

軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版に関する研究

(株)IHIインフラ建設 正会員 ○小林 崇
 (株)IHIインフラ建設 正会員 郷保 英之
 日本メサライト工業(株) 石川 寛範
 大阪大学名誉教授 工博 松井 繁之

Abstract : In Japan, existing highway bridges used over fifty years are increasing and retrofitting of the deteriorated slabs on those bridges is required to use the bridges another fifty years. For retrofitting the damaged slabs, a precast pre-stressed concrete slabs using lightweight concrete of class-2 has been studied. In the study, material tests and structural characteristic verification tests of the precast PC slabs were carried out. The characteristics of the lightweight concrete of class-2 were verified to meet the specified performance requirements. Also, the flexural strength and punching shearing capacity of the precast PC slab were proved to be enough for actual slabs on highway bridges.

Key words : replacement of damaged RC slab, lightweight class2 concrete, precast PC slab, flexural and punching shear strength

1. はじめに

近年、我国では橋梁のストック数が膨大になり、供用期間が50年に達する橋梁数も大きく増加している。このため、これらの橋梁では老朽化が進んでおり、特に鋼橋のRC床版の損傷が大きく、大規模補強や取替えが各道路機関で検討されている。この取替えに当たってはプレキャスト床版が採用されることが主であるが、主桁や下部工への負担を増加させないように床版の軽量化が要求される。その一つとして、軽量コンクリート1種を用いたプレキャストPC床版の実用が報告されている¹⁾。今回、既設RC床版に軽量コンクリートが使用されている場合や都市高速道など下部工の補強が困難な場合では、更なる床版の軽量化が求められるため、図-1に示す軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の開発を行った。

本稿は、軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の構造特性の確認を目的として行った載荷試験の結果について報告するものであり、特に軽量コンクリートの弱点と考えられている押抜きせん断耐力について、既往の研究結果との比較検討を行い、軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の押抜きせん断特性について考察を行うものである。

2. 軽量コンクリート2種の特徴

軽量コンクリート2種（以下、軽量2種）を用いたプレキャストPC床版（以下、軽量2種床版）の開発にあたり、軽量2種に求めた性能を表-1に示す。

軽量2種の単位体積重量は、既設鋼主桁や下部工の補強の軽減、無補強を目指し、普通コンクリートの 23.0kN/m^3 に対して30%の軽減となる 16.5kN/m^3 以下とした。また、一般にプレ

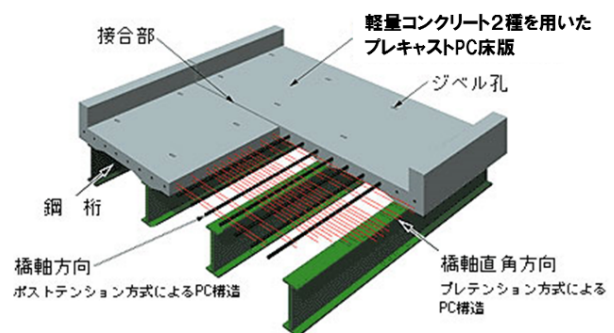


図-1 床版の構造概要

キャストPC床版に使用するコンクリートの圧縮強度は、プレストレス導入時で35N/mm²以上、材齢28日で50N/mm²以上とされている²⁾ことから、軽量2種に求める圧縮強度もこれと同等とした。なお、プレストレスの導入は、蒸気による促進養生後の材齢1日を想定している。

軽量2種の使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。一般に軽量コンクリートは、凍結融解作用に対する抵抗性が低いとされている。これに対して今回使用する軽量2種は、耐凍結融解性の向上を目的として細、粗骨材とも低含水状態(含水率2.0%以下)で使用し、凍結融解に対する抵抗性を有することを試験により確認している。また、品質の安定を目的として細骨材の一部に普通骨材を併用した。

