論文　軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力

東山　浩士[*1]・水越　睦視[*2]・松井　繁之[*3]・小田　憲司[*4]

要旨：道路橋鉄筋コンクリート床版の軽量化を目的として，軽量コンクリートを採用することへの期待が高まっている。しかし，その床版の耐久性を評価するうえで基本となる押抜きせん断耐荷力に関して未だ充分に検討されていない。そこで，本研究では，軽量コンクリートの引張強度，せん断強度，弾性係数に関する材料試験を行い，既往の RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式を基本とした軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力算定方法を検討した。

キーワード：軽量コンクリート床版，押抜きせん断耐荷力，引張強度，せん断強度

1．はじめに

道路橋床版の軽量化に向けた軽量コンクリートの使用は主桁や下部工への応力低減が図れ，普通コンクリートに比べて重量は約20%低減される。しかし，軽量コンクリートの引張強度，せん断強度，弾性係数は普通コンクリートに比べて低下するのが一般的である。このような強度低下を補うためにプレストレスを導入したり[1)]，繊維を混入して補強したりすることが考えられる[2)]。しかし，軽量 PC 床版を含めても軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力に関する既往の研究[1),3),4)]は少なく，床版の疲労耐久性を評価するうえで基本となる押抜きせん断耐荷力に関して未だ充分に検討されているとは言えない。

本研究では，粗骨材に人工軽量粗骨材を用いた軽量コンクリートの引張強度，せん断強度，弾性係数といった材料特性を把握するための材料試験を行い，また，床版の鉄筋量を低減する目的で鋼繊維，あるいはポリプロピレン繊維を混入して補強した軽量コンクリートについても材料試験を行った。続いて，軽量コンクリート床版と，鋼繊維，あるいはポリプロピレン繊維補強軽量コンクリート床版の押抜きせん断実験を行った。これらの実験結果により RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式[5)]をもとに軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の算定方法を検討した。

2．材料試験

2.1 使用材料

使用材料およびその物性値の一覧を**表－1**に示す。軽量コンクリート(LC)の粗骨材には非造粒型の人工軽量骨材（膨張性頁岩）を用いた。鋼繊維(SF)はインデント型カットワイヤーを用い，混入率をこれまで標準的に用いられてきたV_f=0.75%とした[2)]。ポリプロピレン繊維(PPF)はインデント型を用い，混入率を力学性能が改善されるV_f=2.0%とした。

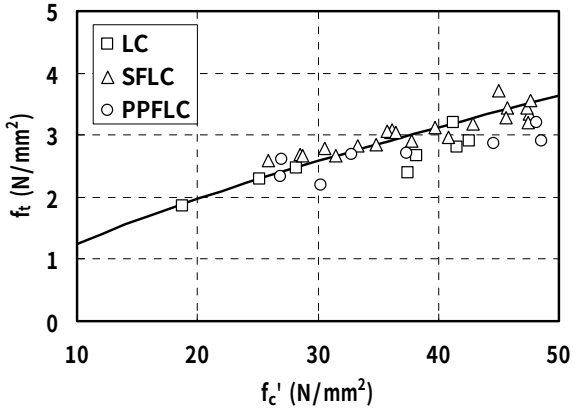
2.2 材料強度特性

軽量コンクリート(LC)，鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLC)，ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリート(PPFLC)の圧縮強度と引張強度（割裂引張試験）との関係を**図－1**に，圧縮強度とせん断強度（直接二面せん断試験）との関係を**図－2**に，圧縮強度と弾性係数との関係を

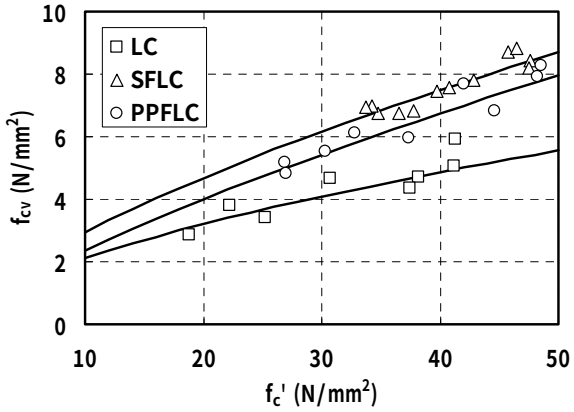
*1 近畿大学　理工学部社会環境工学科講師　博（工）　（正会員）
*2 住友大阪セメント㈱　セメント・コンクリート研究所　博（工）　（正会員）
*3 大阪大学大学院　工学研究科土木工学専攻教授　工博　（正会員）
*4 近畿大学大学院　総合理工学研究科環境系工学専攻

