

(140) 高性能軽量コンクリートを用いたPCはり部材のせん断耐力

ドーピー建設工業(株) 技術センター 正会員 ○濱田 謙
 同 上 正会員 田村 聖
 太平洋セメント(株) 清澄研究所 前堀 伸平
 東京工業大学 工学部 正会員 二羽淳一郎

1. はじめに

最近、従来の人工軽量骨材と比較して、格段に高強度で、吸水率が低い高性能軽量骨材が開発された[1]。この高性能軽量骨材を利用すれば、耐久性に優れた構造用軽量コンクリートが製造でき、桁やスラブなどのコンクリート上部構造の重量を大幅に低減できる。また、構造物の軽量化・スレンダー化により、運搬用重機の利用率の軽減やセメント消費量の減少などの利点ももたらされ、エネルギー・環境面でも大きな効果が期待できる。したがって、高性能軽量骨材は、21世紀に向けた環境に優しい建設材料であるといえる。

しかしながら、軽量コンクリートはりのせん断耐力は同じ圧縮強度を有する普通コンクリートはりより低下することが知られているので、利用に際しては、高性能軽量コンクリートはりのせん断耐力を定量的に評価しておく必要がある。本研究では、高性能軽量コンクリートをPC部材に適用することを念頭におき、45N/mm²および60N/mm²の圧縮強度を有する高性能軽量コンクリートを用いたRCはりおよびPCはりのせん断試験を実施し、プレストレスによるせん断耐力改善効果を検証した。PCはりのプレストレス量は、比較的少量の3.0 N/mm²とした。これに加え、支間60mのPC箱桁道路橋の試設計を実施し、高性能軽量コンクリートの適用に伴うPC箱桁の桁重量低減効果を検証した。

2. 高性能軽量コンクリート

2.1 使用材料とコンクリートの配合

使用材料の物理特性を表-1に示す。造粒型の高性能軽量粗骨材(以下、HLAと称す)では、骨材内部に微細な独立気孔が均質に分散している。そのため、比重が0.8および1.2であるにもかかわらず、従来の非造粒型軽量骨材と比較して圧壊強度は2倍以上に改善されている。また、ポンプ圧送などの施工性や、凍害などの耐久性に大きく影響を及ぼす吸水率はそれぞれ5%および3%であり、従来の1/3~1/5に低減されている。

コンクリートの配合を表-2に示す。45N/mm²以上の高強度を得るため、水セメント比(W/C)は30%とした。45LCは、コンクリートの比重を小さくするために、細骨材には川砂と従来型の人工軽量骨材を用い、粗骨材には比重0.8のHLAを用いた。60LCは、弾性係数を大きくするために、細骨材には川砂を用い、粗骨材には比重1.2のHLAと川砂利を用いた。

表-1 使用材料の物理特性

材 料	仕 様	比 重	吸 水 率 (%)	最大寸法 (mm)	P _{max} † (N)	備 考	† P _{max} (一軸圧壊強度)
セメント	C 普通ポルトランドセメント	3.15					
細骨材	CLA 軽量骨材(従来品)	1.15*	6.75**			* 絶乾状態	
	RS1 川砂(大井川産)	2.61	1.41			** 24時間吸水率	
	RS2 川砂(天竜川産)	2.60	1.81				
粗骨材	HLA1 高性能軽量骨材 Ⅰ	0.82*	5.06**	15	1120	Ⅰ 造粒型	
	HLA2 高性能軽量骨材 Ⅱ	1.21*	2.62**	15	1610		
	RG 川砂利(大井川産)	2.64	0.87	20			
高性能AE減水剤	SP ポリカルボン酸系						
AE剤	AE						

表-2 コンクリートの示方配合

呼名	目標圧縮強度 (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)							SP (C×%)	AE (C×%)	
					細骨材			粗骨材						
					W	C	CLA*	RS1	RS2	HLA1*	HLA2*			RG
45LC	45	30.0	46	5.0	150	500	152	295	127	287	-	-	2.24	0.2
60LC	60		45		150	500	-	450	300	-	330	210	1.10	-

