

繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力

Punching Shear Capacity of RC Slabs Using Fiber-Reinforced Lightweight Concrete

東山浩士*, 水越睦視**, 松井繁之***, 青木真材****

Hiroshi Higashiyama, Mutsumi Mizukoshi, Shigeyuki Matsui, Masaki Aoki

- * 博(工) 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)
 ** 博(工) 高松工業高等専門学校准教授 建設環境工学科(〒761-8058 高松市勅使町355番地)
 *** 工博 大阪工業大学教授 八幡工学実験場構造実験センター(〒614-8289 八幡市美濃山一之谷4番地)
 **** (株)中研コンサルタンツ 関西支店技術部(〒551-0021 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

The purpose of this study is to investigate the predicting equation for the punching shear capacity of RC slabs using fiber-reinforced lightweight concrete with steel or polypropylene fibers. The punching shear capacity of RC slabs with fibers increases and the structural behavior is improved by mixing fibers. Establishing the predicting equation, the shear resistance of fiber-reinforced concrete in the tension zone was defined with the post-cracking tensile strength. Furthermore, the depth of neutral axis and the size effect of RC slabs using fiber-reinforced concrete were considered including the test results in the literatures. In the present study, for convenience in calculation, the post-cracking tensile strength and the size effect were consequently adopted into the existing equation and the proposed equation was verified by comparing with the existing test results.

Key Words: fiber reinforcement, lightweight concrete, RC slab, punching shear capacity

キーワード: 繊維補強, 軽量コンクリート, RC 床版, 押抜きせん断耐荷力

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の大型化に伴う自重低減, 耐震性向上, 基礎構造物への負荷低減などを目的とした軽量コンクリートの適用が増加しつつある. 鋼道路橋の死荷重に占める割合が比較的大きな RC 床版に軽量コンクリートを適用することは, 耐震性向上や既設 RC 床版の打替えにおける経済性の観点から有利であるといえる.

しかしながら, 軽量コンクリートは, その破壊面において粗骨材の割裂割れを伴うため, 一般に, 普通コンクリートに比べて引張強度やせん断強度が低下する. そのため, 軽量コンクリートを適用した RC はりのせん断耐力に関する研究では, 既往のせん断耐力算定式に低減係数を乗じた評価手法が提案されている¹⁾. また, 軽量コンクリートを RC 床版に適用する場合においても同様に, 押抜きせん断耐荷力が低下することから, 著者らは, 既往の押抜きせん断耐荷力算定式に対する低減係数を提案している²⁾.

一方, RC 床版の押抜きせん断破壊形式は, 破壊の兆候がほとんどなく, 脆性的な破壊を呈する. これは, 軽量コンクリートを適用した場合においても同様である. このことから, 強度の増大, じん性の改善を目的に, 種々

の短繊維を混入したコンクリートの適用が検討されている³⁾⁻¹⁰⁾. しかしながら, 繊維補強コンクリート(普通コンクリート, あるいは, 軽量コンクリート)を用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定に関して, 繊維補強コンクリートの破壊力学特性や繊維補強コンクリートの引張抵抗を考慮した算定式の検討は少ない⁷⁾⁻¹⁰⁾.

そこで本研究では, 鋼繊維, あるいは, ポリプロピレン繊維を混入した軽量コンクリートの RC 床版の押抜きせん断耐荷力実験¹¹⁾を行い, さらに, それら繊維補強軽量コンクリートの強度特性, ならびに引張軟化特性に関する材料試験を行った. そして, 繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価手法を検討するにあたり, 文献²⁾にて提案した軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式を基に, 押抜きせん断耐荷力に及ぼす繊維の補強効果として, ポストクラック強度を取り入れた. ここで, 既往の文献では, ひび割れ発生以降の繊維が負担する引張強度, あるいは, 応力は, 「残存引張強度」⁸⁾, 「終局引張強度」¹⁰⁾, 「折曲り点応力」⁷⁾, 「ポストクラック強度」¹²⁾などと称されている. 本研究では, 繊維が負担する引張応力のうち, 耐荷力算定に用いる引張応力を「ポストクラック強度」と呼ぶことにする.

また、既往の繊維補強普通コンクリートおよび繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の実験データ⁵⁾⁻⁷⁾を加えた算定式の評価を行い、種々のコンクリートおよび繊維を適用した場合に対する汎用性のある算定式を提案することを目的とした。

2. 既往の押抜きせん断耐荷力算定式

2.1 普通コンクリート RC 床版

本研究では、普通コンクリートを用いた RC 床版（普通 RC 床版）の押抜きせん断耐荷力算定式¹³⁾（図 - 1）として提案されている次式を基に検討を進めていくことにする。

$$V_c = f_{cv} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + f_t \{2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m\} \quad (1)$$

$$f_t = 0.269 f_c'^{2/3} \quad (2)$$

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

ここに、 a, b ：載荷板の主鉄筋，配力鉄筋方向の辺長 (mm)， x_m, x_d ：主鉄筋，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時の中立軸深さ (mm)， d_m, d_d ：引張側主鉄筋，配力鉄筋の有効高さ (mm)， C_m, C_d ：引張側主鉄筋，配力鉄筋のかぶり深さ (mm)， f_c' ， f_{cv} ， f_t ：コンクリートの圧縮強度，せん断強度，引張強度 (N/mm²) である。

2.2 軽量コンクリート RC 床版

軽量コンクリートを用いた RC 床版（軽量 RC 床版）の押抜きせん断耐荷力について、既往の研究²⁾にて、実験値と式(1)～式(3)による算定値との比較を行った結果（ただし、式(1)の中立軸深さの算定においては軽量コンクリートのヤング係数を用いた。），軽量コンクリートを用いた RC はりのせん断耐力評価¹⁾と同様に、算定値は実験値を過大に評価することが明らかとなった。その結果を踏まえ、低減係数として、次式の近似式を提案した。

$$\alpha = 0.28 + 0.72 \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{2.95} \quad (4)$$

