

論文 圧縮側補強による RC 床版のせん断強度への影響

毛 明傑^{*1}・楊 秋寧^{*2}・江上 真介^{*3}・浜田 純夫^{*4}

要旨：RC 床版の設計押抜きせん断強度は、土木学会では主として有効高さ、コンクリート強度、引張鉄筋比、さらに床版厚さなどのサイズ効果に関する要因を含めて求めている。本研究は、圧縮側鉄筋量およびコンクリートの粗骨材最大寸法が異なった RC 床版の静的押抜きせん断試験を行い、それらの RC 床版のせん断強度に対する影響を求めた。その結果、圧縮側鉄筋量を増加させることより静的押抜きせん断強度が増加した。また粗骨材最大寸法を大きくするほど、RC 床版の静的押抜きせん断強度が大きくなることを示した。

キーワード：RC 床版、静的押抜きせん断強度、圧縮側鉄筋量、粗骨材最大寸法

1. はじめに

コンクリート系床版の中で最も単純な鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と略す）は設計・施工の容易さ、経済性などのメリットがあるため、道路橋および建築物に多く採用されている。従来、多くの押抜きせん断強度に関する研究が行われてきたが、押抜きせん断強度に関するすべての要因について検討されているわけではない。本研究においては、RC 床版の静的押抜きせん断試験を通じて、圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法が押抜きせん断強度に及ぼす影響を検討した。なお、表題の圧縮側補強は、コンクリートの強度が劣化した床版の補強ではなく、新設床版設計時の補強を検討するものである。特に、圧縮側のダウエル効果に関しての研究である。

現実には負の曲げが生じる床版は圧縮側鉄筋量が多い。また、せん断強度の部材寸法は部材に対する骨材寸法の割合と論述されている¹⁾。この様なことから、本研究では圧縮側鉄筋量の増加と粗骨材最大寸法に着目し研究を行った。

既往の研究により、床版に作用するせん断力は、コンクリートのせん断強度、水平鉄筋のダ

ウエル効果、および骨材のかみ合わせ作用に分担されると考えられている²⁾。その中で、鉄筋による床版のせん断破壊に対する抵抗は、一般的に引張側の鉄筋のみの鉄筋比および降伏強度によるものである。また、床版にせん断破壊が生じる時、ひび割れ部分に位置する引張鉄筋は、ダウエル効果によってせん断に抵抗する。ダウエル効果は引張側の鉄筋だけでなく、圧縮側の鉄筋も当然関連していると考えられる。そこで、圧縮側鉄筋量の違いが床版のせん断強度に与える影響を検討することとした。

また、コンクリート中に存在する粗骨材によって、押抜きせん断による破壊面は、凹凸を有する複雑な形状となる。当然、床版厚さに比較して骨材寸法が大きければ、破壊面の凹凸は相対的に顕著となる。したがって、粗骨材最大寸法と RC 床版の断面寸法の相対的な関係も、押抜きせん断強度に影響をもたらす^{3), 4)}。しかしながら、既往の研究において粗骨材最大寸法は、RC 床版の押抜きせん断強度算定式中にパラメータとしてほとんど使われていない。そこで、RC 床版における粗骨材最大寸法の影響を検討することとした。

*1 江蘇工業学院 環境与安全工程系土木工学科講師 工博（正会員）

*2 山口大学大学院 理工学研究科環境共生工学専攻 工修

*3 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

*4 山口大学大学院 理工学研究科教授 工博（正会員）

表-1 使用材料

	産地および種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	最大骨材寸法 (mm)	吸水率 (%)
細骨材	北九州産海砂 (水洗海砂)	2.54	1.75	5	1.20
粗骨材	山口県宮野産 砕石	2.73	5.79	20/40	0.75
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—	—	—
混和剤	AE 減水剤	—	—	—	—

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合条件

RC 床版供試体を製作するために使用した材料を表-1に示す。混和剤には、AE 減水剤を使用した。コンクリートの骨材はいずれも表面乾燥飽水状態のものを用いた。引張側および圧縮側鉄筋とも直径 10mm の異形鉄筋 SD295A を使用した。鉄筋の機械的性質を表-2に、コンクリート配合を表-3および表-4に示す。

2.2 強度試験

コンクリートの硬化後の力学的特性を調べるため、材齢 28 日目に圧縮強度試験(JIS A 1108)を行なった。圧縮強度試験には、粗骨材最大寸法 20mm 使用の供試体に対しては円柱供試体(φ 100×h200mm)を、粗骨材最大寸法 40mm 使用の供試体に対しては円柱供試体(φ 150×h300mm)を用いた。