*: 絶乾比重

2.2 高性能軽量コンクリートの強度特性

材齢 28 日で実施したコンクリートの強度試験結果を表-3 に示す。45LC および 60LC とも、圧縮強度はほぼ目標強度に達している。45LC の比重は 1.63 であり、軽量化が図れていることがわかる。また、60LC の弾性係数は、同じ強度を有する普通コンクリートの約 80% であり、従来の軽量コンクリートより高弾性化が図られている。しかし、圧縮強度に対する引張強度の比率(f_t/f_c)は、いずれも 1/16~1/17 の範囲にあり、従来の軽量コンクリートと同様に普通コンクリートより低下した。

コンクリートの破壊エネルギーは、図-1 に示すようなスパン中央部に切欠きを有する無筋のコンクリートはりの三点曲げ試験より求めた。コンクリートはりの断面寸法は 100×100mm であり、切欠き高さは 50mm とした。

載荷スパンは 300mm とし、切欠き上部から変位制御で載荷を実施した。破壊エネルギーは式(1)を用いて計算した。

表-3 コンクリートの物理特性

	コンクリート強度 (N/mm ²)		比重	弾性係数 (kn/mm ²)	f_t/f_c	破壊エネルギー (N/m)
	圧縮強度 f_c	引張強度 f_t				
45LC	47.0	3.01	1.63	18.7	1/16	54.7
60LC	58.8	3.42	1.99	27.2	1/17	82.5

$$G_F = \frac{W_0 + mg \cdot \delta_0}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここで、 G_F : 破壊エネルギー(N/m)

W_0 : 荷重変位曲線下の面積(N・m)

m : 支点間の梁の質量(kg)

δ_0 : 破断時の梁のたわみ(m)

A_{lig} : 梁の破断部分の面積(m²)

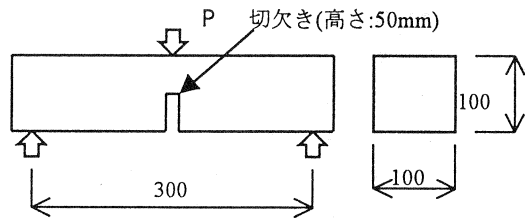


図-1 破壊エネルギー試験供試体

すべてのコンクリートはりは、最大荷重以降急激な破壊を起こし、脆性的な破壊性状を示した。45LC および 60LC の破壊エネルギーは、CEB-FIP Model Code に示される普通コンクリートの計算値の 53% および 83% 程度にそれぞれ低下した。これは、破壊のメカニズムが異なるためである。すなわち、普通コンクリートでは、マイクロクラックのほとんどが、モルタル部分あるいはモルタル部と粗骨材との界面に粗骨材を迂回する形で分散して発生し、徐々にひび割れが伸展する。一方、軽量骨材コンクリートでは、マイクロクラックが粗骨材内部にも発生する。また、マイクロクラックは、ひび割れ断面付近に集中して発生し、ひび割れが一気に伸展して急激に破壊に至るためと考えられる。

3. 高性能軽量コンクリートはりのせん断試験

3.1 試験概要

供試体の概要と寸法を表-4 および図-2 に示す。供試体数は全部で 12 体であり、RC はりおよび PC はりをそれぞれ 6 体作成した。コンクリートには、表-3 に示す 45LC および 60LC の HLA コンクリート

を使用し、せん断補強鉄筋比を変化させた。すべてのPCはりには、断面下縁にPRC部材に導入される程度の少量のプレストレス3.0N/mm²を導入した。供試体の断面寸法は、幅(b_w)200mm、はり高さ(h)350mm、有効高さ(d)300mmである。