ここに、 ρ は軽量コンクリートの単位容積質量 (kg/m³) である。

この低減係数を式(1)に乗じた次式により、軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力を図 - 2 のように概ね推定できた。

$$V_u = \alpha V_c \quad (5)$$

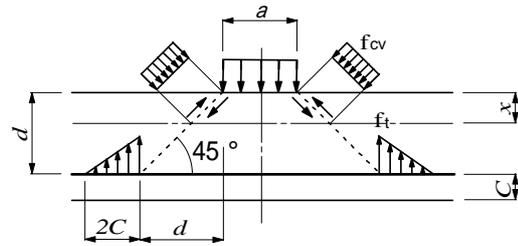


図 - 1 RC 床版の押抜きせん断破壊モデル

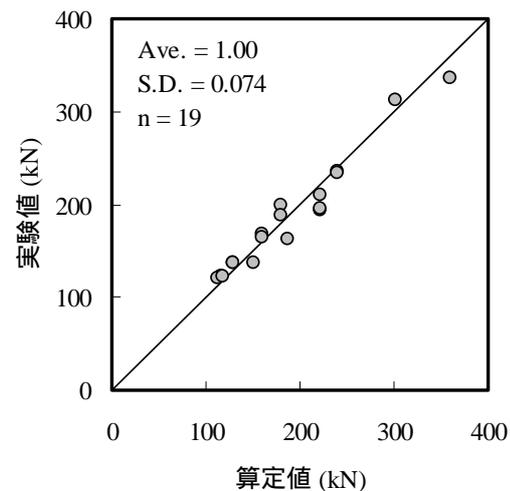
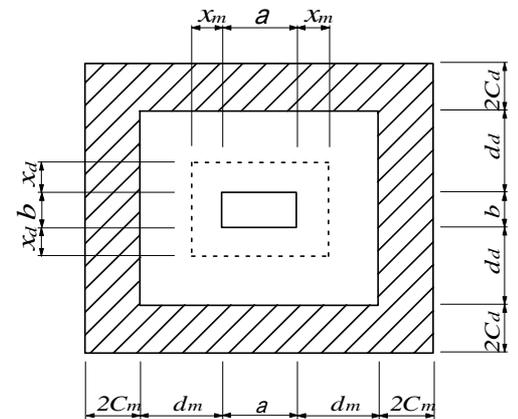


図 - 2 軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定結果

3 繊維補強軽量コンクリートの材料特性と押抜きせん断耐荷力実験

3.1 使用材料とコンクリートの配合

(1) コンクリート材料

使用した材料の基本物性値を表 - 1 に示す。細骨材に野洲川産川砂，粗骨材に膨張性頁岩を原材料とする非造粒型人工軽量骨材を使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

(2) 短繊維

使用した短繊維は、鋼繊維およびポリプロピレン繊維である。それぞれの基本物性値を表 - 1 に示す。鋼繊維

表 - 1 使用材料の基本物性値

使用材料	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
細骨材	野洲川産川砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 1.39%
粗骨材	非造粒型膨張性頁岩, 表乾密度: 1.65g/cm ³ , 吸水率: 28.0%
鋼繊維	インデント型カットワイヤー, 寸法: φ0.7 × 50mm, 密度: 7.85g/cm ³ 引張強度: 1239N/mm ² , ヤング係数: 206kN/mm ²
ポリプロピレン繊維	インデント型, 寸法: φ0.56 × 30mm, 密度: 0.91g/cm ³ 引張強度: 345N/mm ² , ヤング係数: 3.7kN/mm ²

表 - 2 繊維補強軽量コンクリートの配合

種類	W/C (%)	V _f (%)	単位質量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
SFLC	48	0.75	180	375	948	470	2.25
PPFLC	48	2.0	197	410	1020	378	4.10

Ad: 高性能AE減水剤

はインデント型カットワイヤー (φ0.7 × 50mm), ポリプロピレン繊維はインデント型 (φ0.56 × 30mm) を使用した。なお, ポリプロピレン繊維は長方形断面を有しているため, 繊維の直径は等価直径で表してある。繊維混入率 (V_f) は, 鋼繊維を 0.75%, ポリプロピレン繊維を 2.0% とした。

(3) コンクリートの配合

RC 床版に用いた繊維補強軽量コンクリートの配合を表 - 2 に示す。空気量は 5%, スランプはプレーンコンクリートで 18cm, 繊維補強コンクリートで 10cm とした。

3.2 強度特性

RC 床版の押抜きせん断耐力実験を行うにあたり, 別途, 鋼繊維補強軽量コンクリートおよびポリプロピレン繊維補強軽量コンクリートの強度特性を把握することを目的に材料試験を行った。以下にその結果を述べる。

(1) 試験体

鋼繊維補強軽量コンクリート (SFLC) の圧縮試験および割裂引張試験には, φ150 × 300mm の円柱試験体を, また, 直接 2 面せん断試験には, 150 × 150 × 530mm の角柱試験体を用いた。ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリート (PPFLC) の圧縮試験および割裂引張試験には, φ100 × 200mm の円柱試験体を, また, 直接 2 面せん断試験には, 100 × 100 × 400mm の角柱試験体を用いた。

(2) 強度特性

割裂引張強度と圧縮強度の関係を図 - 3 に, また, せん断強度と圧縮強度の関係を図 - 4 に示す。それぞれの図中には, 軽量コンクリート (LC) の試験結果および普通コンクリート (NC) に対する強度曲線 (式(2), 式(3)) も示してある。

普通コンクリートの割裂引張強度に比べて, SFLC はほぼ同等であるが, PPFLC は圧縮強度が大きくなるに伴って低下する傾向が見られ, 割裂引張強度は LC とほとんど変わらないことが分かる。

