

鋼繊維補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力に関する解析的検討

東山浩士*, 往田有果理**

Analytical Study on Punching Shear Capacity of SFRC Slabs

Hiroshi HIGASHIYAMA* and Akari OTA**

The authors have proposed the punching shear capacity equation for steel fiber reinforced concrete (SFRC) slabs based on the equation of Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Addition of steel fibers into concrete improves mechanical behavior, ductility and fatigue strength of concrete. Previous studies by many researchers have been demonstrated the effectiveness of fiber reinforcement in improving the shear behavior of reinforced concrete (RC) slabs. The proposed equation for the punching shear capacity of SFRC slabs have been verified on 70 SFRC slabs. Those SFRC slabs tested in laboratories were relatively smaller slab thickness than actual bridge slabs. In the present study, in order to verify the further applicability of the proposed equation, finite element analysis is carried out for real size of SFRC slabs. From the comparison between the finite element analysis and the proposed equation, the proposed equation is applicable to real size of SFRC slabs.

Key words : Steel fiber reinforced concrete, Reinforced concrete slab, Punching shear capacity, FEM analysis

1 はじめに

道路橋鉄筋コンクリート(RC)床版や柱-床版接合部のような RC 面部材に集中荷重が作用すると、それらは曲げ破壊に先行して押抜きせん断破壊を呈する。押抜きせん断破壊は脆性的な破壊形態であり、このような破壊形態を改善するため、繊維補強コンクリート(FRC)を適用した面部材の押抜きせん断挙動や耐荷力に関して過去 30 年以上にわたり国内外にて研究されてきた[1-11]。これら研究の多くは、主に、鋼繊維が使用されており、繊維補強 RC 床版の押抜きせん断挙動の改善、押抜きせん断耐荷力の向上が明らかにされてきた。

Narayanan ら[3]や Theodorakopoulos ら[10]は繊維の補強効果を考慮した押抜きせん断耐荷力式を提案している。Narayanan ら[3]は、繊維の形状・種類、繊維混入率による fiber factor[12]を用いて算定した鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の割裂引張強度と繊維の引抜き強度を取り入れた押抜きせん断耐荷力式を提案している。また、fiber factor に応じて押抜きせん断ひび割れ範囲が異なるとした実験結果から、押抜きせん断耐荷力照査断面の周長を補正している。Theodorakopoulos ら[10]は、繊維の引抜き強度を取り入れ、さらに終局状態における中立軸深さを考慮した押抜きせん断耐荷力式を提案している。

一方、土木学会コンクリート標準示方書等の基準・指針類には、繊維補強コンクリートを用いたはり部材のせん断耐荷力に関する設計手法[13]はあるものの、繊維補強コン

クリートを用いた面部材の押抜きせん断耐荷力に関する設計手法は数少ない。そこで著者らは、土木学会コンクリート標準示方書[14]に規定されている RC 面部材の押抜きせん断耐荷力式を基本にした SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式を提案し、実験結果との比較によりその妥当性を検証してきた[15, 16]。これらの研究では、提案した耐荷力式と実験結果とを比較してきたが、収集した既往の実験結果を含めて、それらは実験室レベルで実施されたものばかりであり、床版寸法は実橋床版に比べて小さい。

そこで本研究では、実橋床版寸法モデルについて 3 次元非線形有限要素解析結果と耐荷力式との比較を行い、既往の実験で包含できなかった寸法の SFRC 床版に対する耐荷力式の妥当性を検証することにした。以下では、著者らが提案した耐荷力式を紹介し、著者らの実験結果と解析結果の比較による解析手法の妥当性を述べた後、実橋床版モデルの解析と耐荷力式との比較結果について述べる。

2 SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式[15, 16]

2. 1 SFRC 床版

実験に使用した鋼繊維は、Fig. 1 に示すフックエンドタイプであり、長さ 30 mm、直径 0.62 mm、降伏強度 1119 N/mm²、ヤング係数 184 kN/mm²である。SFRC は、所定の鋼繊維をアジテータ車に投入した後、5 分間、高速回転させてから打設した。繊維混入率は 6 種類を設定した。鋼繊維混入率は、Table 1 に示すように 0.63~1.03%であった。

床版試験体は、Fig. 2 (t100-0.67)に示すように、1200×1200 mm の正方形床版を 12 体作製した(Table 1)。鉄筋は引張側のみに D10(SD295A)を配置し、鉄筋間隔はすべての床版で 120 mm 間隔とした。ただし、床版厚を変化させているため、床版厚に応じて鉄筋比が異なっている。