後述する床版試験体における軽量2種の硬化コンクリート特性を表-4に示す。材齢28日における軽量コンクリートの圧縮強度に対するそのほかの強度は普通コンクリートの60~80%とされている³⁾。これに対して軽量2種の引張強度およびせん断強度は、以下に示す既往の研究式⁴⁾により圧縮強度 f'_c より式(1)で求められる普通コンクリートの引張強度に対して55%、式(2)で求められる同せん断強度に対して80%程度である。

$$f_t = 0.269 f'_c c^{0.667} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

$$f_{cv} = 0.656 f'_c c^{0.606} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

なお、表-4に示す引張強度は割裂引張強度試験(JIS A1113)、せん断強度は2面せん断試験(JSCE-G553)により得られた結果であり、バラつきを考慮した供試体数を10体とした試験の平均値であり、開発に際して実施したほかの試験でも同様の結果が得られている。

また、軽量化に伴い低下する軽量2種の静弾性係数は、一連の試験から材齢1日で17.0kN/mm²以上、材齢28日で18.5kN/mm²以上となることを確認しており、載荷試験にあたってはこれを設計値として床版試験体の設計を行った。

3. 軽量2種床版の曲げ耐荷特性

道路橋床版としての供用時の使用性、終局曲げ耐力の確認を目的として行った静的曲げ載荷試験について以下に述べる。

3. 1 試験方法

(1) 試験体概要

試験体は、床版支間3.0mの連続版を想定して床版厚を0.18mとし、床版支間方向にプレテンション方式によりプレストレスを導入した一方向PC版とした。

(2) 載荷方法

載荷試験に際して床版試験体の支持条件は単純支持とし、支間中央において荷重に対する曲げモーメントが床版支間3.0mの連続版と同等と

表-1 コンクリートの性能目標

材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
プレストレス導入時 (蒸気養生1日)	35 以上	16.5 以下
設計荷重作用時 (材齢28日)	50 以上	

表-2 使用材料

種類	種類	記号	備 考
セメント	早強ポルトランドセメント	HC	密度 3.14g/cm ³
細骨材	石灰砕砂	S	表乾密度 2.67g/cm ³ 滋賀県犬上郡産
	軽量細骨材	SL	絶乾密度 1.67g/cm ³ 低含水品 (含水率 0.3%)
粗骨材	軽量粗骨材	GL	絶乾密度 1.26g/cm ³ 低含水品 (含水率 0.2%)
混和剤	高性能減水剤	Fd	ホリカルボン酸エーテル系
	AE 剤	AE	変性アルキルカルボン酸化合物系

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	S/a (%)	air (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	HC	S	SL	GL
32.0	41.0	5.0	150	469	71	402	481

表-4 硬化コンクリート特性

材 齢	単位体積重量 (kN/m ³)	強度 (N/mm ²)				静弾性係数 (kN/mm ²)
		圧縮	引張	曲げ	せん断	
1 日	16.0	47.7	—	—	—	17.9
28 日	16.2	57.2	2.18	3.13	6.03	19.1

なるよう支点間隔を2.5mとして実施した。また、荷重は500mm間隔の2点荷重とした。荷重試験の概要図を図-2に示す。

3. 2 試験結果

本試験における荷重種類ごとの計算値と実験値を表-5に示す。ここで、ひび割れ発生荷重は、有効プレストレスを導入した床版試験体の下縁の応力が、コンクリートの曲げひび割れ強度に達する時点、鉄筋降伏荷重は下側鉄筋の応力が降伏強度 (f_{yd}) に達する時点、PC鋼材降伏荷重は下側PC鋼材の応力が第1降伏点 ($0.84f_{ud}$) に達する時点、破壊荷重はコンクリート上縁ひずみが3500 μ に達する時点の曲げモーメントよりこの時の荷重を算出した。

支間中央における荷重-たわみの関係を図-3に、破壊状況を図-4に示す。ひび割れ発生荷重の実験値は計算値に対して若干大きい値を示したが、荷重とたわみの関係は計算値と実験値で概ね一致、載荷荷重428kNで曲げ圧縮により破壊した。

これより軽量2種床版は、使用するコンクリートの軽量化に伴う静弾性係数の低下により荷重に対するたわみ量が増加するが、その挙動は計算通りであり、曲げ耐力は計算値を有することが確認された。

