破壊力学モデルは、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、終局時の中立軸の位置は圧縮鉄筋の上縁となることから、終局状態における等価応力ブロック (a) の範囲のせん断面にせん断強度 (f_{cv0}) の影響が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。また、本実験における RC 床版の破壊状況は、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 床版の破壊力学モデルを図－5(1)に示す。

(2) RC 床版の押抜きせん断耐力式 : V_{pR}

RC 床版の理論押抜きせん断耐力は図－5(1)に示す力学モデルより、式(7)として与える。

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

ここで、 A 、 B : 載荷版の主鉄筋、配筋方向の辺長 ($A = 250\text{mm}$, $B = 40\text{mm}$)、 a : 主鉄筋 (a_x) と配筋方向 (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)、 f_t : コンクリート引張強度 (N/mm^2)、 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) 配筋方向のかぶり (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。

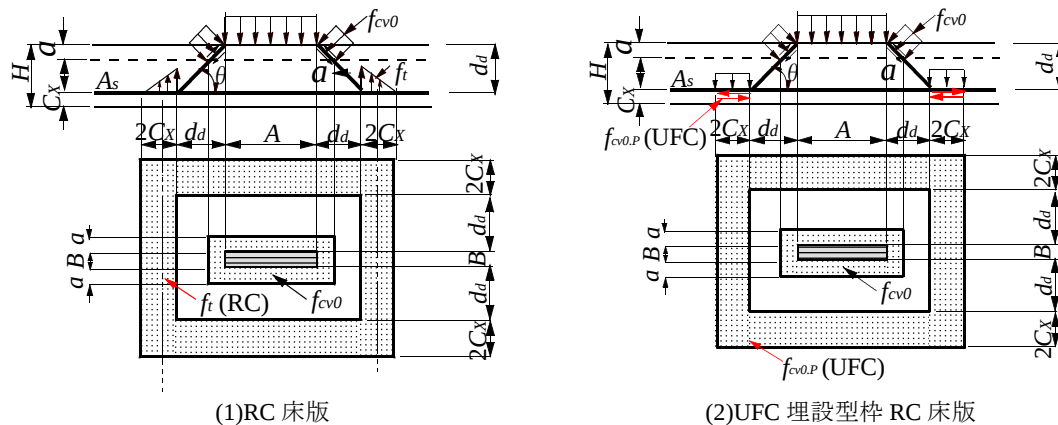
4.2 UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊力学モデルおよび耐力式

(1) UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊力学モデル

UFC 埋設型枠 RC 床版の破壊状況は、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た。RC 床版部は RC 床版と同様な破壊形状を示したが破壊時に 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、せん断強度が低下してはく離した。なお、UFC 埋設型枠には鋼繊維が無数に配合されていることから曲げ引張による破壊は生じなかった。よって、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断破壊力学モデルは、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提案する。UFC 埋設型枠 RC 床版の力学モデルを図－5(2)に示す。

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

UFC 埋設型枠 RC 床版は、図－5(2)に示す破壊力学モデルより、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) の範囲に及ぼすものとする。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_{cv0P}) が、RC 床版のダ



図－5 破壊力学モデル

ウエル効果が及ぼす面ではく離破壊するものとする。よって、UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断耐力は式(8)として与える。

$$V_{p,UFC} = f_{cv0} \{ 2(B+2a)a + 2(A \times a) \} + f_{cv0,P} \{ 2(4Cx+2da+B)Cx + 2(A+2da)Cx \} \quad (8)$$

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

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

ここで、 $f_{cv0,P}$: P タイプの一面せん断強度 (N/mm²)

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。

4.3 RC 床版・UFC 埋設型枠 RC 床版の押抜きせん断耐力

RC 床版および UFC 埋設型枠 RC 床版体の静荷重実験による最大耐力、式(7)、式(8)より算出した理論押抜きせん断耐力を表－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⁷⁾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

UFC 埋設型枠 RC 床版の場合は、UFC に鋼繊維が配合されていることから高引張強度を有するが、本提案式における等価応力ブロック (a) の算出においては、破壊荷重付近で UFC と RC 床版はく離することから UFC の引張強度は考慮しないものとして解析した。また、本提案の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すると、UFC 埋設型枠と RC 床版の合成面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の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⁷⁾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、鉄筋比および載荷版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た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

力の向上を図ることが可能であると考えられる。

5. まとめ

(1)UFC 埋設型枠 RC 床版と RC 床版の耐力を比較すると、UFC 埋設型枠 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。

(2)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、UFC 埋設型枠面の凹部に挿入されたコンクリートの面積 (40 %) が顕著となり、筆者らが提案するせん断強度式(5)のせん断強度の 40 %となる同様な結果となった。

(3)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式は、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に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, (2005), pp. 289-294.
- 2) 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).
- 3) 日本道路橋会, 道路橋示方書・同解説 I, II, III, (2004).
- 4) 伊東茂富, コンクリート工学, 森北出版, (1972), pp. 75.
- 5) 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, (1989), pp. 737-738.
- 6) 東山浩士, 松井繁之, 水越睦視, PC 床版の押し抜きせん断耐力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 47A, (2001), pp. 1347-1354.
- 7) 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力評価式に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 53A, (2007), pp. 199-207.
- 8) 小幡浩之, 西澤辰男, 佐々木徹, 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, (2005), pp. 217-218.
- 9) 土木学会, コンクリート標準示方書 (構造型態照査編), (2002).
- 10) 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力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号, V-1, (1984), pp.133-141.