平成 24 年 6 月 11 日受理

* 社会環境工学科

** 明石市役所 (研究当時: 総合理工学研究科環境系工学専攻)

Table 1 SFRC slabs tested in this study

Slabs	Thickness (mm)	Effective depth (mm)	Reinforcement ratio (%)	Fiber volume fraction (%)	Compressive strength (N/mm ²)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)
t100-0.67	100	70	0.85	0.67	24.6	22.6
t140-0.67	140	110	0.54			
t180-0.67	180	150	0.40			
t100-0.72	100	65	0.91	0.72	42.4	29.6
t140-0.72	140	105	0.57			
t180-0.72	180	145	0.41			
t100-0.91	100	65	0.91	0.91	21.6	21.4
t140-0.91	140	105	0.57			
t180-0.91	180	145	0.41			
t100-0.63	100	70	0.85	0.63	27.8	19.2
t100-0.94	100	70	0.85	0.94	31.1	24.0
t100-1.03	100	70	0.85	1.03	30.4	24.0

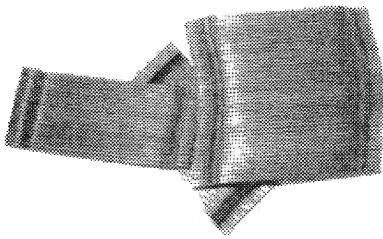


Fig. 1 Hooked-ends steel fiber

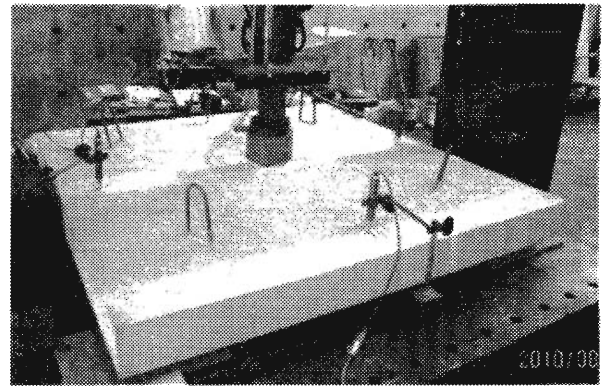


Fig. 3 Punching shear test setup

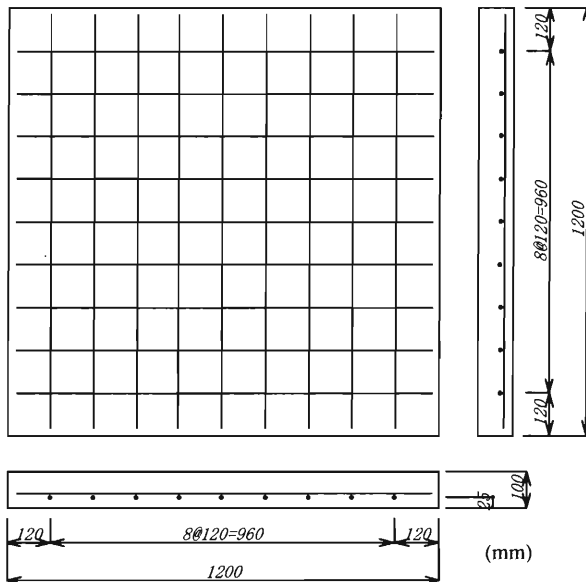


Fig. 2 Specimen size and reinforcement arrangement

2. 2 試験方法

床版試験体は、Fig. 3 に示すように、すべて 4 辺単純支持（支間長 1.0 m）とし、床版と支持鋼棒との間には不陸調整のためのモルタルを敷設した。載荷板は 100×100 mm

の鋼板を用いた。

2. 3 押抜きせん断耐荷力式

土木学会コンクリート標準示方書[14]を基に提案した SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式を以下に示す。本提案式では、土木学会式に繊維の引抜き強度と照査断面周長の補正を加えた。詳しくは文献[15, 16]を参照されたい。

$$V_u = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot (f'_{pcd} + f_b) \cdot u_p \cdot d \quad (1)$$

$$f'_{pcd} = 0.2 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

$$f_b = 0.41 \tau \cdot F \quad (3)$$

$$F = (L/D) \cdot V_f \cdot d_f \quad (4)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (5)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} \quad (6)$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d) \quad (7)$$