せん断破壊に先行して曲げ破壊を生じないように、すべての供試体において引張鋼材には直径26mmの異形PC鋼棒(A_p=530.9mm², f_{py}=1000N/mm²)を使用した。引張鋼材比は、1.77%である。プレストレスは、この異形PC鋼棒を用いてプレテンション方式により導入した。はり端部のPC鋼棒の付着性能を改善し、プレストレスの導入に伴うPC鋼棒の滑り込みを制御するため、すべての供試体において、PC鋼棒はアンカープレートとナットを用いて定着した。スターラップには直径6mmの異形鉄筋(A_s=31.67mm², f_{wy}=376N/mm²)を使用した。スターラップの配置間隔をパラメータとして、せん断補強レベルを変化させた。

載荷方法は、せん断スパン(a)1050mm、せん断スパン有効高さ比(a/d)3.5の対称2点載荷とした。計測項目は、支間中央断面のコンクリート上縁ひずみ、PC鋼棒ひずみおよび変位である。また、図-2に示すように、せん断スパン内においてスターラップひずみを計測した。

3.2 試験結果および考察

供試体のせん断耐力を表-5に示す。せん断耐力の計算値は、圧縮斜材の角度を45°とした修正トラス理論に基づいて算定した。その際に、RCはりのせん断耐力のコンクリート分担分(V_c)は、土木学会コンクリート標準示方書(以下、標準示方書と称す)のせん断補強筋のないRCはりのせん断耐力評価式の基礎となった式(2) [2]により算定した。PCはりのコンクリート分担分は、せん断耐力に及ぼすプレストレスの効果を、デコンプレッションモーメントM₀で評価する方法(M₀法)および曲げひび割れモーメントM_{cr}で評価する方法(M_{cr}法)でそれぞれ算定した。M₀法およびM_{cr}法によるPCはりのせん断耐力評価式を、式(4)および式(5)にそれぞれ示す。M₀法は、標準示方書と同様に、プレストレスによるデコンプレッションモーメントと曲げ耐力(M_u)の関数 [1+2M₀/M_u] をV_cに乗ずる方法 [3] である。一方、M_{cr}法は、プレストレスに

表-4 供試体の概要

		f _{c,targ} (N/mm ²)	σ _{pe} (N/mm ²)	γ _w (%)	供試体数
45LC	RC	45	0.0	0, 0.16, 0.32	3
	PC		3.0		3
60LC	RC	60	0.0	0, 0.16, 0.32	3
	PC		3.0		3
Total					12

f_{c,targ}:コンクリートの圧縮強度の目標値

σ_{pe}:断面下縁の有効プレストレス

γ_w:せん断補強鉄筋比(γ_w=100A_w/(b_w·s))

s:スターラップ配置間隔

γ _w =0.00	スターラップ無し
γ _w =0.16	s=200mm
γ _w =0.32	s=100mm

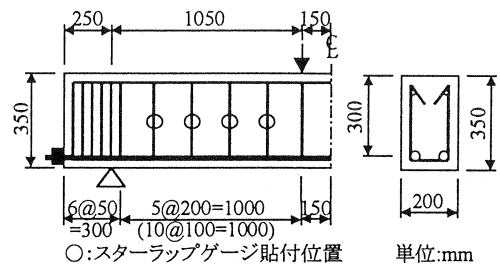


図-2 供試体概要図

表-5 実験結果

	γ _w (%)	RCはり			PCはり					RC vs. PC	
		せん断耐力 (kN)		V _{u,calRC}	せん断耐力 (kN)			V _{u,calMo}	V _{u,calMer}	V _{u,expPC}	V _{u,calMer}
		実験値	計算値		実験値	計算値					
45LC	0.00	52.4* ^D	70.8	0.74	135.3* ^S	86.1	115.1	1.57	1.18	2.58	1.63
	0.16	111.7* ^S	101.8	1.10	164.3* ^S	117.2	146.1	1.40	1.12	1.47	1.44
	0.32	152.4* ^S	132.9	1.15	183.3* ^S	148.3	177.2	1.24	1.03	1.20	1.33
60LC	0.00	63.7* ^D	76.3	0.84	155.4* ^S	90.0	129.2	1.73	1.20	2.44	1.69
	0.16	127.6* ^S	107.3	1.19	176.9* ^S	121.1	160.3	1.46	1.10	1.39	1.49
	0.32	176.7* ^S	138.4	1.28	175.1* ^F	152.1	191.4	1.15	0.91	0.99	1.38

