

論文 石炭灰を主原料とした高性能人工骨材を用いた PC 梁の載荷実験

桜田道博^{*1}・鈴木基行^{*2}・渡辺浩良^{*3}・村井伸康^{*1}

要旨：石炭灰を主原料とする高性能人工軽量骨材の PC 構造物への適用性を検討するため、プレテンション方式により PC 梁供試体を製作し、その曲げ破壊実験、せん断破壊実験、および PC 鋼材の応力度測定を行った。その結果、曲げ耐力、せん断耐力、曲げひび割れ幅、PC 鋼材の定着長および有効プレストレスは天然普通骨材を使用したものと同程度であり、本骨材を使用した PC 梁は通常のものと同程度の性能を有していることが判明した。

キーワード：石炭灰、軽量骨材、PC 梁、曲げ耐力、せん断耐力、有効プレストレス

1. はじめに

近年、産業廃棄物である石炭灰を主原料とした高性能な人工軽量骨材(以降、FAA)がいくつか開発されている^{1),2)}。これらは軽量、低吸水、高強度であるうえ、アルカリ骨材反応に対しても無害なため、これらを PC 橋に適用することで①産業廃棄物のリサイクル、②構造物の軽量化・長スパン化・高耐久性化、③軽量化に伴う施工の合理化およびコスト縮減、等が可能になると考えられる。しかしながら、人工軽量骨材を使用したコンクリートは一般に、ヤング係数、引張強度、付着強度等が通常のコンクリートに比べ小さいため、これらを PC 橋へ適用するには、梁としてのひび割れ性状、曲げ破壊性状、せん断破壊性状、PC 鋼材の定着長、有効プレストレス、等を確認する必要がある。そこで、FAA のうち絶乾密度が異なる 2 種類について PC 梁を製作し、曲げ破壊実験、せん断破壊実験および PC 鋼材応力度の測定を行い、天然普通骨材を使用したものとの比較検討を行った。実験に使用した 2 種類の FAA および天然普通骨材の絶乾密度はそれぞれ、1.81kg/l、1.32kg/l および 2.78kg/l であり以降それぞれ、TL、UL および N と記す。

2. 実験概要

2.1 曲げ破壊実験(シリーズ 1)

供試体一般図、供試体諸元をそれぞれ図-1 および表-1 に示す。PC 鋼材には 1S15.2 を使用し、プレストレスの導入はプレテンション方式により行った。供試体は、通常の曲げ破壊(PC 鋼材降伏後、梁上縁コンクリートが圧壊)を起こすよう設計した。せん断破壊が先行しないようせん断支間部にはせん断補強鉄筋を配置した。載荷は単純支持した供試体を 2 点載荷して行った。この実験では骨材の種類が PC 梁の破壊形態、曲げ耐力、ひび割れ分散性およびひび割れ幅に及ぼす影響を検討した。計測項目は載荷荷重、支間中央部の変位、梁上縁のひずみ、ひび割れ幅、PC 鋼材応力度、等とし、ひび割れ状況の観察も併せて行った。

表-1 供試体の諸元(シリーズ 1, シリーズ 3)

シリーズ	供試体番号 ¹⁾	部材種類	骨材種類	断面寸法		鋼材間隔(mm)	導入プレストレス力 ²⁾ P _e (kN)
				幅 b (m)	高 h (m)		
1	S1-1	PC	TL	0.35	0.30	70.0	845
	S1-2		UL				836
	S1-3		N				866
3	S3-1	PC	TL	0.35	0.30	61.25	845
	S3-2		UL				836
	S3-3		N				866

注) 1) 供試体の引張鉄筋比 p はすべて 0.706%, 2) プレストレス導入から 3 ヶ月後の有効緊張力

- *1 (株)ピー・エス 土木技術部 (正会員)
 *2 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)
 *3 (株)ピー・エス 土木技術部 主任研究員 (正会員)