$$u_p = (u + \pi \cdot d) \cdot (1 - K \cdot F) \quad (8)$$

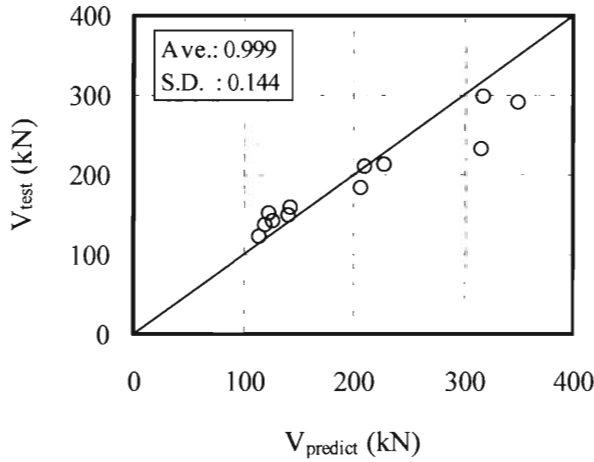


Fig. 4 Comparison between experimental values and predicted values

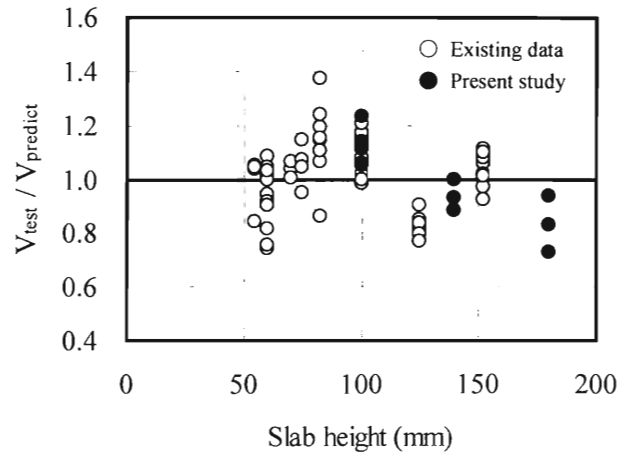


Fig. 6 Relationship between punching shear capacity ratio and slab height

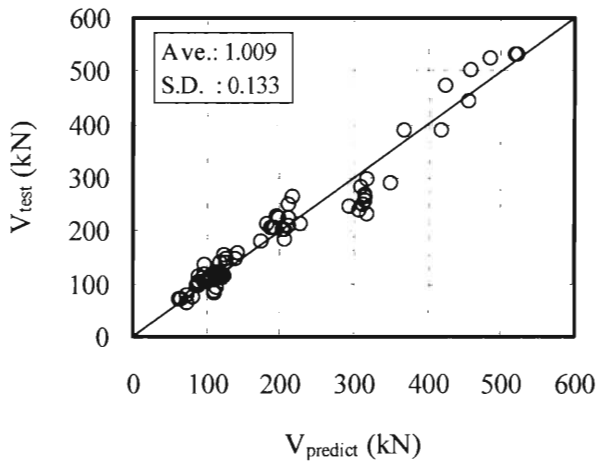


Fig. 5 Comparison between experimental values and predicted values

ここに、 f'_c : SFRC の圧縮強度 (N/mm^2), f_b : 繊維の引抜き強度 (N/mm^2), τ : 繊維とマトリックス界面の付着強度 ($=4.15 N/mm^2$), F : fiber factor, L : 繊維の長さ (mm), D : 繊維の直径 (mm), V_f : 繊維混入率, d_f : bond factor (フックエンドは 1.0), d : 平均有効高さ (mm), p : 平均鉄筋比, u : 載荷面の周長 (mm), u_p : 載荷面から $d/2$ だけ離れた位置での照査断面の周長 (mm), K : 押抜きせん断耐力照査断面の周長補正係数 ($=0.32$) である。ただし、 f'_{pcd} は $1.2 N/mm^2$ 以下、 β_d および β_p は 1.5 を越える場合は 1.5 とする。

上述した SFRC 床版 12 体の実験結果と算定結果の比較を Fig. 4 に示す。算定値に対する実験値の比の平均は 0.999、標準偏差は 0.144 であった。ただし、床版厚 180 mm の試験体に対する算定精度が低下する傾向が見られた。

また、他の研究者らが実施した実験結果も含めた比較を行うため、文献[1-3, 6, 7, 9, 11]の 58 体を含めた全 70 体の比較を Fig. 5 に示す。算定値に対する実験値の比の平均は

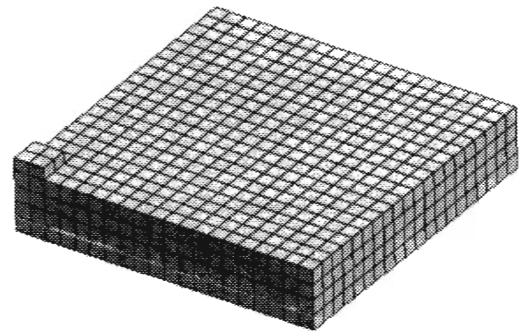


Fig. 7 FE analytical model

1.009、標準偏差は 0.133 であり、著者らの実験結果に対する算定精度とほぼ同様な結果が得られている。

Fig. 6 は耐力比と床版厚の関係である。著者らの実験床版 (●印) では、床版厚の増大とともに算定精度が低下している。しかし、既往の実験データを含めた耐力比と床版厚との関係では、全体としてほぼ一様なばらつきにあり、床版厚の増大に伴う算定式の精度に優位な低下は見られない。よって、著者らの実験において床版厚の大きな SFRC 床版の繊維の分散性に問題があった可能性が高い。