4. 軽量2種床版の押抜きせん断耐荷特性

軽量2種床版では、コンクリートの軽量化に伴い低下が予想される押抜きせん断耐力に対して、プレストレスの導入により耐力の向上を図っている。ここでは、軽量2種床版の押抜きせん断耐力の確認を目的として行った静的押抜き載荷試験について記述する。

4. 1 試験方法

(1) 試験体概要

試験体は、押抜きせん断に対して最も厳しくなるよう床版厚が道路橋示方書における最小床版厚0.16mとなるよう床版支間2.5mの連続版を想定し、床版支間方向にプレテンション方式によりプレストレスを導入した一方向PC版である。試験体の概要を図-5に示す。

(2) 載荷方法

押抜き載荷試験は4辺で支持した床版に対して面載荷を行い、押抜きせん断耐力を確認する。

試験は、支点間隔を1.0mとして100×100mmの面載荷に

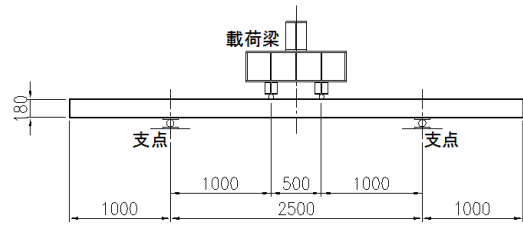


図-2 載荷試験概要

表-5 計算値と実験値の比較

荷重種類	計算値 (kN)	実験値 (kN)
ひび割れ発生荷重	121	140
鉄筋降伏荷重	329	—
PC鋼材降伏荷重	367	—
破壊荷重	383	428

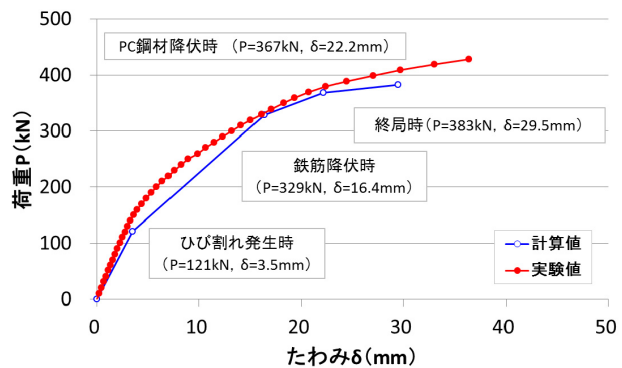


図-3 荷重と床版たわみの関係

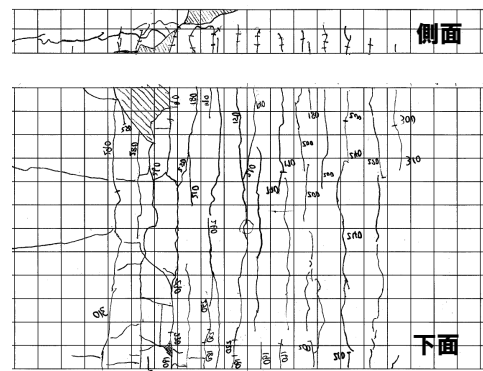


図-4 床版破壊状況

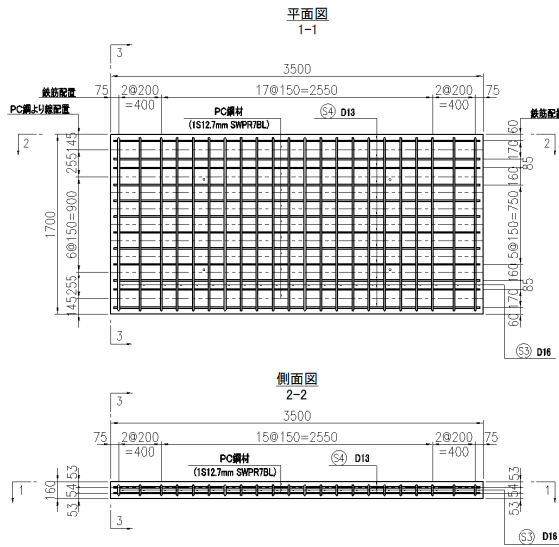
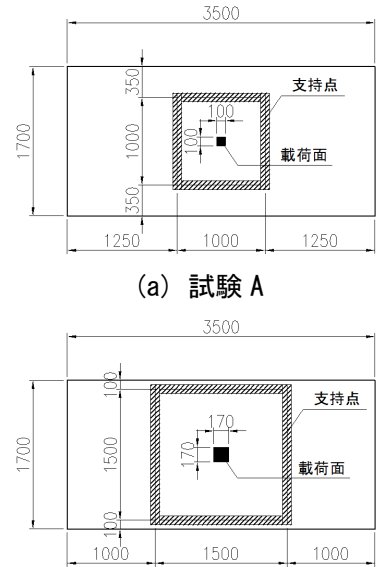