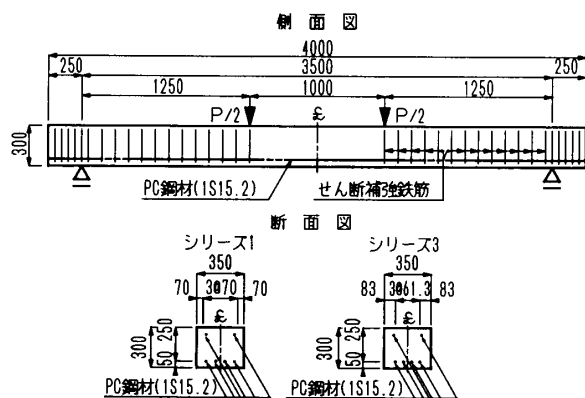


図-1 供試体一般図(シリーズ1, シリーズ3)

2.2 せん断破壊実験(シリーズ2)

供試体の一般図および諸元を、図-2 および表-2 に示す。PC 鋼材には 1S15.2 を使用し、プレストレスの導入はプレテンション方式により行った。せん断破壊を先行させるため、供試体のせん断耐力は曲げ耐力の 1/2 以下となるよう設計した。載荷実験を簡素化するため供試体の片側のみにせん断補強鉄筋を配置し、供試体の片側でせん断破壊させた。載荷は単純支持した供試体の 1 点集中載荷とし、変位制御により静的に載荷した。この実験では、載荷荷重、支間中央部の変位、等を計測し、骨材の種類およびプレストレスの有無がせん断補強筋を配置しない梁部材のせん断耐力に及ぼす影響を検討した。

2.3 PC 鋼材応力度の測定(シリーズ3)

供試体の一般図、諸元およびゲージ配置位置をそれぞれ、図-1、表-1 および図-3 に示す。供試体はシリーズ1と同様とし PC 鋼材の配置間隔は JIS 桁と同様の 61.25mm とした。この実験では、プレストレス導入直後の PC 鋼材応力度およびプレストレス導入直後から 3 ヶ月後までの PC 鋼材応力度の経時変化を計測し、骨材の種類が PC 鋼材の定着長、導入直後および有効プレストレスに及ぼす影響を検討した。

2.4 使用材料

使用材料、コンクリートの強度性状および示方配合をそれぞれ、表-3、表-4 および表-5 に示す。コンクリート強度の目標値は 60MPa とした。細骨材には天然普通骨材を使用し、TL, N は表乾状態で、UL は絶乾状態で使用した。

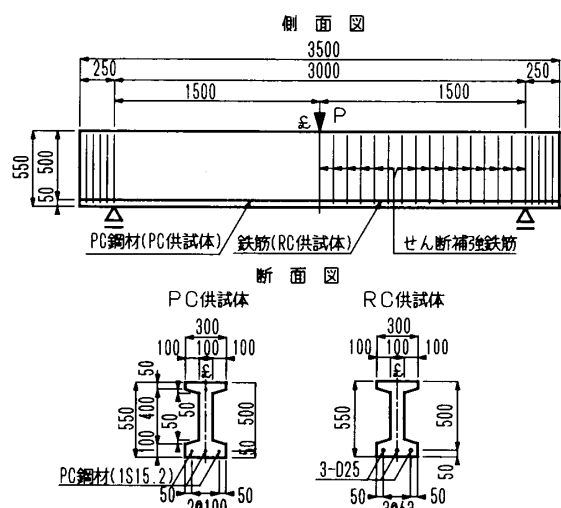


図-2 供試体一般図(シリーズ2)

表-2 供試体の諸元(シリーズ2)

供試体番号	部材種類	骨材種類	有効高 d (mm)	a/d	PC 鋼材鉄筋の配置 ¹⁾	導入緊張力 P _s (kN)
S2-1	PC	TL	0.5	3.0	4-1S15.2	569
S2-2		UL	0.5	3.0	4-1S15.2	560
S2-3		N	0.5	3.0	4-1S15.2	576
S2-4	RC	TL	0.5	3.0	3-D25	0
S2-5		UL	0.5	3.0	3-D25	0