3 3次元非線形有限要素解析

3.1 解析モデル

本研究では、実験床版を対象とした解析プログラム ATENA[17]による 3次元非線形有限要素解析を実施し、解析モデルの検証を行った。解析モデルは Fig. 7 に示すように、対象性から床版の 1/4 モデルとした。コンクリートは 8 節点ソリッド要素とし、ひび割れモデルは回転分散ひび割れモデルを適用した。また、鉄筋は軸方向の剛性のみを考慮した完全付着はり要素とし、応力-ひずみ関係はバイリニア型とした。本解析では、変位増分法を用い、収束判

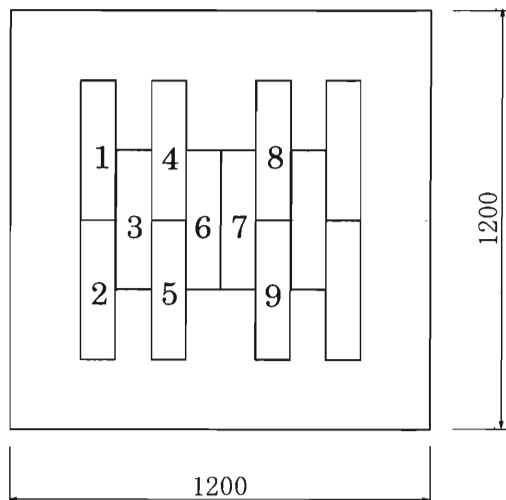


Fig. 8 Cutting position of prism specimens

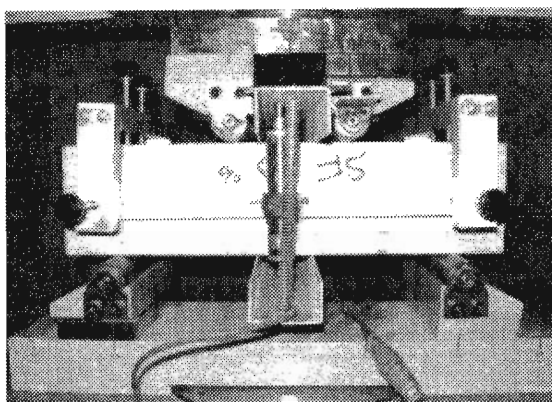


Fig. 9 Four-point bending test setup

算には Newton-Raphson 法を用いた。その他の詳細は文献 [17] を参照されたい。

3.2 引張軟化曲線

SFRC 床版の解析においては、SFRC にひび割れが発生した後の引張軟化特性が全体挙動に大きく影響を及ぼす。また、SFRC の引張軟化特性はコンクリート中の繊維の配向によって異なることが知られている。床版部材は、はり部材と異なり、平面的にもある大きさを有していることから、床版コンクリート中の繊維は 3 次元配向となる。そこで本研究では、SFRC の引張軟化特性をモデル化するため、床版試験体作製と同時に $1200 \times 1200 \times 100$ mm の無筋 SFRC 床版を別途に作製し、そこからコンクリートカッターにより $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱試験体を切り出した (Fig. 8)。この中から 6 体 (No.1~No.6) を抽出し、4 点曲げ荷重試験 (Fig. 9) を実施した。ただし、角柱試験体に切欠きは設けていない。荷重-たわみ曲線と多直線近似法解析 [18] からそれぞれの繊維混入率に対する引張軟化曲線を求めた。多直線近似法解析に用いた解析モデルを Fig. 10 に示す。一例として、繊維混入率 0.63% および 0.91% の荷重-たわみ曲線を Fig. 11 に示す。