*: 供試体はりの破壊形式:

*^D: 斜め引張破壊

*^S: せん断圧縮破壊

*^F: 曲げ破壊

より曲げひび割れモーメントが増加することに着目し、曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量 (M_{cr}/a) を V_c に加算する方法 [4] である。なお、 M_0 および M_{cr} は、P C 鋼材ひずみの実測値を用いて計算した有効プレストレスに基づいて算定した。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} p_w^{1/3} d^{-1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] \times b_w \cdot d \quad (2)$$

$$V_{u.calRC} = V_c + V_s \quad (3)$$

$$V_{u.calMo} = V_c \times [1 + 2M_0/M_{cr}] + V_s \quad (4)$$

$$V_{u.calMer} = V_c + M_{cr}/a + V_s \quad (5)$$

- ここで、
 V_c : せん断補強鉄筋を用いないRC棒部材のせん断耐力
 V_s : せん断耐力に対するスターラップの分担分 ($=A_w f_{wy} d / (1.15s)$)
 $V_{u.calRC}$: RCはりのせん断耐力
 $V_{u.calMo}, V_{u.calMer}$: PCはりのせん断耐力 (M_0 法および M_{cr} 法)
 f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)
 p_w : 引張鋼材比 ($=100A_p / (b_w \cdot d)$)

図-3に、せん断破壊したはりのひび割れの状況例を示す。すべての供試体において、P C 鋼棒が降伏する前に斜めひび割れが発生し、せん断補強筋のないRCはり2体は斜めひび割れ発生と同時に斜め引張破壊した。しかし、その他の供試体はその後も荷重が増加し、曲げ破壊した60LCのP Cはり1体を除き、すべてせん断圧縮破壊した。

図-4は、せん断破壊した供試体について、せん断耐力の実験値と計算値の比率と γ_w の関係を示したものである。各国の規準において、せん断補強鉄筋のない軽量鉄筋コンクリート部材のせん断耐力 V_c は、同じ圧縮強度を有する普通鉄筋コンクリート部材の V_c より低減することが規定されている。標準示方書では、この低下率を70%としている。また、プレストレスの取り扱いについては明確にされていないので、せん断補強筋のない軽量P C部材のせん断耐力に対するコンクリート分担分についても、70%を乗じることになる。

せん断補強筋のない供試体 ($\gamma_w=0\%$) について比較すると、RCはりでは引張強度や破壊エネルギーが低下する影響を大きく受け、実験値と計算値の比率が80%程度に低下した。しかし、 M_0 法および M_{cr} 法より得られるP Cはりの実験値と計算値の比率はすべて1.0を上回っており、プレストレスを導入してひび割れを制御した場合は、低減率70%を乗じる必要はないと思われる。

せん断補強筋のある供試体について比較すると、各せん断耐力評価式は、P Cはりのせん断耐力を安全側に評価していることがわかる。したがって、本研究の γ_w の範囲では、せん断補強筋のある高性能軽量P Cはりに対しても、低減率70%を乗じる必要はないと思われる。なお、 M_{cr} 法は、P Cはりの