2.3 RC 床版供試体

RC 床版供試体の概要を表-5に示す。供試体寸法はいずれも 1500×1500×130mm、有効高さは 95mm である。粗骨材最大寸法の影響を調べるため、粗骨材最大寸法は 20mm と 40mm の 2 種類とした。また、圧縮側鉄筋量の影響を調べるため、鉄筋量については As' (単位幅あたり圧縮側鉄筋断面積) と As (単位幅あたり引張側鉄筋断面積) が等しい供試体 ($As'=As$) と、 As' が As の半分の供試体 ($As'=1/2 As$) の 2 種類とした。これら 4 種類について計 10 体の RC 床版供試体を作製した。

表-2 鉄筋の機械的性質

区分	種類の記号	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
異形棒鋼	SD295A	294 以上	441~598

表-3 コンクリートの配合(粗骨材寸法 20mm)

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
		水 (W)	セメン ト(C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (A)
58	44	158	273	828	1095	0.90

表-4 コンクリートの配合(粗骨材寸法 40mm)

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
		水 (W)	セメン ト(C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (A)
58	39	158	273	750	1170	0.90

表-5 供試体概要

供試体 No.	f_c' (N/mm ²)	As (mm ²)	As' (mm ²)	b (mm)	P_{test} (kN)
20-1/2As-1	34.7	784.6	499.3	100	166.6
20-1/2As-2	32.5	784.6	499.3	100	164.6
20-As-1	24.9	784.6	784.6	100	176.4
20-As-2	24.9	784.6	784.6	100	166.6
40-1/2As-1	26.5	784.6	499.3	100	176.6
40-1/2As-2	26.5	784.6	499.3	100	162.0
40-1/2As-3	30.1	784.6	499.3	150	216.6
40-As-1	23.7	784.6	784.6	100	186.3
40-As-2	23.7	784.6	784.6	100	201.0
40-As-3	30.1	784.6	784.6	150	218.5

* f_c' : コンクリート圧縮強度, b : 載荷板辺長,
 As : 引張側鉄筋断面積, As' : 圧縮側鉄筋断面積
 P_{test} : 破壊荷重

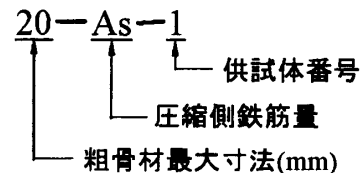


図-1 供試体の呼び方

RC 床版供試体の呼び方と各因子の関係を図

ー 1 に示す。また、 A_s' が A_s の半分の供試体の配筋図および断面図を図ー 2 に示す。

2.4 実験方法

実験方法は、いずれの供試体も同一条件とし、材齢 28 日以降に静的押抜きせん断試験を行った。支持条件はスパン長 $1300 \times 1300 \text{ mm}$ である。支承には直径 50mm の丸棒鋼を使用し、四隅の浮き上がり防止を設けない四辺単純支持とした。丸棒鋼の設置位置および寸法を図ー 2 に示す。また、載荷位置は RC 床版供試体の中央とし、載荷板辺長 100mm と 150mm の正方形鋼板を用い、厚さ 5mm の硬質ゴム板を介して静的荷重を載荷した。載荷時において、床版中央のたわみ、床版圧縮側および引張側のコンクリートひずみ、引張側鉄筋ひずみを測定した。また、破壊後にひび割れの発生状況を観察した。

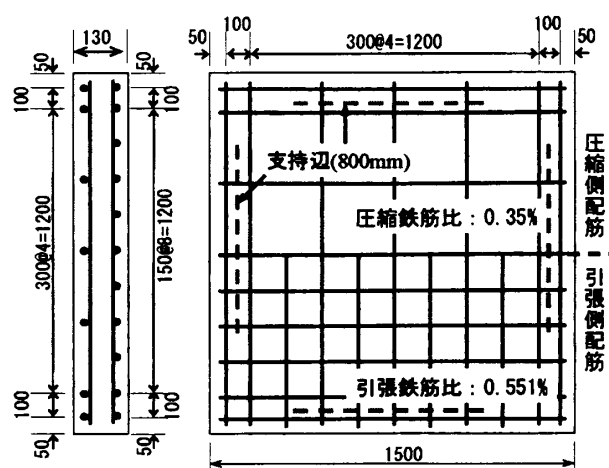
3. 実験結果と考察

3.1 破壊荷重および破壊状況

本研究で試験した RC 床版供試体は、いずれも載荷板直下で押し抜かれ、押抜きせん断破壊を起こしていた。RC 床版供試体の破壊状況は、すべての RC 床版供試体において、ひび割れが荷重の増加とともに床版の中央から四隅に向かって放射線状に進展し、側面まで達していた。破壊荷重に達すると同時に RC 床版供試体の上面で載荷板とほぼ同じ形状をし、コーン状に陥没していた。また、同時に供試体下面においてコンクリートのはく離破壊が生じていた。実験後の床版供試体下面の破壊状態を写真ー 1 に示す。