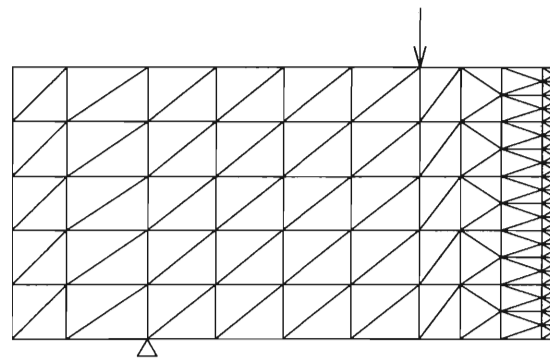
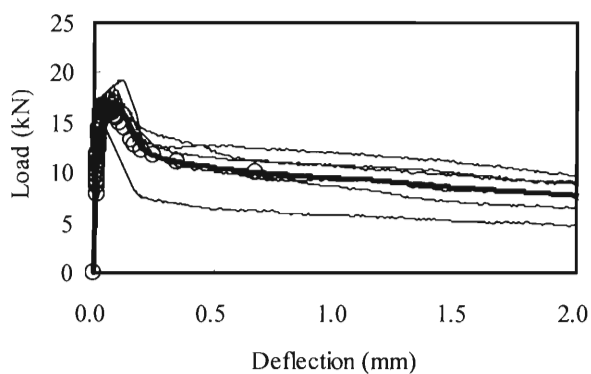
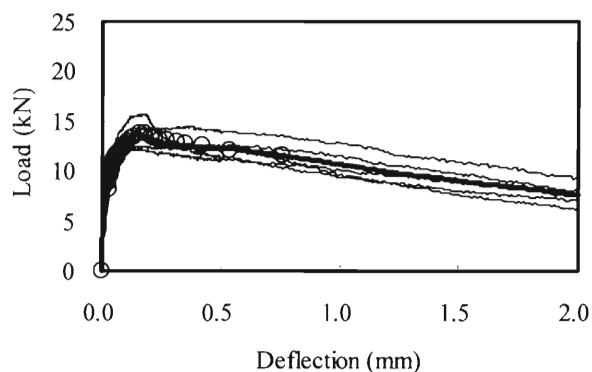


Fig. 10 Analytical model for multi-linear approximation analysis



(a) Fiber volume fraction of 0.63%



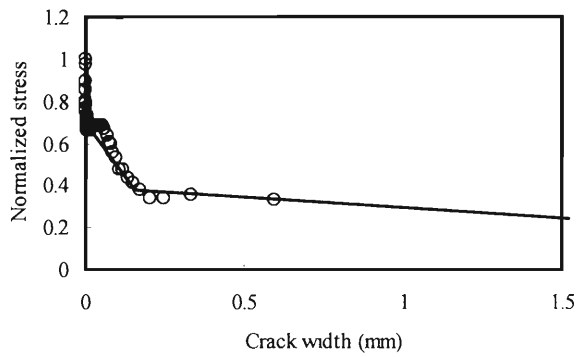
(b) Fiber volume fraction of 0.91%

Fig. 11 Load and deflection curves of bending tests

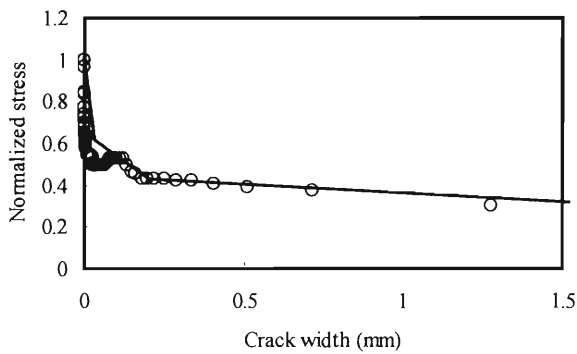
Fig. 11 の太線は平均曲線であり、また、○印は多直線近似法解析の結果である。多直線近似法解析により得られた引張軟化曲線を Fig. 12 に示す。さらに、この引張軟化曲線の結果を 3 次元非線形有限要素解析に導入するため、Fig. 13 に示す 3 直線でモデル化した。なお、Fig. 12 の実線がこの 3 直線モデルである。

3.3 解析精度

実験床版と解析の荷重-たわみ曲線の一例を Fig. 14 に示す。また、最大荷重を Table 2 に示す。ただし、繊維混



(a) Fiber volume fraction of 0.63%



(b) Fiber volume fraction of 0.91%

Fig. 12 Tension softening curves determined by multi-linear approximation analysis

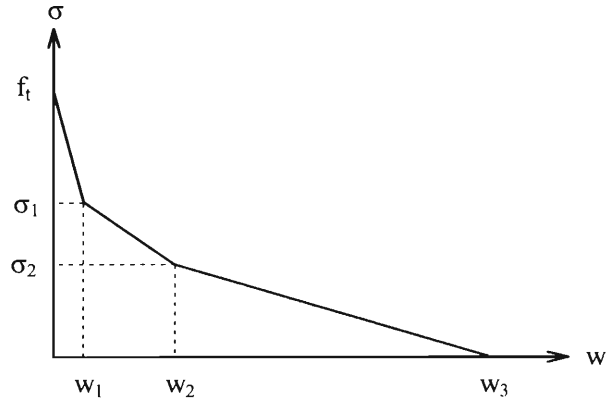


Fig. 13 Tension softening model

入率 0.72%の試験体については、曲げ試験におけるデータ収録に問題があったことから、多直線近似法解析による引張軟化曲線を得ることができなかった。そのため、今回は比較対象から除外した。解析における最大荷重時のたわみは実験値より大きくなっている。また、最大荷重はいずれの床版においても解析値が実験値よりも大きい結果となっている。床版厚 100 mm の試験体の最大荷重は比較的よい一致が見られ、実験値との差は 11%以内となっている。一方、床版厚の増大に伴い、解析値と実験値との差が大きくなる傾向にある。2.3 に示した既往の実験床版に比べ、著者らの実験床版は厚さが 180 mm と最も大きい。耐力力式による算定値と実験値との比較結果においても解析結