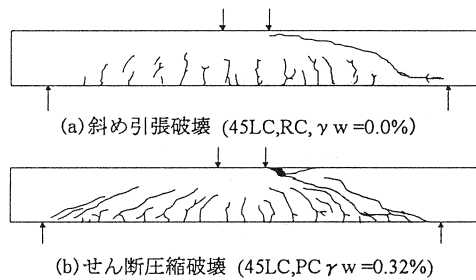


図-3 ひび割れ状況図

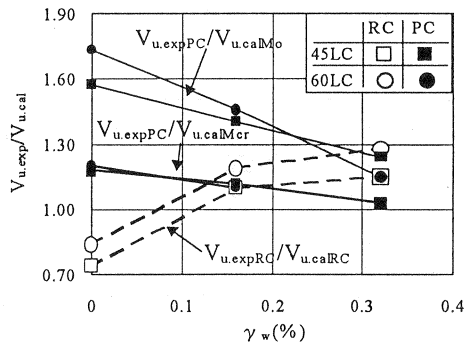


図-4 $V_{u.exp}/V_{u.cal} - \gamma_w$ 関係

せん断耐力を M_0 法よりも精度よく評価していることがわかる。

図-5は、せん断破壊を生じた供試体について、RCはりと同PCはりの実験値の比率およびRCはりと同PCはりの計算値(PCはり; M_{cr} 法)の比率をそれぞれ比較したものである。実験値の比率を比較した場合、PCはりのせん断耐力増加率は $\gamma_w=0$ で2.5倍程度となり、プレストレスによりせん断耐力が大きく改善されていることがわかる。しかし、 γ_w の増加に伴い、せん断耐力増加率は減少する。これは、せん断補強筋のあるRCはりのせん断耐力の増加によるものであるが、実験値の増加率は M_{cr} 法を用いた計算値の増加率とほぼ同じである。したがって、この増加率の減少は妥当なものであると考えられる。

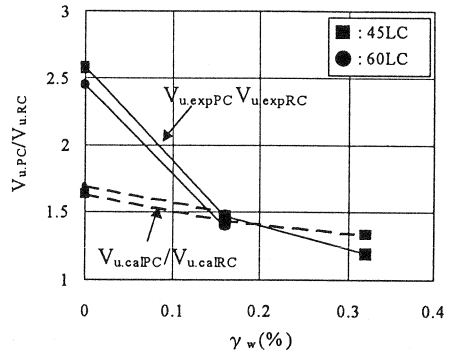


図-5 $V_{u,PC}/V_{u,RC} - \gamma_w$ 関係

4. PC箱桁道路橋の試設計結果

HLA コンクリートの適用に伴うPC橋の重量低減効果を検証するため、普通コンクリートおよびHLA コンクリートを用いたPC箱桁橋の試設計を行った。試設計では、PC単純箱桁のほぼ上限と考えられる支間60mのポストテンション方式PC単純箱桁橋を対象とした。表-6に試設計結果を示す。

普通コンクリートおよびHLA コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 とし、HLA コンクリートには60LCを適用した。道路橋示方書において、PC部材は、設計荷重作用時にひび割れが発生しないように設計するのが原則とされている[5]。また、標準示方書では、軽量コンクリートの引張強度を、同じ圧縮強度を有する普通コンクリートの70%としている。本試設計ではこれらの規定に従い、設計荷重作用時のコンクリートの曲げ引張応力度および斜め引張応力度が、道路橋示方書の許容応力度に70%を乗じた値以下になるように桁高およびPC鋼材量を決定した。

ケース1は、普通コンクリートを用いた従来のPC箱桁である。ケース2は、コンクリートにHLAコン

表-6 試設計結果

	ケース1 PC箱桁	ケース2 PC箱桁	ケース3 PC波形鋼板箱桁
コンクリート	普通コンクリート	高性能軽量コンクリート(60LC)	
断面寸法 (単位: mm)	標準断面 8000 支点断面 3000 3500 400 3800 600 1450 4800	標準断面 8000 支点断面 3000 2500 250 400 3800 600 1450 4800	標準断面 8000 支点断面 3000 3500 2620 400 3800 600 1450 4800
設計基準強度	50N/mm^2	50N/mm^2	
許容応力度	1.8N/mm^2 (引張) 1.2N/mm^2 (斜引張)	1.3N/mm^2 [= 1.8×0.7 (引張)] 0.8N/mm^2 [= 1.2×0.7 (斜引張)]	
単位重量(PC部材)	2.5tf/m^3	1.85tf/m^3 (= 1.70 (コンクリート) + 0.15 (鋼材))	
コンクリートの弾性係数	33kN/mm^2	21kN/mm^2	
桁高	3,500 mm	3,000 mm	3,500 mm
PC鋼材本数	12T15.2 (N=24) (内ケーブル方式)	12T15.2 (N=24) (内ケーブル方式)	内ケーブル-12T12.7 (N=10) 外ケーブル-12T15.2 (N=10)
上部工重量	1171.9 tf	863.5 tf (ケース2/ケース1 = 0.74)	625.1 tf (ケース3/ケース1 = 0.53)