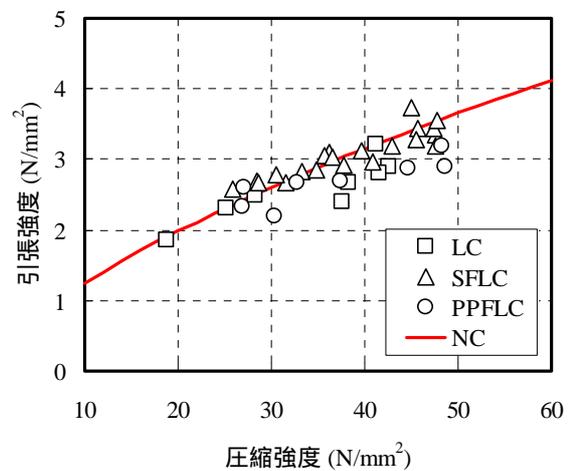


図 - 3 割裂引張強度と圧縮強度の関係

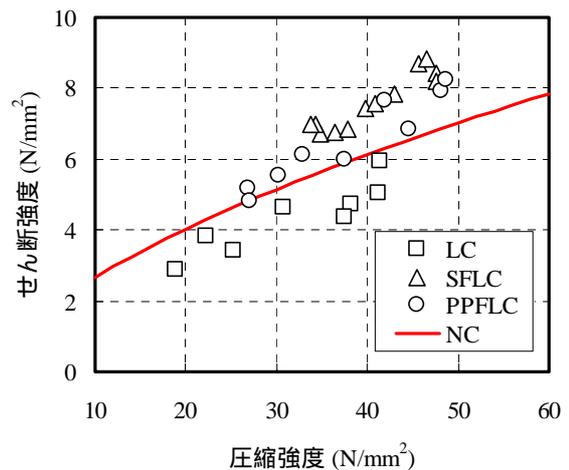


図 - 4 せん断強度と圧縮強度の関係

次に, せん断強度については, SFLC, PPFLC とともに普通コンクリートを上回ることが分かる。しかし, LC のせん断強度の低下は大きいといえる。

表 - 3 試験体一覧

試験体	支間長 (mm)	床版厚 (mm)	配筋 (mm)		有効高さ (mm)		繊維の種類	V_f (%)	V_{exp} (kN)			
			上側主鉄筋 下側主鉄筋	上側配力鉄筋 下側配力鉄筋	主鉄筋 d_m	配力鉄筋 d_d						
LC1	1000	100	D10@120 D10@240	D10@120 D10@240	80	70.5	無	-	123.0			
SFLC1									123.0			
PPFLC1									158.0			
									172.3			
LC2									150	無	-	162.3
												144.7
SFLC2	193.9											
PPFLC2	110	100.5	無	-	195.0							
					279.2							
SFLC2	110	100.5	鋼	0.75	287.3							
					247.7							
PPFLC2	252.3											

3.3 引張軟化特性

(1) 試験概要

後述するポストクラック強度を求めるために、ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリート ($V_f=2.0\%$) の引張軟化試験¹⁴⁾を行った。試験は、JCI 規準¹⁵⁾に従い、切欠き (深さ 30mm×幅 2mm) を有する試験体を用いた 3 点曲げ載荷試験を行った。載荷速度は、載荷試験機クロスヘッドの変位が 0.05mm/min となるよう制御した。また、計測項目は、荷重、載荷点直下の変位、切欠き肩口開口変位 (CMOD) とした。

(2) 引張軟化曲線

荷重 - CMOD 関係の一例を図 - 5 に示す。図中には、多直線近似法¹⁶⁾により求めた解析結果も示してある。PPFLC は曲げひび割れの発生によりピーク荷重の約 60%まで荷重が低下した後、荷重は徐々に増加し、ピーク荷重を上回るまでに回復する挙動を呈した。この荷重 - CMOD 関係を用いて、多直線近似法により引張軟化曲線を推定した結果と多直線で表したモデルを図 - 6 に示す。この結果から、繊維混入率 2.0% の場合、引張軟化曲線の第 2 折曲がり点応力は引張強度 (ここでは、割裂引張強度とする) の 20%程度であり、その後、引張応力は、徐々にではあるが、引張強度の 30%程度にまで増加した。

ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリートの引張軟化曲線は多直線でモデル化できる。このモデル化では、第 1 折曲がり点応力を引張強度の 1/3 点 (1/3 モデル¹⁷⁾) とし、第 2 折曲がり点応力は、軽量プレーンコンクリートの引張応力がゼロとなるひび割れ幅に一致する時の応力とした。また、第 2 折曲り点応力以降の引張応力の増大が小さいことから、本研究では、ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリートのポストクラック強度を第 2 折曲り点応力とした。

3.4 押抜きせん断耐力実験

(1) 試験体

繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断試験体一覧を表 - 3 に示す。試験体は結果のばら

表 - 4 材料試験結果

試験体	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	単位容積質量 ρ (kg/m ³)
LC1	41.3	20.6	1810
LC2	38.7	19.5	1840
SFLC1	46.5	21.5	1960
SFLC2	44.5	21.6	1940
PPFLC1	42.0	21.1	1910
PPFLC2	38.3	19.3	1950