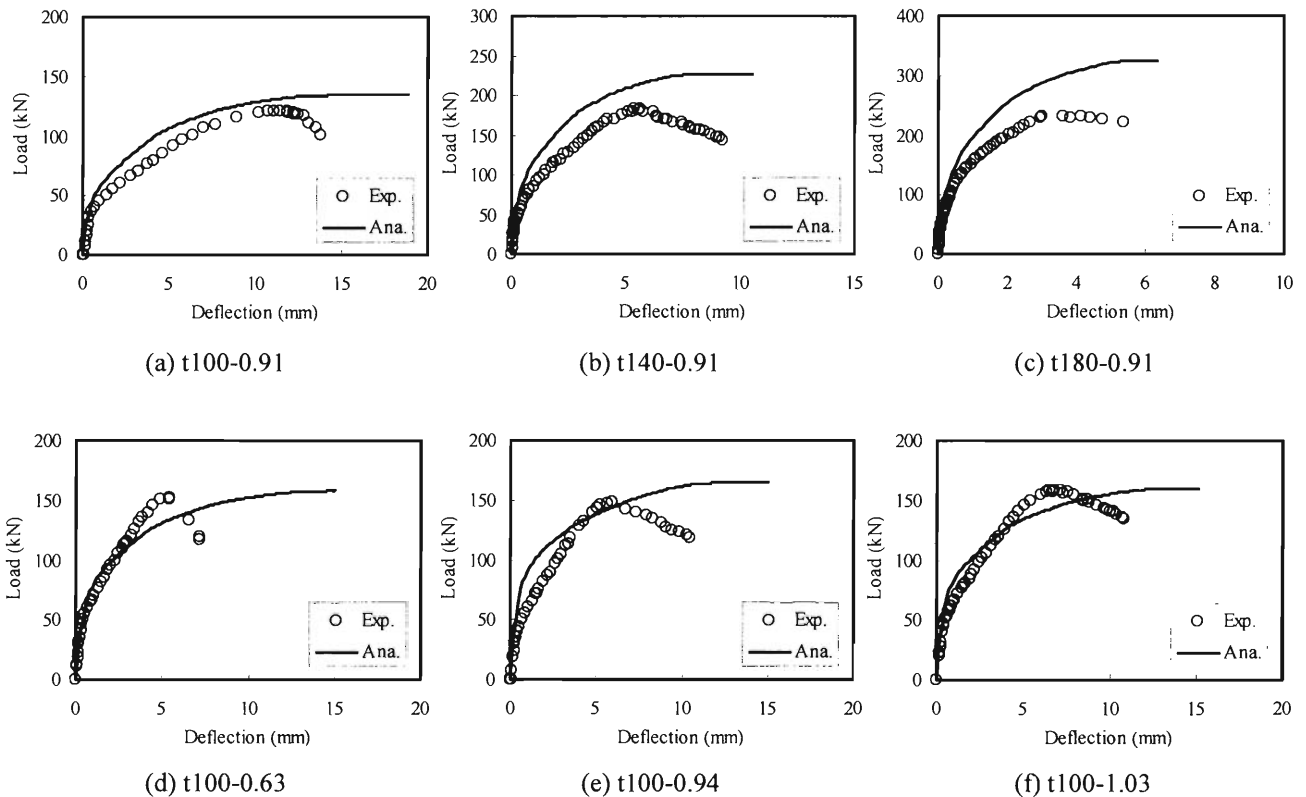


Fig. 14 Load and deflection curves of SFRC slabs with FE analytical results

Table 2 Results of ultimate load

Slabs	Maximum load (kN)		Exp. / Ana.
	Experiment	Analysis	
t100-0.67	137.5	138.2	0.99
t140-0.67	210.2	234.7	0.90
t180-0.67	297.6	338.0	0.88
t100-0.91	120.8	134.5	0.90
t140-0.91	183.1	227.3	0.81
t180-0.91	231.2	325.5	0.71
t100-0.63	152.3	157.9	0.96
t100-0.94	147.9	165.4	0.89
t100-1.03	158.5	160.3	0.99

