

論文 軽量床版の押抜きせん断耐力に関する研究

原田良紀^{*1}・浜田純夫^{*2}・松尾栄治^{*3}・津田久嗣^{*4}

要旨:道路橋の鉄筋コンクリート床版への補修に際して、死荷重の低減を図る目的で軽量コンクリート床版の採用が望まれている。しかし、軽量コンクリートは引張強度や弾性係数が低下するという問題を抱えている。そこで本研究では、軽量床版に対して静的押抜きせん断試験を行い、普通コンクリート床版との比較を行う。また、実験後の破壊断面の観察から松井らの式の力学モデルへの修正、および引張強度が耐力算定式に及ぼす影響を示し、軽量床版の実用性について検討する。

キーワード:人工軽量骨材、床版の最小全厚、引張強度、耐力算定式

1. はじめに

近年の自動車交通量や重車両の増加に伴い、道路橋における鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と略す）の損傷問題が顕在化してきている。損傷が著しいRC床版では、コンクリートの一部が抜け落ちたり、また、過大なひび割れが生じていることから、補修または補強が行われている。このため昭和47年および平成8年の道路橋示方書改訂にみられるように、RC床版の増厚および鉄筋量の増加により、設計荷重の増大がはかられてきた。

一方、このような橋梁に対して、施工の省力化あるいはコストの縮減から、プレキャストコンクリート床版（以下、PCa床版と略す）の実用化が進められている。PCa床版は、工場製作であるため、品質管理が容易であり、現場打ちコンクリート床版よりも品質が優れるとともに、現場での型枠工の削減や養生期間を必要とせず、工期縮減が望める等のメリットを有する。

一般に、損傷を受けたコンクリート床版の打替えに際しては、鋼床版、鋼コンクリート合成床版およびプレキャストPC床版などが採用されてい

る。ここで、コンクリート床版は耐腐食性等に優れ、維持管理が容易という点において有利とされているが、軽量化という点では鋼に劣っている。

コンクリート床版の軽量化に関する代表的な手段として、人工軽量骨材の使用による自重の軽減、あるいはプレストレスの導入による床版厚の減少などがあげられる。一般に人工軽量骨材を使用したコンクリート床版では、天然の普通骨材を使用したコンクリート床版に対して、15～25%の軽量化が可能となる。しかしながら、人工軽量骨材は内部空隙を多く含むことから、骨材そのものの保有する強度が、天然骨材よりも劣り、コンクリート強度が低下する問題が考えられる。そのため、軽量コンクリートを用いて作製したコンクリート床版の保有耐力を明らかにしておくことは、今後の軽量コンクリート床版の利用に対して必要不可欠なものと思われる。

本研究では、プレキャスト軽量コンクリート床版の実用化に関する基礎データを資する目的から、その基本となるRC床版の静的押抜きせん断試験を行った。そして、松井らおよび角田らの提案する押抜きせん断耐力算定式を用いて、本研究

*1 防府市 土木課（正会員）

*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科, Ph.D.（正会員）

*3 山口大学助手 工学部社会建設工学科, 博士（工学）（正会員）

*4 栗本鉄工所

で得られた実験結果との適合性について検討を行うとともに、人工軽量骨材を用いることによる強度低下率の算定を行った。また、実験後のコンクリート床版の破壊断面を観察することにより、押抜きせん断耐力に及ぼす影響を整理し、軽量コ

表-1 軽量骨材の物性値

		比重	吸水率(%)
細骨材	山砂	2.72	1.80
	人工軽量細骨材	1.90	19.0
粗骨材	碎石	2.71	—
	人工軽量粗骨材	1.49	32.0

表-2 配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメン	細骨材 軽量 山砂	軽量粗骨材	AE減水剤	
15	8±1.5	37	4.5±1	42	162	443	229	387	617	1.11

ンクリート床版に対し適用できるよう松井の提案式の修正を行った。また、道路橋床版の打替えにおける軽量床版の実用性について検討した。

2. 実験方法および供試体

2.1 使用材料と配合条件

軽量コンクリート床版の作製にあたり、本研究で使用した粗骨材は、非造粒型のアサノライト(最大寸法 15mm)であり、細骨材についてはアサノライトおよび山砂を混合したものを用いた。本研究で使用した骨材の諸物性を表-1 に示す。表-1 より、人工軽量骨材では海砂や碎石に対し比重が小さくなっていることが分かる。これは、骨材中に多くの空隙を有するためである。また、それによって吸水率は増加する。また、表-2において、コンクリートの配合条件の詳細を示す。なお、本研究で用いたコンクリートの目標圧縮強度はいずれの供試体においても 49MPa とし、実際の工場製作 PCa 床版と同様の養生を施すため、打設後約 1 日間、蒸気養生を行った。