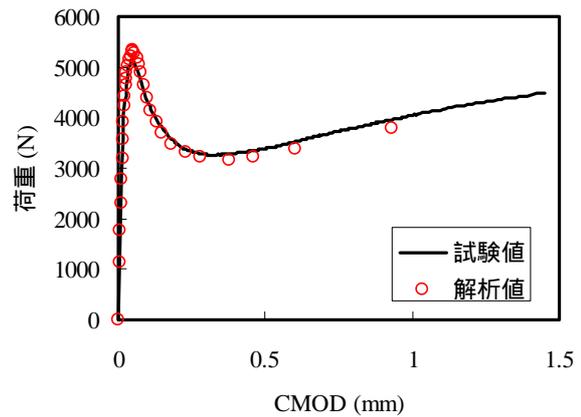


図 - 5 PPFLC の荷重 - CMOD 関係

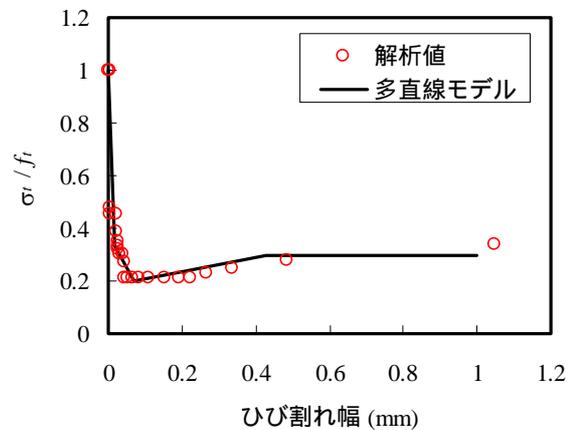


図 - 6 PPFLC の引張軟化曲線

表 - 5 鋼繊維補強コンクリート

f_c' (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
30.0	3.0	28.0	200

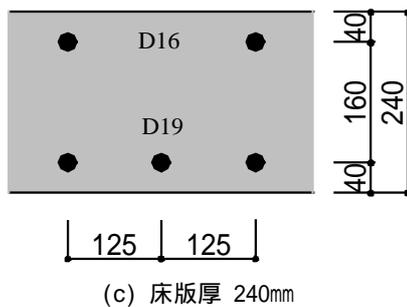
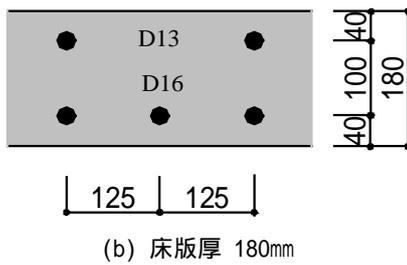
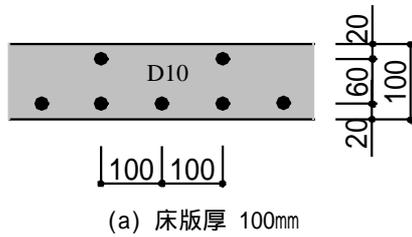


図 - 7 RC 床版断面 (主鉄筋)

つきを考慮して各 2 体とした。それぞれの試験体に対する材料試験結果を表 - 4 に示す。

(2) 試験結果

押抜きせん断試験結果を表 - 3 に示す。表中には、軽量コンクリートを用いた同じ配筋を有する RC 床版の結果も示してある。その結果、繊維無混入の試験体に比べて、鋼繊維を 0.75% 混入した試験体は、床版厚 100mm では 34%、床版厚 150mm では 46% の耐荷力増加が見られた。また、ポリプロピレン繊維を 2.0% 混入した試験体は、それぞれ 25%、29% の耐荷力増加が見られた。

4. 繊維補強の影響

繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力を評価する上で、繊維の架橋効果による引張力の分担が中立軸深さに及ぼす影響、ならびにポストクラック強度とその分布の影響が大きいと考えられる。以下では、図 - 7 に示す 3 種類の複鉄筋断面について、表 - 5 に示す条件の鋼繊維補強コンクリート (普通コンクリ

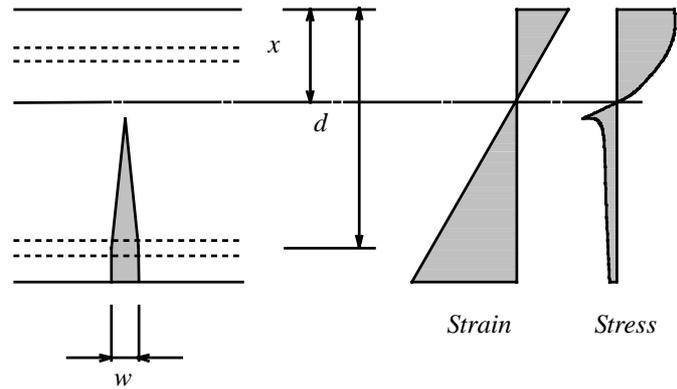


図 - 8 ひび割れを有する繊維補強コンクリート

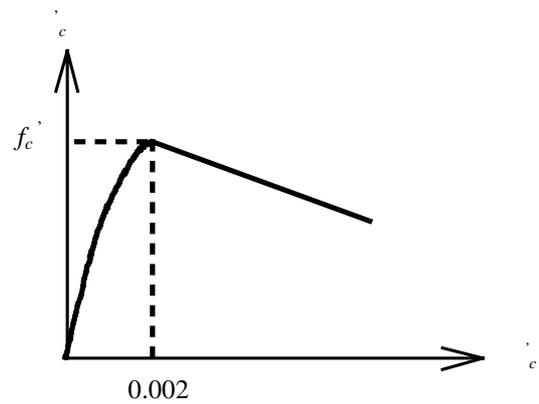


図 - 9 圧縮応力 - ひずみ曲線

ート) を適用した場合の両者の影響について検討した結果を述べる。

4.1 中立軸深さの変化

ひび割れを有する繊維補強コンクリート断面のひずみ分布および応力分布は、平面保持の仮定において図 - 8 のように表される。すなわち、ひび割れ面では、繊維の架橋効果により繊維が引張力を分担するため、繊維補強した RC 断面の中立軸深さは、通常の RC 断面の中立軸深さよりも大きくなる。ゆえに、以下に示す圧縮応力 - ひずみ曲線および引張軟化曲線によりその影響を調べることにした。