注) 1) 本数-PC 鋼材(鉄筋)種類、引張鉄筋比 p は PC 供試体が 0.554%、RC 供試体が 1.831%

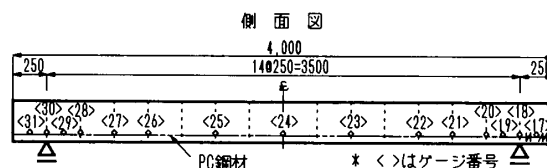


図-3 PC 鋼材ゲージ位置

表-3 使用材料

セメント C		早強ポルトランドセメント、密度 3.14g/cm ³	
水 W		上水道水	
細骨材 S		表乾密度 2.61 kg/l、吸水率 3.0%	
粗骨材 G	高性能人工骨材 FAA	TL	絶乾密度 1.81 kg/l、吸水率 2.4% 実積率 63.0%、粗骨材最大寸法 15mm
		UL	絶乾密度 1.32 kg/l、吸水率 0.9% 実積率 62.6%、粗骨材最大寸法 15mm
	天然普通骨材 N		表乾密度 2.80 kg/l、吸水率 0.7% 実積率 63.0%、粗骨材最大寸法 20mm
PC 鋼材(SWPR7BL)		降伏強度: 1570MPa、引張強度: 1860MPa	
鉄筋(SD345)		降伏点強度: 345MPa	

表-4 コンクリート強度性状

シリーズ	供試体番号	配合名	材齢1日(導入時)		載荷実験前		
			圧縮強度 σ' _c (MPa)	ヤング係数 E _c (GPa)	圧縮強度 σ' _c (MPa)	ヤング係数 E _c (GPa)	引張強度 σ' _t (MPa)
1	S1-1	TL60	39.6	25.2	65.3	27.8	4.1
	S1-2	UL60	44.9	23.3	67.8	26.1	3.9
	S1-3	N60	33.2	27.3	60.4	32.2	4.1
2	S2-1	TL60	32.6	26.9	62.3	28.0	3.7
	S2-2	UL60	36.8	23.5	59.1	24.8	4.3
	S2-3	N60	32.7	28.4	56.2	31.4	4.1
	S2-4	TL60	40.0	26.3	68.2	27.4	4.2
	S2-5	UL60	33.1	21.1	58.8	23.9	3.6
3	S3-1	TL60	43.6	25.6	67.4	28.4	3.7
	S3-2	UL60	44.9	23.3	67.8	26.1	3.9
	S3-3	N60	33.2	27.3	60.4	32.2	4.1

表-5 示方配合

配合名	骨材種類	目標強度 σ'_{28} (MPa)	Air (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				単位容積 質量 ¹⁾ (kg/l)
					W	C	S	G	
TL60	TL	60	4.5	40	160	400	837	642	2.04 (0.86)
UL60	UL	60		36	160	444	801	458	1.86 (0.78)
N60	N	60		40	160	400	837	972	2.37 (1.00)

注) 1) ()は普通コンクリートに対する比

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ破壊実験(シリーズ1)

(1) 曲げ耐力の検討

曲げ破壊実験結果および荷重と変位との関係をそれぞれ、表-6 および図-4 に示す。ひび割れ荷重の計算値は供試体下縁の応力度がコンクリート引張強度に達する荷重であり、曲げ破壊荷重の計算値は破壊抵抗曲げモーメントにより求めたものである。すべての供試体の破壊形態は桁上縁の圧壊であり、ひび割れ発生から曲げ破壊に至るまでの挙動に骨材間の差はほとんど認められない。また、FAA の曲げ破壊荷重は計算値と比べ同程度以上であることから、TL および UL を用いた PC 梁においても曲げ破壊耐力は破壊抵抗曲げモーメントにより算出できると思われる。

(2) たわみの検討

弾性域(ひび割れ発生前)における荷重と変位との関係を図-5 に示す。計算値は通常の PC 梁と同様、弾性理論により算出した。その際に用いたヤング係数は実測値とした。すべての骨材において荷重と変位との関係は直線であり、ひび割れが発生するまでは弾性的な挙動を示すことがわかる。また、実測値と計算値とはほぼ一致しており、たわみの算出には通常の PC 梁と同様、弾性理論が適用できることがわかる。

(3) ひび割れ幅の検討

鋼材応力度の増加量とひび割れ幅との関係、およびひび割れ状況をそれぞれ、図-6 および図-7 に示す。鋼材応力度の増加量およびひび割れ幅の実測値は支間中央部のものでそれぞれ、ひずみゲージおよびπゲージにより測定した。ひび割れ幅の計算値はコンクリート標準示方書設計編のひび割れ幅算定式に準じ、式(1)により求めた^{3),5)}。ここでは、コンクリートのク