3.2 載荷荷重と中央たわみの関係

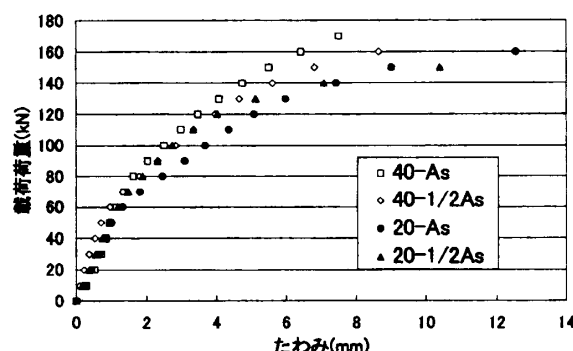
図ー 3 に辺長 100mm の載荷板を用いて実験した 4 種類 RC 床版の平均中央たわみと載荷荷重の関係を示す。圧縮側と引張側の同一鉄筋量では、粗骨材最大寸法 20mm の RC 床版供試体と比較して、粗骨材最大寸法 40mm の RC 床版供試体は、同一荷重における中央たわみが小さくなっている。しかしながら、圧縮側鉄筋量を半分にした RC 床版供試体において、粗骨材最大寸法の相違による影響がみられなかった。また、圧縮側鉄



図ー 2 RC 床版供試体の配筋図および断面図
(20-1/2 A_s ・40-1/2 A_s)



写真ー 1 床版引張側の破壊状況 (20-1/2 A_s -1)



図ー 3 圧縮側鉄筋量および粗骨材寸法の異なる RC 床版の平均中央たわみと載荷荷重の関係

筋量の変化にともなう RC 床版供試体の平均中央たわみと載荷荷重との間に明確な相関関係は

みられなかった。

4 押抜きせん断強度算定式について検討

4.1 日本での示方書式と簡易式

RC床版の押抜きせん断強度の算定式は、各国で数多くの研究者によって提案されている。わが国では、土木学会コンクリート標準示方書に式(1)が設計式として示されている⁵⁾。式(1)において粗骨材最大寸法は考慮されておらず、引張側鉄筋比のみが用いられている。

$$V = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pcd} u_p d / r_b \quad (1)$$

ここで、 V ：押抜きせん断強度 (N)

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2), \quad f_{pcd} \leq 1.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d:\text{mm}) \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合は } 1.5 \text{ とする,}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合は } 1.5 \text{ とする,}$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d), \quad u: \text{ 載荷板周長(mm),}$$

$$f'_c: \text{ コンクリートの圧縮強度(N/mm}^2\text{),}$$

$$u_p: \text{ 載荷板から } d/2 \text{ 離れた位置で換算する周長,}$$

$$d: \text{ 有効高さ(mm), } p: \text{ 引張鉄筋比, } \gamma_b = 1.3$$

また、日本建築学会では⁶⁾1991年に押抜きせん断に対する許容せん断力 Q_{PA} を式(2)のように定めている。

$$Q_{PA} = 1.5 \cdot b_0 \cdot j \cdot f_s \quad (2)$$

ここで、 Q_{PA} ：押抜きせん断強度(N)， b_0 ：押抜きせん断に対する設計用せん断算定断面の延べ幅(mm)， j ：基礎板の応力中心距離で $(7/8)d$ とすることができる(mm)， d ：算定断面有効高さ(mm)， f_s ：コンクリートの許容せん断応力度(N/mm²)

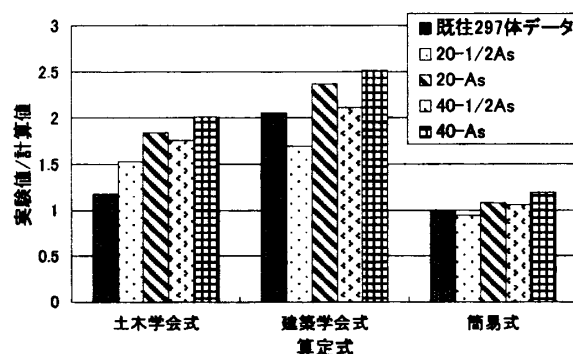
また、著者らは国内外の約300体の床版データから、床版全厚による押抜きせん断強度への影響を考え、最も簡易的な算定式を示し、式(3)のように求めた⁷⁾。

$$V = 1.35 \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[4]{p} (u + 2\pi h) h \quad (3)$$