2.2 供試体

本研究では床版厚およびサイズが異なる 6 体のプレキャスト床版供試体において試験を行った。これらの供試体は蒸気養生を施し、材齢 28 日以降に試験に供した。鉄筋は主筋・配力筋共に SD30 の D10 を使用した。幅止め筋は、主筋と配力筋の間隔を保つ程度の鉄筋とし、スターラップは入れないものとした。供試体サイズと鉄筋比および配筋図を表-3 および図-1 に示す。それぞれの供試体は、供試体長、床版厚、スパン長を変化させ、計

表-3 供試体サイズおよび鉄筋比

No.	供試体サイズ 縦×横×厚さ (mm)	有効 高さ (mm)	スパン長 (mm)	鉄筋比 (%)
1	1150×1150×100	75	1050	0.558
2	1150×1150×130	100	1050	0.429
3	1400×1400×130	100	1300	0.431
4	1400×1400×160	120	1300	0.350
5	1200×1200×150	120	1100	0.357
6	1600×1600×150	120	1500	0.386

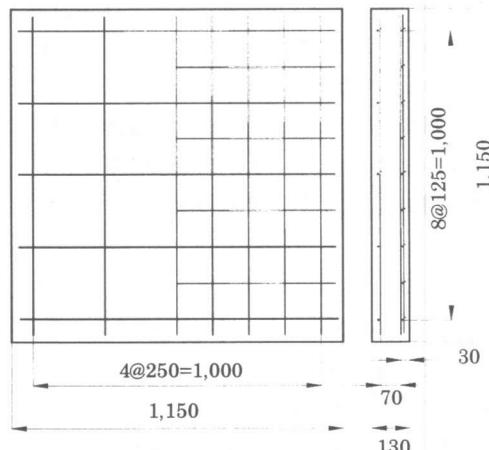


図-1 上筋・下筋配筋図 (No. 2)

6 体製作した。配筋図は供試体 No.2 のもののみ示すが、他の供試体もこれに準じた形状とした。

2.3 載荷方法

既往の研究における支持条件は、支持辺長、支持辺数などにおいてそれぞれ異なっている。しかしながら、床版の押抜きせん断による破壊は載荷点周辺のせん断応力の大きさから決定される。従って、載荷点あるいは示方書に示されるように破壊の周長より大きい支持辺の長さが必要になって

くる。また、浮き上がり防止を設けた実験も行われた例はあるが、破壊面の中心の周長が関係していくことから浮き上がり防止のせん断強度への影響は大きくなるものと考えられる。この様なことから本研究では4隅の浮き上がり防止は設けない4辺単純支持とし、 $10 \times 10\text{cm}$ 載荷板を使用し硬質ゴム板を用い供試体中央に集中荷重を作用させた(図-2)。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊荷重および破壊形態

本研究の試験に用いた供試体は同時に打設され、軽量コンクリートの28日圧縮強度は 47.9N/mm^2 であり、28日引張強度は 0.98N/mm^2 であった。静的押抜きせん断試験を行った結果、全ての供試体において載荷位置直下が押し抜かれる押抜きせん断破壊モードを示した。また、実験後の破壊断面を観察した結果、図-3～4の様な破壊断面が観察できた。その結果、せん断破壊角度は普通コンクリートRC床版と同様ほぼ 45° で破壊していた。しかし、破壊断面の粗骨材部分を観察した結果、せん断破壊部分および剥離破壊部分とも骨材の破壊が見られた。このことから、人工軽量骨材は碎石に比べ引張強度が低いことが確認できた。

3.2 RC床版に関する押抜きせん断耐力算定式

本研究では、静的強度の算定理論が明確で、しかも実験値との適合性の良いRC床版に関する松井らの式および角田らの式による計算値と実験値を比較することにより、軽量コンクリート床版では押抜きせん断耐力が普通コンクリート床版に比べどの程度異なるかを調べた。

3.2.1 松井式

松井ら¹⁾は、彼らが行った実験における供試体の破壊断面の考察より、圧縮側表面より中立軸までの距離 χ 離れた深さまで最大応力が一様に分布し、かぶり破壊部では、破壊始点が最大引張応力で、ある距離まで三角形状に分布すると考えた。そして、図-5に示すような力学モデルを得、以下のような押抜きせん断耐力算定式を提案した。