表-6 曲げ破壊実験結果

供試体	ひびわれ発生荷重			曲げ破壊荷重			破壊形態
	実測値 Pcr(kN)	計算値 Pcd(kN)	比	実測値 Pu(kN)	計算値 Pud(kN)	比	
S1-1 (TL)	200	145	1.4	360	323	1.1	上縁の圧壊
S1-2 (UL)	180	144	1.3	376	327	1.1	上縁の圧壊
S1-3 (N)	180	144	1.3	380	316	1.2	上縁の圧壊

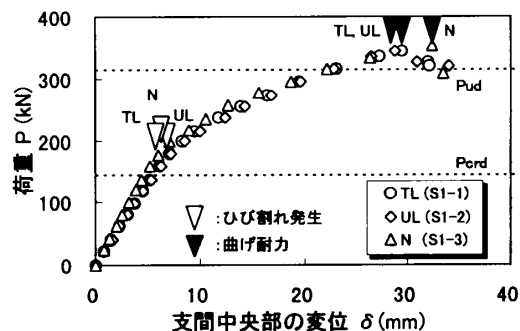


図-4 荷重と変位との関係

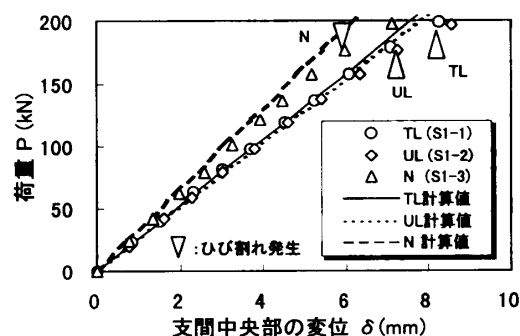


図-5 弾性域における荷重と変位との関係

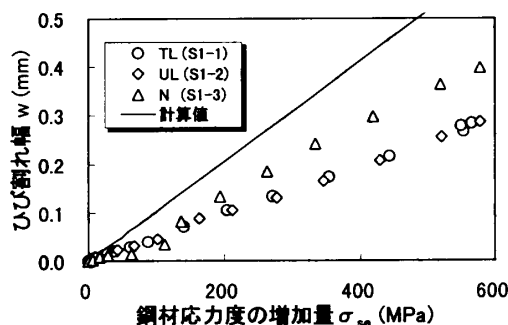


図-6 鋼材応力度の増加量とひび割れ幅の関係

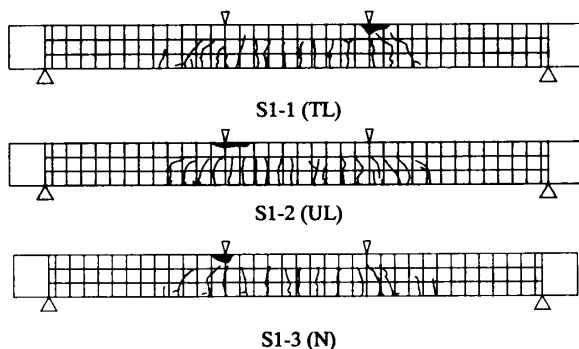


図-7 ひび割れ状況(シリーズ1)

リープおよび乾燥収縮の影響は無視した。

$$w = k \cdot (4c + 0.7e_s) \cdot \sigma_{sc} / E_s \quad (1)$$

ここに、 w ：ひび割れ幅、 c ：かぶり、

e_s ：鋼材純間隔、 k ：鋼材の付着性状を表す定数

σ_{sc} ：鋼材応力度の増加量、 E_s ：鋼材のヤング係数

すべての供試体においてひび割れ幅の実測値は計算値を下回っており、ひび割れ幅算定式は安全側の値を示している。また、FAA と N とを比較すると、FAA のひび割れ幅が小さいことがわかる。これは、図-7 からわかるように TL および UL を用いた供試体はひび割れ本数が多く、ひび割れの分散性が良いためと思われる。

3.2 せん断破壊実験(シリーズ 2)

(1) せん断耐力の検討

せん断破壊実験結果、荷重と変位との関係およびひび割れ状況をそれぞれ、表-7、図-8、および図-9 に示す。せん断破壊荷重の計算値はコンクリート標準示方書設計編のせん断補強筋を配置しない棒部材のせん断耐力式に準じ、式(2)および式(3)により求めた^{4),5)}。

$$V_{cd} = f_{vcd} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

$$f_{vcd} = 0.2 \cdot f_c^{1/3} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n (0.75 + 1.4 d/a) \quad (3)$$