ここで、 f'_c ：コンクリート圧縮強度(N/mm²)， p ：(引張)鉄筋比， u ：載荷板周長(mm)， h ：床版全厚(mm)

表－6 各算定式による計算結果

供試体 No.	土木学会式		建築学会式		簡易式	
	計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計
20-1/2As-1	109.9	1.52	100.8	1.65	177.8	0.94
20-1/2As-2	106.4	1.55	94.4	1.74	173.9	0.95
20-As-1	93.1	1.90	72.3	2.44	159.1	1.11
20-As-2	93.1	1.79	73.2	2.31	159.1	1.05
40-1/2As-1	96.0	1.84	76.9	2.30	162.4	1.09
40-1/2As-2	96.0	1.69	76.9	2.11	162.4	1.00
40-1/2As-3	122.8	1.76	112.4	1.93	198.1	1.09
40-As-1	90.8	2.05	68.8	2.71	156.5	1.19
40-As-2	90.8	2.21	68.8	2.92	156.5	1.28
40-As-3	122.8	1.78	112.4	1.94	198.1	1.10



図－4 破壊荷重と計算結果

本研究では、前述の算定式が圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法の異なる床版に対する適用性を検討するため、10体のRC床版供試体の実験値と前述の算定式による計算値を比較した。

4.2 算定式による計算結果

前述の3つの算定式による計算値、およびその計算値に対する本研究における10体のRC床版供試体の実験値の比(実/計)を表－6に示す。また、10体のRC床版供試体は作製条件により4種類に分けて、各種類供試体の実験値と土木学会式、建築学会式、簡易式による計算結果に対する比の平均値を図－4に示す。また、既往の研究⁸⁾で示された300近くの床版データにおけるRC床版の押抜きせん断強度に対しても、各算定式の計算値を求め、それに対する実験値の比(実

/計)を算定した。図-4には、各算定式の実/計の平均も併せて示しており、各算定式の推定精度を表している。

RC床版供試体の実験値と算定式による求めた計算値の比(実/計)は圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法の増加と共に破壊荷重が大きくなる傾向がみられた。これらは、図-5に示すように骨材のかみ合わせ作用によるもので、RC床版が破壊する際、ひび割れが粗骨材の表面に沿って発生をし、粗骨材寸法を大きくするほど、RC床版のひび割れが長くなり、せん断破壊面の面積も大きくなる。

また、圧縮側の鉄筋もダウエル効果によりせん断力を分担すると考えられる。このことから、圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法が床版の押抜きせん断強度に影響を及ぼしていることがわかる。しかしながら、3つの算定式は圧縮側鉄筋量と粗骨材最大寸法より床版の押抜きせん断強度に無関係に示している。

4.3 圧縮側鉄筋量の影響

RC床版の圧縮側鉄筋量が押抜きせん断強度に与える影響を検討するため、式(3)に対して、新たにパラメータとして圧縮側鉄筋比 p' を含める。この圧縮側鉄筋比 p' は、引張側鉄筋比 p と同等に作用するものとし、鉄筋比は圧縮鉄筋比に引張側鉄筋比を加え、鉄筋全体をダウエル効果があるものとみなした。一般的なRC床版においても圧縮側鉄筋は配置されており、その量は引張側鉄筋量の1/2以上と考えられる。そこで、引張鉄筋量の1/2を基準にして、その増分を引張鉄筋に加えることにした。このことより、式(3)におけるパラメータの鉄筋比を計算するときに次式(4)を用いることとした。