果と同様に、床版厚の増大に伴う実験値との差が大きくなる傾向にある。これについては、今後も実験データを蓄積し、更なる検証が必要であるが、床版厚 100 mm の解析ではほぼ満足できる解析精度を得ている。よって、本解析モデルを用いた SFRC 床版の解析を用いて実橋寸法を有する SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力を検討することにした。

4 実橋床版解析

4.1 解析モデル

上述した解析手法により実橋寸法の SFRC 床版（正方形版）の解析を行った。解析ケースは Table 3 に示す通りの 18 ケースである。床版支間長は 1.25~3.00 m までの範囲であり、床版厚は道路橋示方書[19]の最小床版厚式（単純版）および交通量係数（1.20）から算出した値とした。よって、床版厚は実験床版を大きく越えた 190~280 mm の範囲も対象となった。すべての解析ケースにおいて、Table 1 に示した繊維混入率 0.63%、0.91%および 1.03%の材料特性をそれぞれの床版に適用した。なお、支持条件は 4 辺単純支持、載荷板寸法は道路橋示方書[19]と同様の 200×500

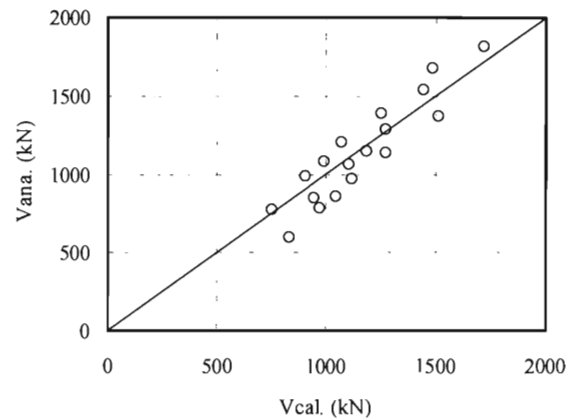


Fig. 15 Comparison between FE analytical values and predicted results

mm とした。ただし、ここでは Table 3 に示したように、主鉄筋および配力鉄筋は引張側のみに配置し、平均鉄筋比はいずれも 1.2% の一定とした。また、主鉄筋中心までのかぶり厚は 40 mm とした。

4.2 耐荷力の比較

すべての解析ケースの最大荷重と式(1)~(8)より算出した押抜きせん断耐荷力を Table 3 および Fig. 15 に示す。Fig. 15 から、いくらかのばらつきは見られるものの、18 ケースすべてにおける解析値に対する算定値の比の平均は 1.046、標準偏差は 0.143 であった。これらの値は 2.3 で述べた実験値に対する算定精度に近く、既往の研究[15, 16]で提案した SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式は概ね実橋寸法の SFRC 床版にまで適用できる可能性を示すことができたといえる。ただし、今後も継続して実験データを

Table 3 FE analytical SFRC slabs and results of ultimate load

Slabs	Slab span (m)	Slab thickness (mm)	Main Reinf. (mm)	Dist. Reinf. (mm)	Fiber volume fraction (%)	Maximum load (kN)		Cal. / Ana.
						Calculation	Analysis	
t190-0.63	1.25	190	D19ctc150	D19ctc180	0.63	753	773	0.97
t210-0.63	1.50	210	D19ctc140	D19ctc160		908	987	0.92
t220-0.63	1.75	220	D19ctc130	D19ctc150		991	1081	0.92
t230-0.63	2.00	230	D19ctc125	D19ctc140		1076	1199	0.90
t250-0.63	2.50	250	D19ctc115	D19ctc125		1251	1382	0.91
t280-0.63	3.00	280	D19ctc100	D19ctc110		1488	1677	0.89
t190-0.91	1.25	190	D19ctc150	D19ctc180	0.91	833	594	1.40
t210-0.91	1.50	210	D19ctc140	D19ctc160		973	786	1.24
t220-0.91	1.75	220	D19ctc130	D19ctc150		1045	858	1.22
t230-0.91	2.00	230	D19ctc125	D19ctc140		1119	971	1.15
t250-0.91	2.50	250	D19ctc115	D19ctc125		1272	1134	1.12
t280-0.91	3.00	280	D19ctc100	D19ctc110		1513	1363	1.11
t190-1.03	1.25	190	D19ctc150	D19ctc180	1.03	947	842	1.12
t210-1.03	1.50	210	D19ctc140	D19ctc160		1106	1057	1.05
t220-1.03	1.75	220	D19ctc130	D19ctc150		1188	1148	1.03
t230-1.03	2.00	230	D19ctc125	D19ctc140		1272	1281	0.99
t250-1.03	2.50	250	D19ctc115	D19ctc125		1446	1534	0.94
t280-1.03	3.00	280	D19ctc100	D19ctc110		1720	1814	0.95