図-5 試験体概要

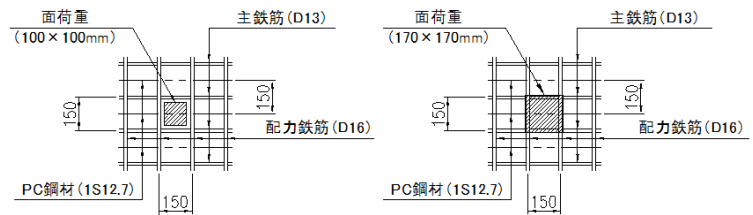


(a) 試験 A

(b) 試験 B

図-6 載荷面と支持点の位置関係

より鉄筋の間を押し抜く載荷条件での耐力評価を目的とした試験 (以下, 試験A) と, 支点間隔を1.5mとして170×170mmの面載荷により鉄筋上を押し抜く載荷条件での耐力評価を目的とした試験 (以下, 試験B) とした。図-6に載荷面と支持位置の関係を, 図-7に載荷面と鉄筋配置の関係を示す。



(a) 試験 A

(b) 試験 B

図-7 載荷面と鉄筋配置の関係

4. 2 試験結果

本試験条件での押抜きせん断耐力の計算値と実験値を表-6に示す。ここで押抜きせん断耐力の計算値は, 東山らで提案する以下のPC床版の押抜きせん断耐力の評価式(3)⁵⁾により算出した。ここで, コンクリートの引張強度, およびせん断強度は表-4に示す実験値を用いており, 破壊面の角度は配力筋方向 (RC方向)は45°, 主鉄筋方向 (PC方向)はコンクリートの引張強度およびプレストレス導入量より算定された27°としている。

実験値は, 試験A・Bとも計算値に対して小さい結果であった。

$$P = [\tau_{s_{max}} \{ 2 (a+2x_m / \tan \theta_m) x_d / \tan \theta_d + 2 (b+2x_d / \tan \theta_d) x_m / \tan \theta_m \} + \sigma_{t_{max}} \{ 2 (a+2d_m / \tan \theta_m) C_d + 2 (b+2d_d / \tan \theta_d + 4C_d) C_m \}] \quad (3)$$

ここで, a, b: 載荷板の主鉄筋方向, 配力鉄筋方向の辺長 (mm)

x_m, x_d : 主鉄筋および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断面の中立軸 (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 (mm)

$\tau_{s_{max}}$: コンクリートのせん断強度 (N/mm²)

$\sigma_{t_{max}}$: コンクリートの引張強度 (N/mm²)

θ_m, θ_d : 主鉄筋方向, 配力鉄筋方向の破壊面角度 (= 1/2 · tan⁻¹(2 τ_{cr} / σ_p)) (°)

τ_{cr}: せん断ひび割れ強度 (= 1.005√(σ_{t_{max}}² + σ_{t_{max}} · σ_p)) (N/mm²)

σ_p: 導入プレストレス (N/mm²)

表-6 計算値と実験値の比較

項目	試験 A	試験 B
計算値 (kN)	513	649
実験値 (kN)	449	506
実験値/計算値	0.87	0.78

4.3 考察

軽量2種床版の押抜きせん断耐荷力について考察結果を表-7に示し、各考察について詳述する。なお、比較として示す普通PC床版は、圧縮強度やプレストレスの導入量などを同等とし、コンクリートの引張・せん断強度については式(1)、(2)を用いて算出している。