(1) 圧縮応力 - ひずみ曲線

圧縮応力 - ひずみ曲線は、図 - 9 に示すモデル¹⁸⁾を使用した。すなわち、圧縮応力 - ひずみ曲線は、圧縮強度に至るまでの挙動に対して鋼繊維の影響は少ないとして、普通コンクリートの応力 - ひずみ曲線と同様の次式を用いることにした。

$$\sigma_c' = f_c' \cdot \frac{\epsilon_c'}{0.002} \cdot \left(2 - \frac{\epsilon_c'}{0.002} \right) \quad (6)$$

ここに、 f_c' は圧縮強度、 ϵ_c' は圧縮ひずみである。今回の計算においては、圧縮強度以降までは考慮しないが、設計指針 (案)¹⁸⁾ では、圧縮強度以降の応力 - ひ

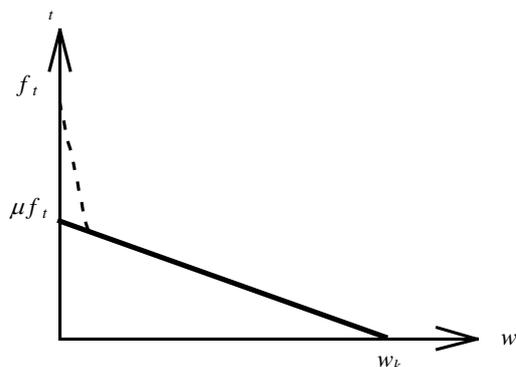


図 - 10 引張軟化曲線

ずみ曲線を直線的に低下させている。

(2) 引張軟化曲線

引張軟化曲線は、図 - 10 に示すモデル¹⁸⁾を使用した。鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線は、ひび割れ発生と同時に急激な応力低下が生じ、その後、ひび割れ開口幅の増加に伴って緩やかに低下する次式がモデル化されている。ただし、この引張軟化曲線の評価に用いられた鋼繊維は、寸法φ0.6×30mm のインデントタイプである。

$$\sigma_t(w) = \mu \cdot f_t \cdot \left(1 - \frac{w}{w_k}\right) \quad (7)$$

$$w_k = \mu \cdot f_t / \lambda \quad (8)$$

$$\lambda = 0.06 f_c'^{2/3} - 0.32 \quad (9)$$

ここに、μは残留強度率 (= 0.55)、w_kは限界ひび割れ幅である。

(3) 中立軸深さ

図 - 7 に示した 3 種類の断面に対して、引張鉄筋ひずみを 0.002 まで増加させたときの圧縮力と引張力の釣り合いから、繊維補強コンクリートの中立軸深さを求めた。ここで、引張鉄筋位置におけるひび割れ幅は、鉄筋ひずみと、コンクリート圧縮応力の合力作用位置から鉄筋図心位置までの距離により、Casanova ら¹⁹⁾が簡易的に提案している次式を用いて算出した。

$$w = \varepsilon_s \cdot d / 1.15 \quad (10)$$

ここに、w は引張鉄筋位置におけるひび割れ幅、ε_s は引張鉄筋ひずみ、d は有効高さである。

引張側コンクリートを無視した時の RC 断面の中立軸深さと比較した結果の一例として、床版厚 180mm の結果を図 - 11 に示す。これより、繊維の引張力を考慮した場合の中立軸深さは、引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さに対して、いずれのケースも 16% 程度大きくなることが分かった。また、中立軸深さが押抜きせん断耐荷力に及ぼす影響を調べるため、式(1)を用いて算

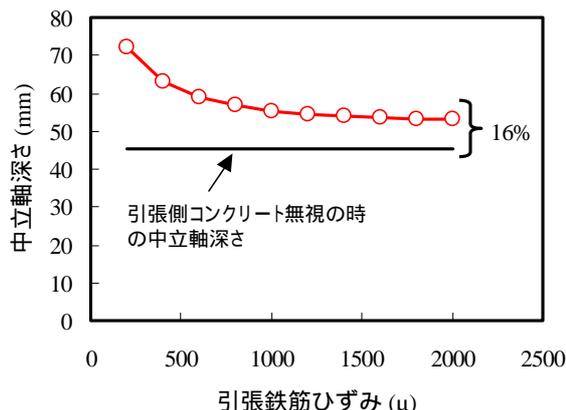


図 - 11 中立軸深さの変化

出した結果、押抜きせん断耐荷力が約 14% 増大した。

4.2 ポストクラック強度

ひび割れ発生後の挙動は、引張軟化曲線によって表現されるが、繊維の種類・形状、繊維混入率、アスペクト比などによってその挙動が異なる。また、繊維が負担する引張応力は、ひび割れ開口幅の増加に伴って変化するため、それが押抜きせん断耐荷力に影響を及ぼすものと考えられる。

既往の文献を参考にすると、ポストクラック強度は、主に次のような方法によって求められている。繊維とマトリックス界面の付着せん断強度から求める方法(式(11))^{20), 21)}、引張軟化曲線から限界ひび割れ幅に至るまでの平均引張強度から求める方法(式(12))^{19), 22)}、引張軟化曲線の折曲がり点から求める方法^{7), 8)}などである。

$$f_{pc} = A\beta\tau V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (11)$$

ここに、A は繊維の配向と長さに関する効果係数 (= 0.41)、βは繊維の種類およびコンクリートの種類に関する係数、τは繊維とマトリックス界面の付着せん断強度(鋼繊維の場合^{21), 23)}、4.15N/mm²)、V_fは繊維混入率、l_f/d_fはアスペクト比である。

$$f_{pc} = \frac{1}{w_k} \int_0^{w_k} \sigma_t(w) dw \quad (12)$$

ここに、σ_t(w)はひび割れ幅 w のときの引張応力、w_kは限界ひび割れ幅である。

既往の文献^{20), 21)}から、鋼繊維補強コンクリートに対しては、式(11)が用いられることが多い。ただし、繊維とマトリックス界面の付着せん断強度τはマトリックス強度に伴って変化するという結果²⁴⁾も得られている。これについては、データが未だ十分蓄積されていないため、今後検討することにした。また、合成繊維を用いた場合は、引張軟化曲線の折曲がり点応力がポストクラック強度として採用されることが多いようである。式(12)に