表－１　使用材料の物性値一覧

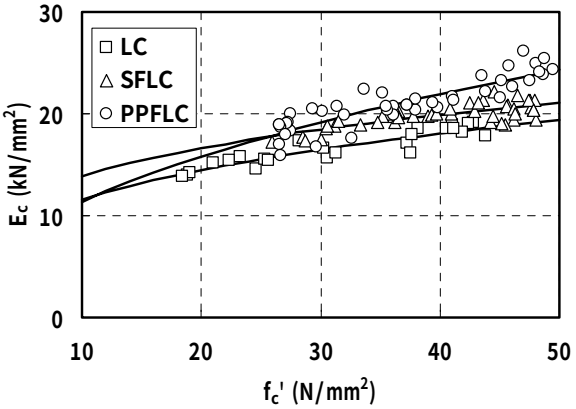
使用材料	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント，密度：3.13g/cm^3
細骨材	野洲川産川砂，表乾密度：2.59g/cm^3，吸水率：1.39%
粗骨材	非造粒型膨張性頁岩，表乾密度：1.65g/cm^3，吸水率：28.0%
鋼繊維	インデント型カットワイヤー，寸法：φ0.6×50mm，密度：7.85g/cm^3 引張強度：1239N/mm^2，弾性係数：206kN/mm^2
PP繊維	インデント型，寸法：φ0.56×30mm，密度：0.91g/cm^3 引張強度：345N/mm^2，弾性係数：3.7kN/mm^2



図－１　圧縮強度と引張強度との関係



図－２　圧縮強度とせん断強度との関係



図－３　圧縮強度と弾性係数との関係

図－３に示す。ここで，それぞれの材料試験に用いた円柱供試体（圧縮試験，引張試験）および角柱供試体（せん断試験）の寸法は LC および PPFLC に対してφ100×200mm，100×100×400mm，SFLC に対してφ150×300mm，150×150×530mm である。

図－１には引張試験結果を示してあるが，粗骨材の種類，繊維混入の有無による引張強度の差異がわずかながら見られる。コンクリート標準示方書 [6]では軽量２種コンクリートの場合，普通コンクリートの値の 70%とすることが規定されているが，LC，SFLC，PPFLC の引張強度は図中に実線で示した普通コンクリート(NC)の平均引張強度式 [7]に低減係数η[8]を乗じた値に近くなるため，次式を用いることにする。

LC，SFLC，PPFLC の平均引張強度式

$$f_t = 0.267\eta f_c'^{0.667} \quad (1)$$

$$\eta = 0.40 + 0.60\rho/2200 \quad (2)$$

ここに，

f'_c：軽量コンクリートの圧縮強度

ρ：軽量コンクリートの密度(kg/m^3)

図－２にはせん断試験結果とそれぞれの平均強度曲線を実線で示してあるが，LC のせん断強度は NC に比べて 20%程度低下すると言える。また，SFLC，PPFLC ともにせん断強度は繊維自身のせん断抵抗により LC のせん断強度を大きく上回る結果となった。また，本実験での繊

表－２　試験体種類一覧

試験体	支間長 L (mm)	厚さ t (mm)	配筋		有効高さ		繊維種類
			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 (mm)	配力鉄筋 d_d (mm)	
LC1	1000	100	D10@160 D10@80	D10@160 D10@80	80	70	無
LC2	1000	100	D10@240 D10@120	D10@240 D10@120	80	70	無
SFLC	1000	100	D10@240 D10@120	D10@240 D10@120	80	70	SF
PPFLC	1000	100	D10@240 D10@120	D10@240 D10@120	80	70	PPF

表－３　軽量コンクリートの配合表

種類	W/C (%)	V_f (%)	(kg/m^3)				SP (C×%)
			W	C	S	G	
LC	48	－	180	375	812	555	0.2
SFLC	48	0.75	180	375	948	470	0.6
PPFLC	48	2.0	197	410	1020	378	1.0

維混入率においては SF によるせん断強度の増大が高いと言える。実験結果からそれぞれの平均せん断強度式を求めると次式のように表される。

LC のせん断強度式 [9)]

$$f_{cv} = 0.528 f_c'^{0.602} \quad (3)$$

SFLC のせん断強度式 [9)]

$$f_{cv} = 0.618 f_c'^{0.676} \quad (4)$$

PPFLC のせん断強度式

$$f_{cv} = 0.419 f_c'^{0.753} \quad (5)$$

図－３から LC，SFLC，PPFLC の弾性係数は NC に比べてかなり低下することが分かる。また，SFLC および PPFLC の弾性係数は LC に比べてやや大きくなることが分かる。実験結果からそれぞれの平均弾性係数式を求めると次式のように表される。