ここに、 $\beta_d = d^{1/4}$ 、 $\beta_p = p_w^{1/3}$ 、 $\beta_n = 1 + M_o / M_u$ 、

V_{cd} ：コンクリートのせん断耐力、

f_{vcd} ：コンクリートの終局せん断強度、

b ：ウェブ厚(ここではフランジを考慮した平均厚)、

d ：有効高、 a ：せん断支間、 p_w ：引張鉄筋比、

M_o ：デコンプレッションモーメント、 M_u ：曲げ耐力

すべての供試体の破壊形態はせん断ひび割れが発生した後、直ちに破壊する斜め引張破壊であった。PC 供試体では TL、UL および N のせん断破壊荷重は同程度であり、破壊に至るまでの挙動に顕著な差は認められない。プレストレスを導入した梁では、FAA のせん断耐力は、骨材の密度に関わらず通常骨材と同程度であることがわかる。一方、RC 供試体では、UL のせん断破壊荷重が TL を下回っており、プレストレスを導入しない場合、軽量の骨材ほどコンクリートのせん断耐力が小さくなる傾向にあるこ

表-7 せん断破壊実験結果

供試体 番号	部材 種類	骨材 種類	コンクリート 圧縮強度 σ'_c (MPa)	せん断破壊荷重			破壊形態
				実測値 P_u (kN)	計算値 P_{sud} (kN)	比	
S2-1	PC	TL	62.3	423	286	1.5	斜め引張
S2-2	PC	UL	59.1	452	280	1.6	斜め引張
S2-3	PC	N	56.2	426	276	1.5	斜め引張
S2-4	RC	TL	68.2	260	246	1.0	斜め引張
S2-5	RC	UL	58.8	234	200	0.9	斜め引張

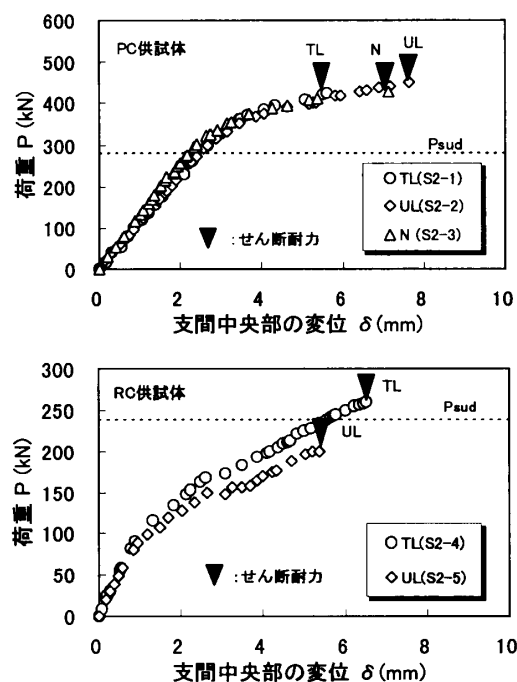


図-8 荷重と変位との関係

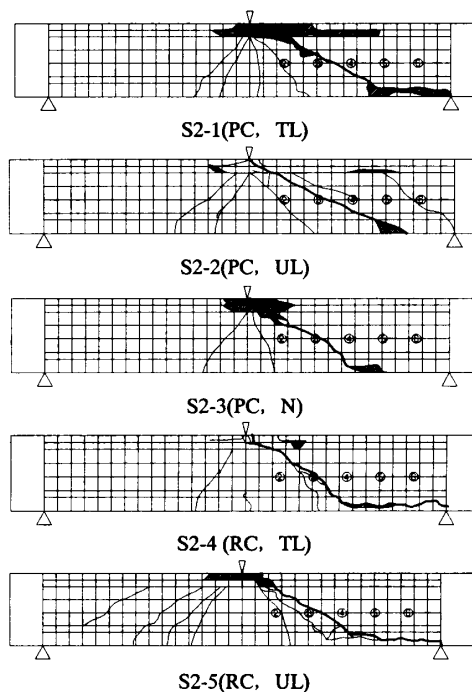


図-9 ひび割れ状況(シリーズ 2)