クリートを適用したものである。両ケースの端支点断面および標準断面のウェブ厚は、鋼材の定着間隔、配置間隔およびかぶり厚等の構造細目より決定した最小ウェブ厚で、それぞれ600mmおよび400mmとした。

ケース1と同量のPC鋼材を配置した場合、コンクリートの軽量化に伴い、ケース2の桁高はケース1より500mm減少した。これに伴う有効高さの減少により、ケース2ではせん断耐力の低下が懸念されたが、せん断試験結果を考慮してせん断耐力に対するコンクリート分担分の低減を行わない場合は、ウェブ厚を増加する必要はなかった。また、標準示方書に従ってコンクリート分担分の低減を行なった場合でも、主桁の軽量化およびスターラップの増加により設計せん断耐力を確保できたので、本試設計の範囲においてはウェブ厚を増加する必要はなかった。結果として、HLAコンクリートを用いたPC箱桁の重量は、ケース1の74%に低減された。

ケース3は、ケース2のウェブに波形鋼板を適用したもので、さらにPC橋の軽量化を図ろうとしたものである。外ケーブルの使用によりPC鋼材の偏心量が減少するため、桁高さはケース1と同じになった。しかし、ウェブを波形鋼板に置き換えることにより、ケース3の桁重量はケース1の53%に低下し、合成構造にHLAコンクリートを適用するとPC箱桁の重量を飛躍的に低減できることが明らかとなった。桁重量がこの程度まで低減できると、基礎や下部工構造に対する負担も飛躍的に低減させることができるため、下部工の建設コストを大幅に削減できる。また、PC橋の適用スパンを拡大することが可能となり、新たなPC構造を創造することも可能となる。

5. 結論

本研究の結果として得られた結論を以下に示す。

- ① 高性能軽量コンクリートにおいても、圧縮強度に対する引張強度の比率(f_t/f_c)は、従来の軽量コンクリートと同様に普通コンクリートより低下した。また、破壊エネルギーも、破壊メカニズムの違いから普通コンクリートよりも低下した。
- ② 本研究の γ_w の範囲(0%~0.32%)においては、比較的少量のプレストレスしか導入されていない場合でも、高性能軽量PCはりのせん断耐力に対するコンクリート分担分に低減率を乗ずる必要はない。
- ③ せん断補強筋のない高性能軽量PC部材のせん断耐力は、曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量をRC部材の V_c に加算した M_w 法により精度よく算定できる。
- ④ 支間60mのPC箱桁道路橋の試設計を行った結果、高性能軽量コンクリートを用いたPC箱桁の重量は、普通コンクリートを用いた箱桁の74%に低減された。また、高性能軽量コンクリートを用いたPC箱桁のウェブに波形鋼板を適用すると、桁重量はさらに53%まで飛躍的に低減された。

参考文献

- [1] 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- [2] 二羽淳一郎, 山田一宇, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986.8
- [3] 土木学会: 平成8年制定・コンクリート標準示方書 [設計編], pp.60-65, 1997.6
- [4] 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメントPCはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16-2, pp.967-972, 1994
- [5] 日本道路協会: 道路橋示方書(I 共通編, IIIコンクリート橋編)・同解説, pp.110-116, 1996.12