(1) 破壊面角度の影響

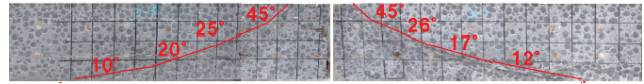
試験Aの破壊断面を図-8に、試験Bの破壊断面を図-9に示す。前述のように押抜きせん断耐力の計算では主鉄筋方向の破壊面の角度は27°としている。試験Aの破壊面角度はほぼ27°であるのに対して試験Bでは下縁に繋がるひび割れは20°で、内側に点線で示す30°程度のひび割れを生じている。ここで、試験Bにおいて考慮する破壊面を最も内側に生じたひび割れ面と仮定し、破壊面の角度を30°として耐力を算定した(計算値①)。

(2) 軽量骨材の破壊の影響

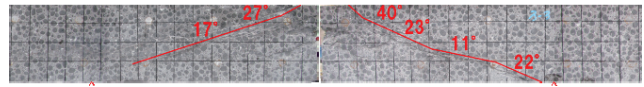
式(3)は、第1項目は主鉄筋方向および配力筋方向の圧縮域コンクリートのせん断耐力、第2項目は引張側鉄筋部でダウエル効果によるかぶりコンクリートのはく離耐力として構成されている。東山らは軽量コンクリートのかぶり部のはく離破壊が、粗骨材自身の割裂破壊を伴うものとして、引張強度の低下とは別にダウエル力の低下としてはく離耐力を70%に減じた軽量RC床版の押抜きせん断耐力算定式を提案している⁴⁾。軽量2種床版はPC床版であるが、はく離破壊時には同様に粗骨材の割裂破壊を伴うと考えられることから、軽量2種床版でも同様に70%に減じる(計算値②)。なお、東山らはせん断耐力についても80%に減じているが、せん断耐力はRC床版とPC床版で機構が異なるものとしてここでは考慮しないものとした。

(3) はく離破壊部の応力欠損

前述の式(3)では図-10に示す斜線部を引張側鉄筋位置のダウエル力によるはく離破壊領域として押抜きせん断耐力を評価している。しかし、鉄筋の配置

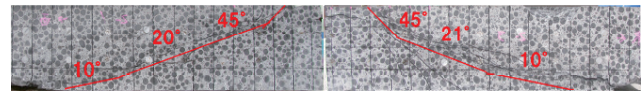


(a) 配力筋方向 (RC 方向)

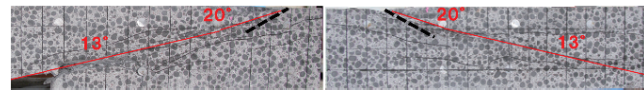


(b) 主鉄筋方向 (PC 方向)

図-8 破壊断面 (試験 A)



(a) 配力筋方向 (RC 方向)



(b) 主鉄筋方向 (PC 方向)

図-9 破壊断面 (試験 B)

表-7 押抜きせん断耐力の修正計算

項目	単位	軽量2種床版		普通PC床版	
		試験 A	試験 B	試験 A	試験 B
① 破壊面角度の影響を考慮					
破壊面角度	度	27	30	32	32
せん断耐力	kN	352	420	265	363
はく離耐力	kN	161	178	277	320
計算値①	kN	513	598	542	683
② 計算値①に骨材の破壊の影響を考慮					
はく離耐力×70%	kN	113	125	—	—
計算値②	kN	464	545	542	683
③ 計算値②にはく離破壊部の応力欠損を考慮					
欠損耐力	kN	17	17	44	44
計算値③	kN	447	528	498	639
実験値/計算値③		1.00	0.96	—	—