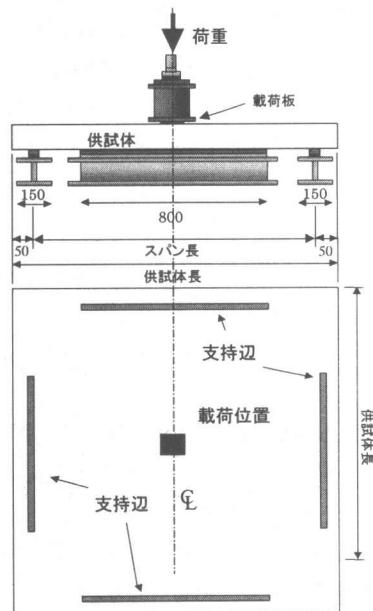


図-2 載荷方法 (mm)

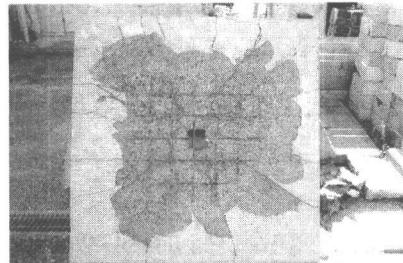


図-3 供試体破壊断面



図-4 粗骨材破壊断面

$$P = \tau_{smax} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} \\ + \sigma_{tmax} \{2(4C_m + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (1)$$

ここに、

a, b : 載荷版の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長

X_m, X_d : 主鉄筋、配力鉄筋方向の中立軸位置

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

τ_{smax} : コンクリートのせん断強度 (N/mm²)

$$\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.00251 \sigma_{ck}^2$$

だし、上式では $\sigma_{ck} \geq 49$ (N/mm²) の範囲で σ_{ck} の増加に対して τ_{smax} は減少に転じるため、便宜的に以下の式²⁾を採用。

$$\tau_{smax} = 0.784 \sigma_{ck}^{0.553}$$

σ_{tmax} : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

$$\sigma_{tmax} = 0.269 \sigma_{ck}^{2/3}$$

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

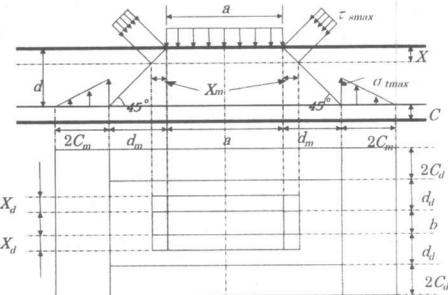


図-5 松井らによる押抜き面の力学モデル

表-4 に実験値と松井式計算値の比較を示す。これから軽量コンクリートを用いることにより押抜きせん断耐力は普通コンクリートの場合に比べて松井式による計算値に対する実験値の割合が約 40% 低減していることがわかる。

3.2.2 角田式

角田ら³⁾は、載荷板の周長、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏応力度の評価から耐力算定式を提案している。角田式を以下に示す。

$$V_{c,a} = 0.674(b_0 + 3\pi d)d\sqrt{\sigma_{ck}}$$

$$(1 + 0.5p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{ck}})/(1 + d/20) \quad (2)$$

ただし、 $p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{ck}} > 3.33$ のとき

$$p\sigma_{sy}/\sqrt{\sigma_{ck}} = 3.33 \text{ とする。}$$

ここに $\left\{ \begin{array}{l} b_0 : \text{載荷板の周長(cm)} \\ d : \text{有効高さ(cm)} \\ \sigma_c : \text{コンクリートの圧縮強度(kgf/cm}^2\text{)} \\ p : \text{鉄筋比} \\ \sigma_{sy} : \text{鉄筋の降伏応力度(=3500kgf/cm}^2\text{)} \end{array} \right.$

表-5 に実験値と角田式計算値の比較を示す。これから、軽量コンクリートを用いることにより押抜きせん断耐力は普通コンクリートの場合に比べて角田式による計算値に対する実験値の割合が約 35% 低減することがわかる。

表-4 実験値と松井式計算値の比較

No.	実験値 (kN)	松井式 (kN)	実験値/松井式
1	121.6	201.4	0.60
2	167.7	274.7	0.61
3	163.8	274.9	0.60
4	209.9	380.7	0.55
5	199.1	309.2	0.64
6	188.3	315.3	0.60
平均			0.60
変動係数			4.97 (%)