LC の弾性係数式 [9)]

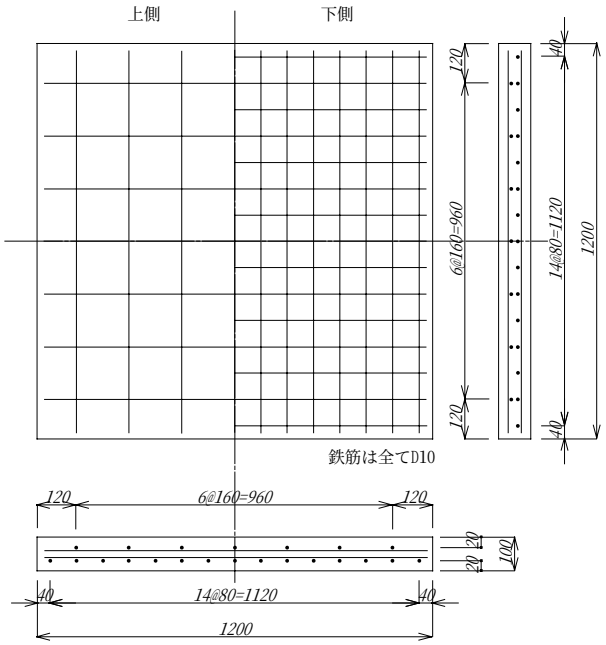
$$E_c = 5.508 f_c'^{0.322} \quad (6)$$

SFLC の弾性係数式 [9)]

$$E_c = 7.628 f_c'^{0.260} \quad (7)$$

PPFLC の弾性係数式

$$E_c = 3.831 f_c'^{0.473} \quad (8)$$



図－４　試験体の配筋図(LC1)

3．押抜きせん断実験

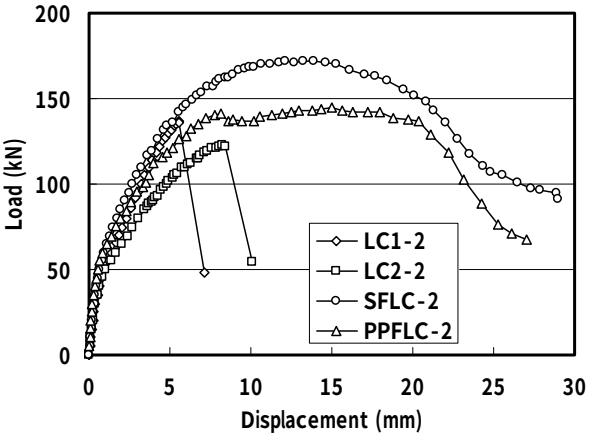
3.1 試験体および実験方法

試験体の種類は**表－２**に示すように４種類とし，各２体を製作した。軽量コンクリート床版である**図－４**に示す試験体 LC1 を基本とし，試験体 LC2 の鉄筋量は試験体 LC1 の 67%としている。試験体 SFLC および試験体 PPFLC は試験体 LC2 と同様の鉄筋量で，それぞれ鋼繊維(SF)，ポリプロピレン繊維(PPF)を混入している。試験

表－４　材料試験結果

試験体	圧縮強度 f_c' (N/mm^2)	引張強度 f_t (N/mm^2)	せん断強度 f_{cv} (N/mm^2)	弾性係数 E_c (kN/mm^2)	単位容積質量 ρ (kg/m^3)
LC1	41.3	2.72 (2.85)	5.94 (4.96)	20.6 (18.3)	1810
LC2	41.3	2.72 (2.85)	5.94 (4.96)	20.6 (18.3)	1810
SFLC	46.5	3.29 (3.23)	8.83 (8.28)	21.5 (20.7)	1960
PPFLC	42.0	2.73 (2.97)	7.67 (7.00)	21.1 (22.4)	1910