$$p_{eq} = p + \left(p' - \frac{p}{2} \right) = \frac{p}{2} + p' \quad (4)$$

ここで、 p_{eq} ：等価な鉄筋比、 p ：引張側鉄筋比、 p' ：圧縮側鉄筋比

4.4 粗骨材寸法の影響

粗骨材最大寸法 d_a の影響は、RC床版の断面厚

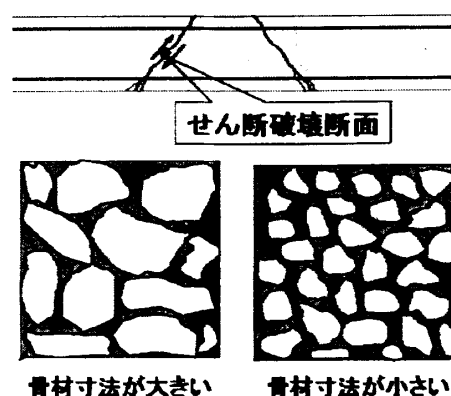


図-5 粗骨材かみ合わせ作用

表-7 式(6)による計算結果

供試体 No.	P_{test} (kN)	簡易式		式(6)により	
		計算値 (kN)	実/計	計算値 (kN)	実/計
20-1/2As-1	166.6	177.8	0.94	184.0	0.91
20-1/2As-2	164.6	173.9	0.95	180.0	0.91
20-As-1	176.4	159.1	1.11	176.5	1.00
20-As-2	166.6	159.1	1.05	176.5	0.94
40-1/2As-1	176.6	162.4	1.09	182.8	0.97
40-1/2As-2	162.0	162.4	1.00	182.8	0.89
40-1/2As-3	216.6	198.1	1.09	222.9	0.97
40-As-1	186.3	156.5	1.19	188.8	0.99
40-As-2	201.0	156.5	1.28	188.8	1.06
40-As-3	218.5	198.1	1.10	239.0	0.91
実/計の平均値			1.02		0.96
標準偏差			0.08		0.05
変動係数(%)			8.1		5.5

さとの比に関係していると考えられる。断面厚さを考えると、床版が薄いほど、かみ合わせ作用が期待できることになる⁹⁾。すなわち、薄い床版に対して粗骨材寸法を大きくすることで、押抜きせん断に対する抵抗力は大きくなると考えられる。本研究では粗骨材最大寸法による寸法効果の係数 β を用い、RC床版のせん断破壊断面積の変化に対して評価する。係数 β は以下に示すように算定した。

$$\beta = 1.3 \sqrt[4]{0.2 + \frac{d_a}{h}} \quad (5)$$

ここで、 d_a :粗骨材最大寸法(mm), h :床版全厚(mm)

一方、土木学会の式では、 $\sqrt[4]{1/d}$ として表しているが、この係数も粗骨材最大寸法が同一と考えれば、妥当とも受け取れる。このことから、式(5)により求めた係数 β を、粗骨材最大寸法の異なった床版に適用させるために式(3)に、パラメータとして追加した。式(6)のように示す。

$$V = 1.35 \beta \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[4]{p(u + 2\pi h)} h \quad (6)$$

式(6)を用い、計算した押抜きせん断強度と実験結果の比を表-7に示す。

圧縮側鉄筋比および粗骨材最大寸法によるせん断強度への影響を式(4)と式(5)を用いて、計算した値は簡易式により求めた結果より実験結果と近く、精度のよい結果が算出された。

圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法が異なった床版の押抜きせん断強度にパラメータの条件を追加すると、簡易式は適用できることがわかった。

5. 結論

本研究では、圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法を変化させることにより RC 床版の押抜きせん断強度に及ぼす影響を検討した。また、実験結果に対する土木学会式、建築学会式および著者らの提案する簡易式の算定精度について調べた。さらに、圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法に対応できるパラメータの条件を追加した。以下に、得られた結論をまとめる。

- (1) 圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法を増加させることにより RC 床版の押抜きせん断強度が増加した。
- (2) 土木学会コンクリート標準示方書および建築学会構造計算規準に示される算定式は、いずれも圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法が算定式中のパラメータに含まれていな

いために、これらを含める必要性が認められる。

- (3) 本研究で実験した RC 床版供試体の実験結果から、圧縮側鉄筋量および粗骨材最大寸法の影響を考慮したパラメータを用いることで、より精度よく RC 床版の押抜きせん断強度を評価することができる。

参考文献

- 1) Collins, M. P. and Mitchell, D.: Library Congress Cataloging-in-Publication Data, ISBN 0-13-691635-X, TA683.2.C56, pp.365~369, 1990
- 2) 小柳 洽:鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い, コンクリート工学, Vol.19, No.8, 1981
- 3) 岡田 清:最新コンクリート工学 Advanced Concrete Engineering pp.124-136, 1986
- 4) 平岩 陸, 谷川恭雄, 森 博嗣, 南部禎士:粗骨材の寸法および配置がコンクリート圧縮破壊挙動に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.541-546, 1998
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書【構造性能照査編】 pp.73-75, 2002
- 6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991.4
- 7) 浜田純夫, 毛 明傑, 田中宏明, 楊 秋寧:引張側かぶり厚さの大きいRC床版の押抜きせん断強度に関する研究, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.255-260, 2005.11
- 8) 松尾栄治, 毛 明傑, 楊 秋寧, 浜田純夫:RC 床版の押抜きせん断耐力算定式における各要因の影響について, コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.661-666, 2003
- 9) Philippe Menétrey: Analytical Computation of the Punching Strength of Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, pp.503-511, September-October. 1996