表 - 6 押抜きせん断耐荷力算定に用いた試験体一覧

著者	試験体	コンクリート	繊維	床版厚 (mm)	平均有効高さ (mm)	引張側鉄筋 平均鉄筋比 (%)	f'_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	V_f (%)
本研究	SFLC1	軽量	鋼	100	75	0.79	46.5	21.5	0.75
	150			105	0.28	44.5	21.6	0.75	
	PPFLC1		ポリプロピレン	100	75	0.79	42.0	21.1	2.00
	PPFLC2			150	105	0.28	38.3	19.3	2.00
文献7)	A1-L-1	PVA		170	120	1.60	41.1	19.9	1.00
	A2-L-1			170	120	0.70	41.1	19.9	1.00
文献5)	Type2	普通	鋼	70	58	1.37	48.5	32.7*	0.50
	Type3			70	58	1.37	49.2	32.8*	1.00
	Type4			70	58	1.37	49.0	32.8*	1.50
文献6)	V1	PVA		180	140	0.95	44.5	28.9	1.00
	V2			180	140	0.95	39.7	25.1	2.00

*土木学会コンクリート標準示方書からの推定値

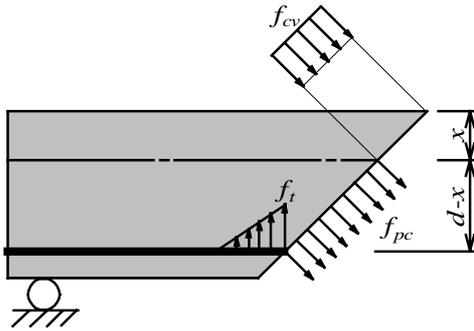


図 - 1 2 繊維補強コンクリートのせん断抵抗モデル

よるポストクラック強度は、ひび割れ面における引張応力の分布と大きさを考慮に入れたより現実的な評価ではあるが、限界ひび割れ幅や引張軟化曲線のモデル化など、実用上、難しい点がある。

そこで本研究では、押抜きせん断耐荷力算定におけるポストクラック強度として、鋼繊維については式(11)を、ポリプロピレン繊維については、伊藤ら⁷⁾、岸らの研究⁸⁾と同様に、図 - 6 に示した引張軟化曲線の折曲がり点応力を用いて検討することにした。

4.3 繊維補強コンクリートのせん断抵抗

押抜きせん断に対する繊維補強コンクリートのせん断抵抗は、図 - 1 2 に示すようなせん断ひび割れを架橋する繊維の引張力の鉛直方向成分の合計として考え、図 - 1 の押抜きせん断破壊モデルから式(13)のように表すことができる。また、既往の文献^{8)~10)}と同様に、ひび割れを架橋する繊維の引張応力は、RC 断面の引張領域において一様に分布すると仮定した。ただし、本研究では、押抜きせん断破壊時に引張鉄筋位置においてダウエル力によるかぶりコンクリートの剥離破壊を伴うモデルを適用していることから、かぶり部における繊維補強コンクリートのせん断抵抗は無視することにした。

$$V_{fr} = f_{pc} \{ 2(d_m - x_m) \cdot (b + 2d_d) + 2(d_d - x_d) \cdot (a + 2x_m) \} \quad (13)$$

ここで、 f_{pc} はポストクラック強度である。

4.4 押抜きせん断耐荷力に及ぼす繊維の影響

繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式を構築するにあたり、4.1 および 4.2 で述べた中立軸深さの変化とポストクラック強度が押抜きせん断耐荷力に及ぼす影響を検討する。すなわち、図 - 7 に示した 3 種類の複鉄筋断面について、表 - 5 に示した条件の鋼繊維補強コンクリート（普通コンクリート）を適用した場合について、中立軸深さに繊維の架橋効果を考慮したケース、中立軸深さに繊維の架橋効果を考慮しないケース、さらに、式(11)および式(13)を用いた繊維のせん断抵抗をそれぞれに加えて算出した。ただし、繊維混入率は 0.75% とした。

その結果、中立軸深さに繊維の架橋効果を考慮したケースは、中立軸深さに繊維の架橋効果を考慮しないケースに対して、押抜きせん断耐荷力は約 10% 大きくなった。ここで、繊維の架橋効果を考慮した中立軸深さや押抜きせん断耐荷力を求めようとすると、繊維補強コンクリートの引張軟化曲線、押抜きせん断破壊時の床版コンクリートの限界ひび割れ幅が必要となる。しかし、著者らが知る限りにおいて、床版コンクリートの限界ひび割れ幅は明らかになっておらず、また、押抜きせん断破壊時の応力状態を正確に表現することが困難であることから、これらの解明は今後の課題としたい。そこで本研究では、中立軸深さについては繊維の架橋効果を考慮せずに検討することにした。

5. 押抜きせん断耐荷力算定式

5.1 算定式

繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式として、式(5)にせん断ひび割れ面における繊維補強コンクリートのせん断抵抗（式(13)）を重ね合わせた次式を提案することにした。