図－５　載荷状況

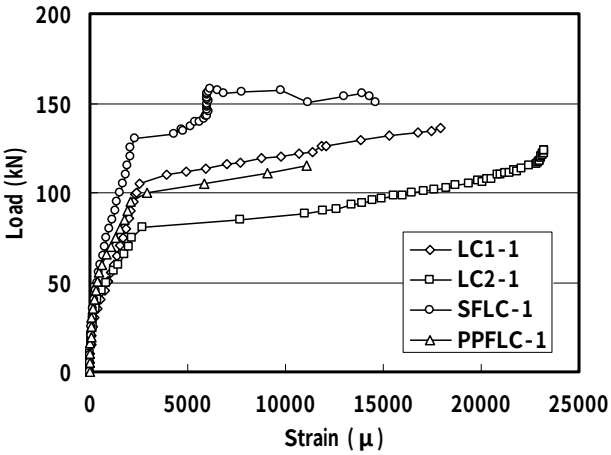


図－６　中央変位

体に使用した材料は**表－１**に示したものと同様であり，繊維混入率も SF が 0.75%, PPF が 2.0%と同様である。それぞれの配合を**表－３**に示す。各試験体の実験開始時に行った材料試験の結果を**表－４**に示す。表中の(　)内に示した値は **2.** で示した平均強度式により算出した値である。鉄筋は全て D10(SD295A)を用い，鉄筋の降伏点は f_y=391N/mm^2，弾性係数は E_s=187kN/mm^2 である。支持条件は四辺単純支持とし，支間長は 1000mm とした。載荷板は 100×100mm の鋼板を用いた。載荷状況を**図－５**に示す。

3.2 中央変位

図－６に荷重と床版中央における変位との関係を示す。試験体 LC1 および試験体 LC2 は最大荷重に達した後，押抜きせん断破壊により急激に荷重が低下するのに比べて，試験体 SFLC および試験体 PPFLC は押抜きせん断破壊が進行してもひび割れ間の繊維の架橋によるせん断抵抗により徐々に荷重が低下し，高い靭性を有



図－７　主鉄筋ひずみ

していることが分かる。繊維を SF で 0.75%, PPF で 2.0%混入することによって鉄筋量を 67%にまで低減しても試験体 LC1 とほぼ同等な剛性にまで改善されている。また，押抜きせん断耐荷力も試験体 LC1 を上回っており，繊維混入の効果が確認される。

3.3 鉄筋ひずみ

図－７に荷重と床版中央における主鉄筋ひず

みとの関係を示す。試験体 LC2 は鉄筋量が少ないため，主鉄筋の降伏荷重は小さくなっているが，繊維を混入した試験体は繊維による引張力の分担，ひび割れ幅の抑制等の効果により試験体 LC１の降伏荷重に比べて，試験体 PPFLC の降伏荷重はほぼ同等であり，試験体 SFLC はそれらよりさらに大きな値となっている。

3.4 押抜きせん断耐荷力

表－５(a)に実験結果を示す。試験体 LC1 と試験体 LC2 とを比較すると，鉄筋量を 67%に低減した試験体 LC2 の押抜きせん断耐荷力は試験体 LC1 より 10%程度低下している。しかし，繊維を混入した試験体 SFLC，試験体 PPFLC の押抜きせん断耐荷力は試験体 LC1 よりも大きな値が得られており，繊維混入による耐荷力の増大が確認される。このことから，鉄筋量の低減が可能と言える。

実験終了後の破壊状況の観察から，せん断破壊面はほぼ 45°であり，せん断破壊面で粗骨材の破壊が見られた。また，引張側鉄筋位置での剥離破壊も粗骨材の破壊を伴うものであった。このような破壊状況から，次式に示す RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式 [5]をもとに軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力算定を試みることにした。

$$P_{cal1} = f_{cv}\{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + f_t\{2(a+2d_m)C_d + 2(b+2d_d+4C_d)C_m\} \quad (9)$$

ここに，

a, b ：載荷板の主鉄筋，配力鉄筋方向の辺長

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

d_m, d_d ：引張側主鉄筋，配力鉄筋の有効高さ

C_m, C_d ：引張側主鉄筋，配力鉄筋のかぶり深さ

f_{cv} ：軽量コンクリートのせん断強度

f_t ：軽量コンクリートの引張強度

表－５(a)には式(9)中のせん断強度および引張強度として**表－４**に示した材料試験結果を用いて算出した結果（計算値１）と実験値との比較を示してある。実験値と計算値１との比は 0.72～0.87 の範囲にあり，軽量コンクリートの材料強度を直接用いているにも拘わらず，計算値１は実験値に対してかなり大きい評価となってしまうことが分かる。このような差異について以下のような推察を行った。

表－５ (a) **実験値と計算値１との比較**

試験体	実験値 P_{exp} (kN)	計算値1 $P_{cal\ 1}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal\ 1}$
LC1	136.2 136.6	181.6	0.750 0.752
LC2	123.0 123.0	163.8	0.751 0.751
SFLC	158.0 172.3	218.3	0.724 0.789
PPFLC	162.3 144.7	187.1	0.867 0.773
A.V. COV			0.770 5.30%