表-5 実験値と角田式計算値の比較

No.	実験値 (kN)	角田式 (kN)	実験値/角田式
1	121.6	173.3	0.70
2	167.7	256.8	0.65
3	163.8	256.5	0.64
4	209.9	329.1	0.64
5	199.1	322.8	0.62
6	188.3	333.8	0.56
平均			0.64
変動係数			7.10 (%)

4. 松井式の軽量床版への適用

わずか 6 体の供試体であるが、松井および角田の提案する式のいずれも平均値が 60% あるいは 64% であり、変動係数も小さい。平均値は普通 RC 床版でも松井の提案式が小さい値を与えるため¹⁾この軽量コンクリートでも同様な結果が得られていることは破壊荷重の評価にいずれも適用できるものと考えられる。ここでは松井の提案式のみについて検討することとした。

4.1 低減係数の定義

実験結果より軽量コンクリートでは押抜きせん断耐力が普通コンクリートの約 40% 低下する

ことが分かった。そこで、松井式全体に対し低減係数 0.58 を乗すことにより、本研究で使用した人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートに対する耐力算定式として適応した。この修正方法を修正方法(A)とし、その結果を表-6 に示す。これより、理論値に対する実験値の割合は 1.04 となり良い精度が得られることが分かる。また、変動係数も同じ 4.97% となる。

4.2 引張強度の影響

軽量コンクリートでは普通コンクリートに対し引張強度が低下することが知られている。本研究での軽量床版における強度低下の原因はこの引張強度の低下が主な要因となっていると考えられる。しかし、松井式では耐力の計算における最大せん断応力度および最大引張応力度をコンクリートの圧縮強度から算定している。本研究における配合では軽量コンクリートでは 28 日引張強度が 0.98 N/mm^2 となり同様の設計基準強度では約 2.45 N/mm^2 となることが分かった。そこで、この点を松井式に考慮する必要があると考えられる。本研究では圧縮強度の項に軽量コンクリートと普通コンクリートの引張強度の比を乗した。以下に式(1)における修正部分を記す。

τ_{smax} : コンクリートのせん断強度 (N/mm^2)

$$\tau_{smax} = 0.252 (\sigma_{lt}/\sigma_t) \sigma_{ck}$$

$$- 0.00251 (\sigma_{lt}/\sigma_t)^2 \sigma_{ck}^2$$

ただし、 $\sigma_{ck} \geq 49 \text{ (N/mm}^2)$ の時

$$\tau_{smax} = 0.784 ((\sigma_{lt}/\sigma_t) \sigma_{ck})^{0.553}$$

σ_{tmax} : コンクリートの引張強度 (N/mm^2)

$$\sigma_{tmax} = 0.269 ((\sigma_{lt}/\sigma_t) \sigma_{ck})^{2/3}$$

σ_{lt} : 軽量コンクリートの引張強度 (N/mm^2)

σ_t : 普通コンクリートの引張強度 (N/mm^2)

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

以上の修正を修正方法(B)とし、これによって得られた計算値を理論値 1 とし表-7 に示す。この結果から軽量コンクリートの引張強度を考慮することにより耐力算定式の精度はほぼ実験値と同様の値が得られることが分かる。また、変動係数も 4.67% となっており低減係数を考慮したものよりもばらつきが小さくなる。また、修正方法(B)におい

表-6 実験値と修正方法(A)の比較

No.	実験値 (kN)	理論値 (kN)	実験値/理論値
1	121.6	116.8	1.04
2	167.7	159.3	1.05
3	163.8	159.5	1.03
4	209.9	220.8	0.95
5	199.1	179.3	1.11
6	188.3	182.9	1.03
平均			1.04
変動係数			4.97 (%)

表-7 実験値と修正方法(B)の比較

No.	実験値 (kN)	理論値 (kN)	理論値2 (kN)	実験値/理論値	実験値/理論値2
1	121.6	116.6	88.2	1.04	1.38
2	167.7	158.4	117.4	1.06	1.43
3	163.8	158.5	117.6	1.03	1.39
4	209.9	217.5	153.9	0.97	1.36
5	199.1	178.4	133.0	1.12	1.50
6	188.3	182.2	136.8	1.03	1.38
平均				1.04	1.41
変動係数				4.67 (%)	