$$V_{uf} = \alpha V_c + V_{fr} \quad (14)$$

ここで、低減係数 α を考慮しなければ、繊維補強普通

表 - 7 押抜きせん断耐荷力の算定結果

著者	試験体	実験値	式(14)による算定値					式(15)による算定値		
		V_{exp} (kN)	V_c (kN)	f_{pc} (N/mm ²)	V_{fr} (kN)	V_{uf} (kN)	V_{exp}/V_{uf}	ξ	V_{uf} (kN)	V_{exp}/V_{uf}
本研究	SFLC1	165.2	144.7	0.7	27.9	172.6	0.957	0.98	169.5	0.975
	SFLC2	283.3	263.8	0.7	48.3	312.1	0.908	0.91	283.2	1.000
	PPFLC1	153.5	130.0	0.5	22.2	152.2	1.009	0.98	149.5	1.027
	PPFLC2	250.0	246.7	0.6	44.5	291.2	0.859	0.91	264.2	0.946
文献7)	A1-L-1	383.0	323.1	1.1	80.0	407.6	0.940	0.88	357.2	1.072
	A2-L-1	315.0	269.2	1.1	90.5	364.8	0.863	0.88	319.7	0.985
文献5)	Type2	94.1	87.0	0.4	9.0	96.0	0.980	1.00	96.0	0.980
	Type3	111.5	87.7	0.9	18.0	105.7	1.055	1.00	105.7	1.055
	Type4	114.6	87.5	1.3	27.0	114.5	1.001	1.00	114.5	1.001
文献6)	V1	349.0	376.0	0.7	60.6	436.6	0.799	0.84	366.4	0.953
	V2	408.0	363.3	1.4	123.8	487.1	0.838	0.84	408.7	0.998

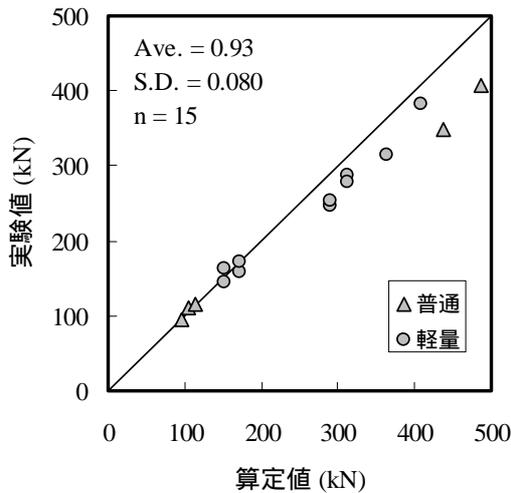


図 - 1 3 繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定結果

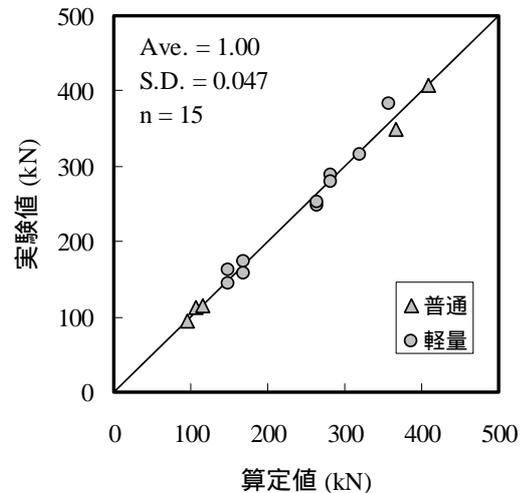


図 - 1 5 寸法効果を考慮した押抜きせん断耐荷力算定結果

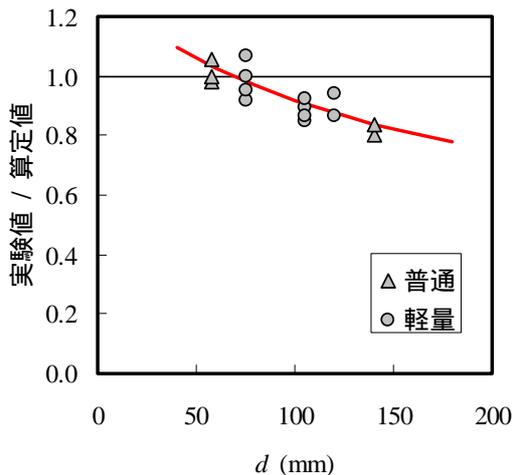


図 - 1 4 寸法効果の影響

コンクリートを用いた RC 床版に対しても適用できるものである。

5.2 寸法効果

本研究で実施した押抜きせん断実験は試験体数が限られていることから、既往の文献から計算に必要な情報が記述されていた繊維補強コンクリート（普通コンクリートおよび軽量コンクリート）を用いた RC 床版の実験結果も含めた検討を行った。計算に用いた試験体一覧を表 - 6 に示す。式(14)による算定値と実験値を表 - 7 に、また、その相関を図 - 1 3 に示す。この図から、床版厚が厚い試験体の算定値は実験値より大きく評価する傾向が見られる。そこで、この結果を基に、実験値 / 算定値の比と有効高さの関係を図 - 1 4 に示した。これより、コンクリートや繊維の種類に関わらず、有効高さが大きくなるに伴い、実験値 / 算定値の比が低下する傾向にあることが分かる。この原因として、ひび割れ面におけるポストクラック強度の分布を一様としていること、また、Narayanan ら⁹⁾の研究成果では、押抜きせん断ひび割れの角度が繊維混入率に応じて変化することが明らかにされており、このような影響が含まれると考えられる。

しかし、本研究では、押抜きせん断ひび割れの角度変化、ならびにポストクラック強度の分布による影響を検

討するまでには至っていないため、ここでは、図 - 14 の傾向を寸法効果として考慮することにより算定精度を改善することにした。すなわち、次式のように表される。

$$V_{uf} = \xi(\alpha V_c + V_{fr}) \quad (15)$$

$$\xi = 1.3 \left(1 + \frac{d}{d_0} \right)^{-1/2} \leq 1.0 \quad (16)$$

ここに、 d (mm)は平均有効高さ、 $d_0 = 100$ mm である。ただし、式(16)の適用は、今回収集した試験体の有効高さ 140mm までである。

5.3 算定結果

表 - 6 に示した試験体について、上述してきた方法により押抜きせん断耐荷力を算定した結果を表 - 7 および図 - 15 に示す。本範囲においては、コンクリートおよび繊維の種類に関わらず、繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力を概ね推定できたと考えられる。また、表 - 6 に示した文献 5) の 3 つのデータ（鋼繊維、普通コンクリート）について、Narayanan ら⁹⁾の提案式と比較した。Narayanan らの式は、主に繊維補強コンクリートの割裂引張強度と式(11)に示した繊維の付着せん断強度から得られる値を用いて構築されている。比較結果として、実験値 / 算定値の 3 体の平均値は、Narayanan らの式：0.96、本提案式：1.01 となり、同様な算定結果を得ることができた。