表－５ (b) **実験値と計算値２との比較**

試験体	実験値 P_{exp} (kN)	計算値2 $P_{cal\ 2}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal\ 2}$
LC1	136.2 136.6	137.2	0.993 0.996
LC2	123.0 123.0	122.9	1.001 1.001
SFLC	158.0 172.3	164.9	0.958 1.045
PPFLC	162.3 144.7	141.5	1.147 1.023
A.V. COV			1.021 5.10%

軽量コンクリートの弾性係数が普通コンクリートに比べて低いこと，ならびに，粗骨材の破壊が支配的であることを考えると，圧縮側コンクリートのせん断破壊部分および引張側鉄筋位置の剥離破壊部分の抵抗が低下していると考えられる。

そこで，引張側鉄筋位置におけるダウエル力による剥離破壊について軽量骨材と普通骨材を用いた場合のダウエル耐力を調べた結果，軽量骨材コンクリートでは普通骨材コンクリートに対して約 30%の低下が見られた。この結果をもとに，押抜きせん断耐荷力に占める圧縮側コンクリートのせん断破壊抵抗を算出すると，約 20%の低下を考慮する必要がある。

以上のことから，圧縮側コンクリートのせん断破壊部分を 80%，引張側鉄筋位置の剥離破壊部分を 70%とした次式により算出した結果（計算値２）と実験値との比較を**表－５**(b)に示す。

$$P_{cal2} = \alpha_{cv} \cdot f_{cv}\{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + \alpha_t \cdot f_t\{2(a+2d_m)C_d + 2(b+2d_d+4C_d)C_m\} \quad (10)$$

ここに，α_{cv}=0.8，　α_t=0.7

その結果，鉄筋量，繊維混入の有無，繊維の種類に関係無く実験値とほぼ一致する結果を得ることができた。このような耐荷力低下の原因については今後も検討していく必要がある。

4．まとめ

軽量コンクリート床版の押抜きせん断実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 本実験に使用した鋼繊維，ポリプロピレン繊維ではそれぞれ 0.75%，2.0%混入することによって鉄筋量を 67%にまで低減しても鉄筋量を低減していない試験体の押抜きせん断耐荷力を上回る耐荷力を有することが分かった。

(2) 繊維を混入した試験体は最大荷重到達後も急激な荷重低下は見られず，高い靭性を有することが分かった。これは繊維を混入することによって繊維がせん断抵抗に大きく寄与していると言える。

(3) 軽量コンクリートの材料試験から得られたせん断強度および引張強度を用いて式(9)により押抜きせん断耐荷力を算出すると，実験値と計算値との比の平均は 0.77 となり計算値は実験値に対して危険側の評価となってしまう。

(4) 式(9)に対して圧縮側コンクリートのせん断破壊部分を 80%に，引張側鉄筋位置の剥離破壊部分を 70%にした式(10)による計算値は鉄筋量，繊維混入の有無，繊維の種類に関係無く，実験値とほぼ一致する結果を得ることができた。

謝辞

本研究を行うにあたり，人工軽量骨材をご提供頂いた人工軽量骨材協会，日本メサライト工業㈱の藤木英一氏，ならびに，ポリプロピレン繊維をご提供頂いた東洋紡績㈱の岡山芳道氏に感謝いたします。

参考文献

1) 中村定明，深山清六，山﨑淳：高強度軽量コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版に関する研究，第二回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.101-106，2000.10
2) 人工軽量骨材協会：鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLRC), 鋼繊維を混入した人工軽量骨材コンクリートの基本物性と特性について，人工軽量骨材コンクリート技術資料，No.13，1998
3) 原田良紀，浜田純夫，松尾栄治，津田久嗣：軽量床版の押抜きせん断耐荷力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.715-720，2000.6
4) S. Hamada, M. Mao, I. Yoshitake, and H. Tanaka: Slabs with Lightweight Aggregate Concrete of High Strength, Proceedings of the 1st fib 2002 Osaka Congress, Session 9, pp. 267-272, Osaka, 2002.10
5) 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
6) 土木学会：コンクリート標準示方書［構造性能照査編］，pp.21-24，2002 年制定
7) 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
8) fib: Lightweight Aggregate Concrete, Codes and standards, bulletin 4, p.7, 1999.8
9) 水越睦視：繊維補強コンクリートの基本特性と道路橋 RC 床版への適用に関する研究，大阪大学学位論文，2002.1