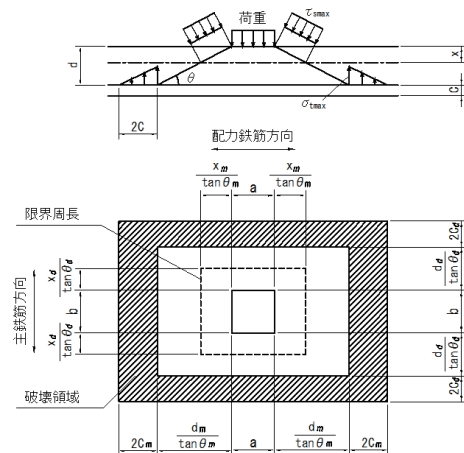


図-10 押抜きせん断破壊モデル⁵⁾

やかぶり, 載荷板の大きさ, 床版厚の組合せによって図-11で斜線部で示す四隅の角部は同時に破壊しない場合がある⁶⁾。破壊後に床版下面で行った打音検査において, 四隅の一部ではく離部の欠損が確認されたことから, ここでは四隅が欠損したと仮定して耐力を算定した(計算値③)。

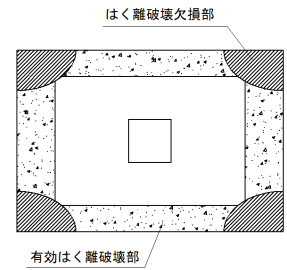


図-11 はく離破壊部の応力欠損⁶⁾

4.4 軽量2種床版の押抜きせん断耐力

以上の考察より, 軽量2種床版の押抜きせん断耐力は普通PC床版に対して10~17%程度低下するが, ダウエル力の低下などを考慮することで実験値は式(3)を準用した計算値と一致することが確認できた。

最後に, 実橋で軽量2種床版に2方向PC版を採用した場合の輪荷重に対する押抜きせん断耐力について, 前述の考察をもとに, 破壊面角度を30°と仮定して推算した結果を表-8に示す。

輪荷重を想定した200×500mmの面荷重に対する軽量2種床版の押抜きせん断耐力は1,119kNであり, 法定軸重の片車輪分(50kN)に対して20倍を超える耐力を有するものと推察される。

表-8 輪荷重に対する押抜きせん断耐力

項目		単位	数値
載荷面の辺長	橋軸方向	mm	200
	橋軸直角方向		500
破壊面角度	橋軸方向	度	30
	橋軸直角方向		30
せん断耐力		kN	889
はく離耐力(×70%)		kN	230
四隅の欠損耐力		kN	21
押抜きせん断耐力		kN	1,119

5. まとめ

既設のRC床版に取替え工事に用いる軽量コンクリート2種を用いたプレキャストPC床版の構造特性の確認を目的として実施した静的曲げ・押抜きせん断試験をによって得られた知見を以下に示す。

- ・軽量2種床版は, コンクリートの軽量化に伴う静弾性係数の低下により荷重に対するたわみ量が増加するが, その挙動は計算で追跡できる。しかし, 曲げ耐力は計算値を上回った。
- ・破壊面角度, ダウエル力の低下などを考慮することにより, 既往の研究式(3)により軽量2種床版の押抜きせん断耐力を算定可能である。
- ・軽量2種床版は法定軸重に対して十分な押抜きせん断耐力を有する。

本試験により軽量2種床版は, 道路橋床版としての性能を有することが確認された。軽量2種床版では, 押抜きせん断力に対する破壊面の角度が算定値と実験値で異なる可能性があり, 押抜きせん断載荷試験を追加で行い破壊面角度を確認する予定である。また, 橋軸方向にもプレストレスを導入した2方向PC版により輪荷重走行疲労試験を実施し, 疲労耐久性を検証する予定である。

【参考文献】

- 1) 堂前満・中村定明・澤大輔・立松博・小野辺良一: 軽量化・高耐久化を実現する「HSLスラブ」道路橋RC床版取換用高強度軽量プレキャストPC床版, セメント・コンクリート, No.702, 2005.8
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC床版設計・施工マニュアル(案), 1999.5
- 3) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリートライブラリー第56号, 1985.6
- 4) 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, 第16巻第1号, 2005.1
- 5) 東山浩士・太田博士・朴滄珍・松井繁之: 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, 1997.10
- 6) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984