とがわかる。

(2) せん断耐力式の適用性の検討

供試体に導入したプレストレス力と f_{vc}/f_{vcd} との関係を図-10 に示す。 f_{vc}/f_{vcd} はコンクリートの終局せん断強度の実測値と計算値との比(安全率)である。ここでのプレストレス力はクリープおよび乾燥収縮を考慮した有効プレストレスである。プレストレスを導入しない場合、TL および UL の安全率はそれぞれ、1.0 および 0.8 であるが、プレストレスを導入した場合はそれぞれ、1.5 および 1.6 となっている。式(3)を FAA に適用すると、RC 供試体に関しては若干危険側に、PC 部材に関しては安全側の設計となることがわかる。

3.3 PC 鋼材応力度の測定(シリーズ3)

(1) プレテンション方式における PC 鋼材定着長の検討

プレストレス導入直後の PC 鋼材応力度の軸方向分布を図-11 に示す。計算値は普通コンクリートのもので、PC 鋼材のセット量、リラクセーションおよび供試体の弾性変形を考慮して求めた⁹⁾。計算値の算出に使用したコンクリートのヤング係数は実測値とした。すべての骨材において、PC 鋼材は端部から 1m の位置で計算値に達しており、定着されていることがわかる。これはプレテンション方式の PC 鋼材の定着長 65φ(=988mm；φは鋼材径)をほぼ満足しており、TL および UL の PC 鋼材の定着長は通常のコンクリートと同程度であるといえる。

(2) 有効プレストレスの検討

PC 鋼材応力度(プレストレス)の経時変化および PC 鋼材応力度の計算値をそれぞれ図-12 および表-8 に示す。図中の凡例の数字はゲージ位置を示す(図-3 参照)。有効プレストレスの計算値 σ_{pe} は、打設後 3 ヶ月のものであり、クリープ、乾燥収縮等の影響を考慮し、通常の JIS 桁と同様の算出方法で求めた⁹⁾。表-8 より、PC 鋼材応力度の計算値は、FAA のものが N に比べ若干小さいことがわかる。これは FAA のヤング係数が小さいためであるが、その差は