蓄積するとともに、算定式の信頼性を検証していく必要があることを付記しておく。

5 まとめ

本研究では、著者らが提案した鋼繊維補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力式を紹介し、実橋 SFRC 床版への耐荷力式の適用性について 3 次元非線形有限要素解析結果との比較から検証した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 土木学会コンクリート標準示方書式を基に、繊維の引抜き強度とファイバーファクターにより修正した照査断面周長を考慮した SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式と実験結果との比較から、その算定精度を示した。今後は、算定精度のばらつきをさらに低減できるように算定式の改良に取り組む必要がある。
- (2) 3 次元非線形有限要素解析を実施し、実験結果との比較から SFRC 床版の押抜きせん断挙動を検証した。解析結果における最大荷重は実験結果よりも大きくなる傾向にあるが、床版厚が 100 mm と比較的薄い実験床版に対しては 11%以内の差で推定できた。しかし、床版厚が増大するに伴い、解析結果と実験結果との差が大きくなった。これに関しては、床版中の繊維の分散性を確認する必要がある、今後の課題である。
- (3) 実橋寸法の SFRC 床版をモデルに 3 次元非線形有限要素解析を実施し、算定式との比較を行った。その結果、両者は概ねよい一致を示したことから、実験床版での寸法を超える SFRC 床版に対しても算定式が適用できる可能性を示唆することができた。ただし、今後も算定式の信頼性を検証していく必要がある。

謝辞

本研究成果の一部は、平成 21 年度近畿大学理工学部教員研究充実費による研究助成によるものであります。また、本研究を行うにあたり、複合構造学研究室の学生達には実験の実施に協力して頂き、さらに、(株)計算力学研究センターの三輪氏には解析の実施において多数のアドバイスを頂戴しました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) R.N. Swamy and S.A.R. Ali, Punching shear behavior of reinforced slab-column connections made with steel fiber concrete, *ACI Journal*, **79** (1982), 392-406.
- 2) 平澤征夫, 伊藤和幸, 高木克則, 鋼繊維補強鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断強度, 土木学会第 37 回年次学術講演会概要集, **V-124** (1982), 247-248.
- 3) R. Narayanan and I.Y.S Darwish, Punching shear test on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs, *Magazine of Concrete Research*, **39-138** (1987), 42-50.
- 4) S.D.B Alexander and S.H. Simonds, Punching shear tests of concrete slab-column joints containing fiber reinforcement, *ACI Structural Journal*, **89-4** (1992), 425-432.
- 5) K.H. Tan and P. Paramasivam, Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete slabs, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **6-2** (1994), 240-253.
- 6) A.M. Shaaban and H. Gesund, Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete flat plates, *ACI Structural Journal*, **91-3** (1994), 40-414.
- 7) M.H. Harajli, D. Maalouf, and H. Khatib, Effect of fibers on the punching shear strength slab-column connections, *Cement & Concrete Composites*, **17** (1995), 161-170.
- 8) M. di Prisco and R. Felocetti, Some results on punching shear in plain and fibre-reinforced micro-concrete slabs, *Magazine of Concrete Research*, **49-180** (1997), 201-219.
- 9) 若林 学, 丸山武彦, 鋼繊維補強による RC 床版の押抜きせん断耐力に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, **V-131** (2002), 261-262.
- 10) D.D. Theodorakopoulos and R.N. Swamy, A design method for punching shear strength of steel fiber reinforced concrete slabs, *Innovations in Fiber-Reinforced Concrete for Value*, ACI SP-216 (2003), 181-202.
- 11) M.Y. Cheng and G.J. Parra-Montesions, Evaluation of steel fiber reinforcement for punching shear resistance in slab-column connections -Part I: Monotonically increased load, *ACI Structural Journal*, **107-1** (2010), 101-109.
- 12) R. Narayanan and A.S. Kareem-Palamjian, Effect of fibre addition on concrete strengths, *Indian Concrete Journal*, **58-4** (1984), 100-103.
- 13) 土木学会, 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案), コンクリートライブラリー97, (1999).
- 14) 土木学会, コンクリート標準示方書 [設計編] 2007 静定, (2008).
- 15) H. Higashiyama, Akari Ota, and Mutsumi Mizukoshi, Design equation for punching shear capacity of SFRC slabs, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **5-1** (2011), 35-42.
- 16) 東山浩士, 往田有果理, 鋼繊維補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力式の提案と比較, 第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, (2012), 105-110.
- 17) Cervenka Consulting, ATENA computer Program for nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures, Program Documentation, (2008).
- 18) 日本コンクリート工学会, 切欠きはりを有いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI 基準 JCI-S-001-2003, (2003).
- 19) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 (II 鋼橋編), (2002).