しかし、提案した算定方法は、限られた実験結果との比較からの判断であるため、算定方法の信頼性を評価するには至っておらず、検討すべき課題がいくつか残されている。今後、改良していきたいと考えている。

6. まとめ

本研究では、繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式を検討するに当たり、既往の研究にて実施された繊維補強普通コンクリートおよび繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断実験を基に検討を行った。本研究で得られた結果と今後の課題をまとめると以下のようである。

- (1) 普通 RC 床版の押抜きせん断耐荷力に比べて、軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力は低下するが、繊維を混入することによって押抜きせん断耐荷力を大きく改善することが可能である。また、軽量コンクリートであっても繊維を混入することによって普通 RC 床版と同等な押抜きせん断耐荷力を保有でき、軽量化を図ることができる。
- (2) 繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力は、既往の算定式に繊維の架橋効果としてポストクラック強度を考慮することによって評価できると考えられる。また、既往の研究と同様に、

繊維補強コンクリートのポストクラック強度として、鋼繊維の場合は繊維とマトリックス界面の付着せん断強度から得られる値を、ポリプロピレン繊維の場合は引張軟化曲線の折曲がり点応力を用いることによって概ね評価できた。

- (3) 実験値と算定値との比較結果から、床版厚が厚い試験体の算定値は実験値に対して過大となる傾向があり、繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価において寸法効果の影響を考慮することによって算定精度を改善することができた。
- (4) 今後の課題として、押抜きせん断破壊のモデル化における、ひび割れ面における繊維の引張応力分布、中立軸深さ、寸法効果、繊維混入率とひび割れ角度の影響について今後も検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、試験体の作製、材料提供を頂きました住友大阪セメント(株)、人工軽量骨材 (ALA) 協会、太平洋マテリアル(株)、東洋紡績(株)に感謝申し上げます。また、貴重な試験データをご教示頂きました、明星大学教授 丸山武彦先生に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 舟橋政司, 原 夏生, 横田 弘, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた RC 部材のせん断耐力評価手法, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.211-226, 2004.
- 2) 東山浩士, 水越睦視, 青木真材, 松井繁之: 破壊特性を考慮した軽量コンクリート RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価手法, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.2, pp.23-31, 2006.
- 3) 伊藤和幸, 平澤征夫, 愛知五男: 鋼繊維補強コンクリート床版の押し抜きせん断疲労強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.3, pp.397-400, 1981.
- 4) 戸川一夫, 中本純次: 鋼繊維膨張コンクリート床版の力学的特性, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.8, pp.433-436, 1986.
- 5) 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, pp.261-262, 2002.
- 6) 三上 浩, 岸 徳光, 田口史雄, 栗橋祐介: ビニロン短繊維を混入した四辺支持 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1555-1560, 2004.
- 7) 伊藤 始, 岩波光保, 横田 弘: 軽量コンクリートスラブの押抜きせん断特性に及ぼす PVA 短繊維の影響, 構造工学論文集, Vo.51A, pp.1321-1331, 2005.
- 8) 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一, 栗橋祐介: PVA 短繊維混入による軽量コンクリート製 RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28,

- No.2 , pp.1381-1386 , 2006.
- 9) Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S.: Punching Shear Tests on Steel-fiber-reinforced Micro-concrete Slabs, Magazine of Concrete Research, Vol.39, No.138, pp.42-50, 1987.
- 10)Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N.: A Design Method for Punching Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs, Innovations in Fiber-Reinforced Concrete for Values, ACI SP-216, pp.181-202, 2003.
- 11)東山浩士,水越睦視,松井繁之,小田憲司:軽量コンクリートを用いたRC床版の押抜きせん断耐荷力の評価とその実用性に関する研究,コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.45-54, 2005.
- 12)Naaman, A.E., Moavenzadeh, F., and McGarry, F.J.: Probabilistic Analysis of Fiber-Reinforced Concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM2, pp.397-413, 1974.
- 13)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,土木学会論文報告集,第348号, pp.133-141, 1984.
- 14)東山浩士,川島恭志,青木真材,松井繁之,水越睦視:ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリートの引張軟化特性,材料, Vol.57, No.1, pp.90-96, 2008.
- 15)橋高義典,金久保利之:JCI 規準 (JCI-S-001 ~ 003) の概要,コンクリート工学, Vol.44, No.12, pp.10-15, 2006.
- 16)栗原哲彦,安藤貴宏,国枝 稔,内田裕市,六郷恵哲:多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状,土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.
- 17)Pettersson, P.E.: Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.
- 18)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.
- 19)Casanova, P., Rossi, P., and Schaller, I.: Can Steel Fibers Replace Transverse Reinforcements in Reinforced Concrete Beams ?, ACI Materials Journal, Vol.94, No.5, pp.341-354, 1997.
- 20)Swamy, R.N., Mangat, P.S., and Rao, C.V.S.K., The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices, Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, pp.1-28, 1974.
- 21)Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S.: Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement, ACI Structural Journal, Vol.84, No.3, pp.216-227, 1987.
- 22)児玉 亘,大寺一清,二羽淳一郎:短繊維補強されたRCはりのせん断耐力に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1501-1506, 2004.
- 23)Ashour, S.A., Hasanain, G.S., and Wafa, F.F.: Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Vol.89, No.2, pp.176-184, 1992.
- 24)Khuntia, M., Stojadinovic, B., and Goel, S.C.: Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups, ACI Structural Journal, Vol.96, No.2, pp.282-289, 1999.

(2007年9月18日受付)