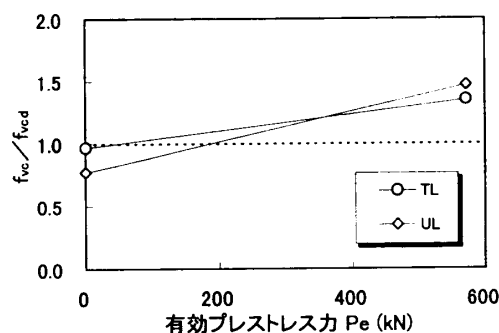


図-10 プレストレス力と f_{vc}/f_{vcd} との関係

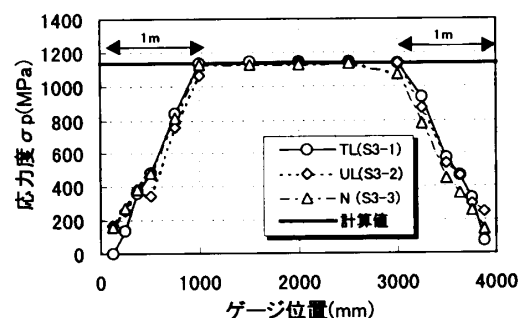


図-11 PC 鋼材応力度の軸方向分布

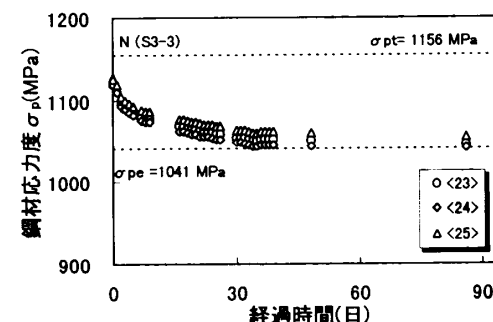
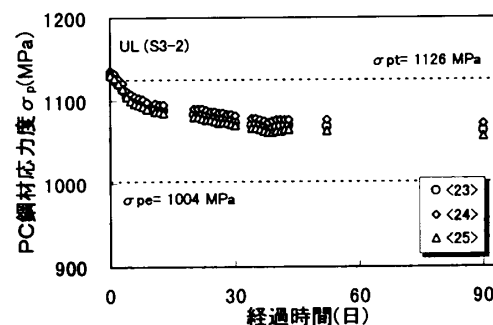
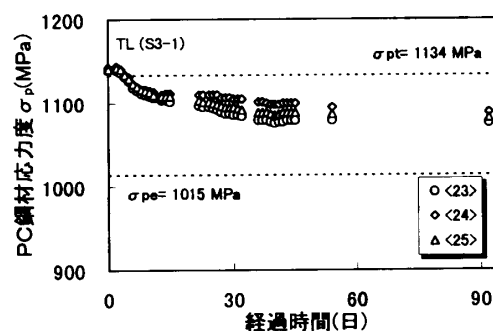


図-12 PC 鋼材応力度の経時変化

表-8 PC 鋼材応力度の計算値

供試体 種類	骨材種類	PC 鋼材応力度 ¹⁾	
		導入直後 σ_{pt} (MPa)	3ヶ月後 σ_{pe} (MPa)
S3-1	TL	1134 (0.98)	1015 (0.98)
S3-2	UL	1126 (0.97)	1004 (0.96)
S3-3	N	1156 (1.00)	1041 (1.00)

注) 1)()は通常骨材の計算値に対する比

導入直後および3ヶ月後ともに2~4%程度である。一方、PC 鋼材応力度の実測値は、プレストレス導入から3ヶ月後までにおいて、すべての骨材が計算値以上となっており、所定のプレストレスが導入されていることがわかる(図-12)。また、プレストレス導入直後から3ヶ月後までのPC 鋼材応力度の減少量は、FAAのものがNに比べ小さいことがわかる。これは軽量コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみが通常コンクリートより小さいためと考えられる⁹⁾。

4. まとめ

石炭灰を主原料とする高性能人工軽量骨材 FAA(TL および UL)を使用したコンクリート強度 60MPa の PC 梁について曲げ破壊実験、せん断破壊実験および PC 鋼材の応力度測定を行った。その結果、以下のような知見を得た。

4.1 曲げ性状

- ①曲げ耐力は、天然普通骨材を使用した PC 梁と同等であり、破壊抵抗曲げモーメントにより算出した計算値を上回った。
- ②ひび割れが発生するまでは弾性的な挙動を示し、たわみは弾性理論値と一致した。
- ③ひび割れ幅は、コンクリート標準示方書設計編のひび割れ幅算定式により求めた計算値より安全側の値を示した。

4.2 せん断性状

- ①プレストレスを導入した場合、せん断耐力は骨材の密度に関わらず、普通天然骨材を使用した PC 梁と同程度であった。
- ②プレストレスを導入しない場合、軽量の骨材を使用したもののほどせん断耐力が小さくなる傾向にあった。
- ③コンクリート標準示方書設計編のせん断耐力

式を高性能人工軽量骨材へ適用すると、RC 部材に対しては若干危険側に、PC 部材に対しては安全側の設計となると思われる。

4.3 プレストレスに関する性状

- ①プレテンション方式における PC 鋼材の定着長は天然普通骨材と同程度であった。
- ②プレストレスの計算値は、ヤング係数が小さいことにより、通常のコンクリートに比べ若干減少するが、その減少量は2~4%程度である。
- ③プレストレス導入から3ヶ月後までの有効プレストレスは計算値以上であり、所定のプレストレスが導入されていた。
- ④プレストレスの経時変化の実測値は、通常のコンクリートに比べ小さい傾向にあった。これは、軽量コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみが通常のコンクリートに比べ小さいためと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり高強度人工骨材コンクリート研究会(会長：電源開発㈱)の研究成果を参考とさせていただきました。また、本研究に使用した骨材は、同研究会および宇部興産㈱に提供していただいたものです。ここに、ご協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 曾根徳明：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材、コンクリート工学, Vol.36, No.12, 1998.12
- 2) 大西利勝, 戸田靖彦, 竹村剛, 中水高博：石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質、軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, 2000.8
- 3) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅、コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, 1970.9
- 4) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号, V-5, 1986.8
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 平成8年版, 1996
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 1996.12