表-8 各供試体の換算床版厚

No.	供試体サイズ 縦×横×厚さ(mm)	換算床版厚 (mm)	増厚 (mm)	増厚率 (%)
1	1150×1150×100	180	80	80
2	1150×1150×130	235	105	81
3	1400×1400×130	235	105	81
4	1400×1400×160	285	125	78
5	1200×1200×150	272	122	81
6	1600×1600×150	265	115	77
平均				80

表-9 各供試体の自重の比較

No.	軽量床版 自重(kg)	普通床版 自重(kg)	床版変更時 自重(kg)	自重の増加 (kg)	自重増加率 (%)
1	224	331	405	74	22
2	292	430	528	98	23
3	435	637	783	146	23
4	534	784	950	166	21
5	367	540	666	126	23
6	653	960	1153	193	20
平均値					22

て σ_{tmax} の値に σ_{lt} を直接用いることによって得られた計算値を理論値 2 とし表-7 に示す。すると、理論値 2 に対する実験値の割合の平均は 1.41 となつた。

5. 床版厚に関する比較

5.1 軽量床版の換算床版厚

軽量床版では普通コンクリートを用いた RC 床版に対し強度が約 40% 低下することから、床版厚

を増加させなければならない。そこで、それぞれの床版において床版厚をどれくらい増加させれば普通コンクリートと同様の強度が得られるか求めた。また、床版厚の増加に伴い床版の自重はどれくらい増加するか算出した。その結果を表-8~9に示す。この結果より、普通コンクリート床版と同様の強度を得るために床版厚が増大し、その自重は普通コンクリート床版に対しても約20%の増加になる。

5.2 最小全厚の定義

コンクリートの最小全厚は道路橋示方書において以下の式により決められている。そして、床版厚16cmを下回ってはならないとしてある。

$$h = 3L + 11 \quad (\text{cm}) \quad (3)$$

ここに、 h ：最小全厚、 L ：スパン長（m）

本実験の載荷試験の結果および松井式より、鉄筋量同一の場合、軽量床版では普通コンクリートRC床版と同様の結果を得る為には普通コンクリート床版に対し約80%床版厚を増大しなければならないことが分かった。その場合、軽量床版の床版厚は29cmを下回ってはならない。また、鉄筋比同一の場合、軽量床版では普通コンクリートRC床版と同様の結果を得る為には普通コンクリート床版に対し約46%床版厚を増大しなければならない。その場合、軽量床版の床版厚は23.4cmを下回ってはならない。以上の結果をプロットすると図-6の様になる。また、軽量床版を用いるためには、プレストレスを導入することにより引張部分を減らし、床版厚を減少させることが期待される。

6. 結論

- 1) 軽量コンクリートを使用したRC床版では静的押抜きせん断耐力は約40%低下した。
- 2) 押抜きせん断耐力が低下する原因としては、人工軽量骨材を使用したコンクリートでは引張強度が普通コンクリートに比べ50%以下に低下することが考えられる。
- 3) 松井らの押抜きせん断耐力算定式に低減係数

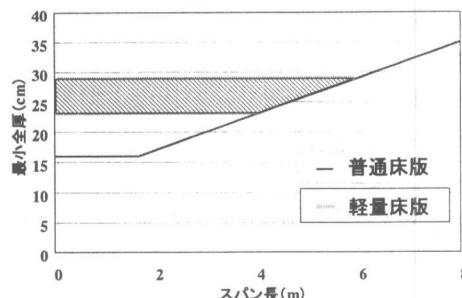


図-6 スパン長と最小全厚の関係

を考慮することにより、軽量コンクリート床版に適用できることが分かった。

- 4) 軽量コンクリートと普通コンクリートの引張強度の比を考慮することにより耐力算定式の計算値の変動係数は小さいものとなった。
- 5) 軽量RC床版では普通RC床版と同様の強度を得るために鉄筋量同一の場合は約80%，鉄筋同一の場合は約46%床版厚を増大する必要がある。
- 6) 軽量床版に対する最小全厚は普通コンクリート床版の最小全厚よりも厚くなる。軽量床版を用いるためには、プレストレスを導入する事が期待される。

謝辞

本研究においては、山口大学大学院の光木俊治氏に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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、土木学会論文集、第348/V-1, pp.113-141, 1984.8
- 2) 東山浩士、松井繁之 他：PC床版の押抜きせん断耐力について、プレストレストコンクリート技術協会 第7回シンポジウム論文集, pp.13~16, 1997-10
- 3) 角田与史雄、井藤昭夫、藤田嘉夫：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第229号, pp.105-115, 1974.9