

フライアッシュコンクリートの収縮特性、耐久性および構造特性に関する検討

(株)ピーエス三菱 正会員 工修 ○山村 智
 (株)ピーエス三菱 正会員 工博 桜田 道博
 (株)ピーエス三菱 正会員 小林 和弘
 金沢大学 正会員 工博 鳥居 和之

Abstract : In order to apply the concrete replaced 15% and 20% of combination materials with classified fly ash to prestressed concrete girders, the authors studied about a shrinkage property, durability. Also, pretensioned prestressed concrete girders were prepared, long terms measurement of the strain of prestressing steel strand and loading test of the girders were conducted in order to study the effective prestressing force and structural properties of ultimate strength and so on. From these results, creep of classified fly ash concrete was equal to normal concrete, having the durability for frost damage and the neutralization enough. Further, as for the prestressed concrete girder using fly ash, the effective prestress, structural properties of ultimate strength were equal to the traditional girder without fly ash.

Key words : classified fly ash, shrinkage property, durability, structural property

1. はじめに

昨今、社会インフラの維持管理・更新が注目されており、今後、新設の構造物や架け替えられるプレストレストコンクリート(以下、PC)構造物においても、耐久性の向上による長寿命化、環境負荷の低減などが求められている。産業副産物であるフライアッシュは、混和材として用いることでコンクリートを緻密化し、塩害や ASR に対して耐久性の向上に寄与することが知られている¹⁾。さらに、コンクリートの CO₂ 排出量の低減や未利用資源の有効活用などの環境負荷の低減にもつながることから、PC 構造物に積極的に用いることが望まれている。

近年、北陸地方においては、分級装置を有する石炭火力発電所が増えており、分級された高品質なフライアッシュの安定供給が可能となったことから^{2),3)}、ASR 対策としてフライアッシュが積極的に使用されている。これまで、筆者らはフライアッシュを用いた PC 構造物を実用化し、PC 構造物の品質向上、耐久性向上および環境負荷の低減を図るため、結合材の 20%をフライアッシュに置換したコンクリートで、プレテンション PC 桁を対象とした配合の検討、蒸気養生後の湿潤養生日数が強度や耐久性に及ぼす影響の検討、ならびに PC 部材(フライアッシュ置換率 20%)の構造特性の検討などを行った⁴⁾。その後、フライアッシュ置換率 15%への適用拡大、ポストテンション PC 桁への対応、耐久性や収縮特性の定量的な評価などを目指し、新たに配合の検討、クリープ・収縮特性の検討、中性化および凍結融解に対する耐久性の検討、ならびに PC 部材(フライアッシュ置換率 15%)の構造特性の検討などを行った。本論文では、これまでの検討結果の一部を報告するとともに、フライアッシュの PC 構造物への適用性について述べる。

2. 実験概要

2.1 検討フロー

試験フローを図-1に示す。Stage 1では、フライアッシュを用いたコンクリートの基礎物性(耐久性および収縮特性)を検討し、Stage 2では、実物大プレテンション PC 桁を製作し、プレストレスの損失

量の測定および曲げ載荷試験による PC 桁の構造特性を把握した。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、フライアッシュには北陸電力七尾大田火力発電所で製造された分級フライアッシュを使用した。表-2に示す PreFA20, PreFA15 および PreH 配合はプレテンション方式 PC 桁を対象とした配合(以降、プレテン配合)であり、結合材に占めるフライアッシュの割合はそれぞれ、20%, 15%および 0%とした。また、PosFA20 および PosH はポステンション方式セグメント桁を対象とした配合(以降、ポステン配合)であり、結合材に占めるフライアッシュの割合はそれぞれ、20%および 0%とした。コンクリートの設計基準強度はすべて $50\text{N}/\text{mm}^2$ であるが、プレテンション PC 桁を対象とした配合(PreFA20, PreFA15 および PreH)では、材齢 14 時間のプレストレス導入時強度 $35\text{N}/\text{mm}^2$ で水結合材比が決まっている。

2.3 養生方法

全ての配合でコンクリート打込み完了後、図-2に示す蒸気養生を行った。なお、フライアッシュを用いた配合(PreFA20, PosFA20 および PreFA15)については、蒸気養生終了後、さらに 3 日間の湿潤養生(以降、W3)を行い、所定の材齢まで気中で保管した。早強単味の配合については、蒸気養生後、気中保管(以降、D)した。

2.4 コンクリートの基礎物性試験

試験項目および試験方法を表-3に示す。分級フライアッシュを用いたコンクリート(以降、FA コンクリート)の基礎物性を把握するため、凍結融解試験、促進中性化試験、圧縮クリーブ試験および乾燥収縮試験を実施した。凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A

法)：水中凍結融解試験方法」に準拠して行い、促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠して行った。圧縮クリーブ試験は、JIS A 1157「コンクリートの圧縮クリーブ試験方法」に準拠して行い、プレテン配合(PreFA20, PreFA15 および PreH)では載荷材齢を 1 日とし、ポステン配合(PosFA20 および PosH)では載荷材齢を 28 日とした。乾燥収縮試験は JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法(コンパレータ方法)」に準拠して行った。なお、凍結融解試験および促進中性化試験では、蒸気養生後の湿潤養生が FA コンクリートの耐久性に及ぼす影響を把握するため、蒸気養生後に湿潤養生を 3 日間実施した試験体に加え、蒸気養生後、ただちに気中保管した試験体でも試験を行った。

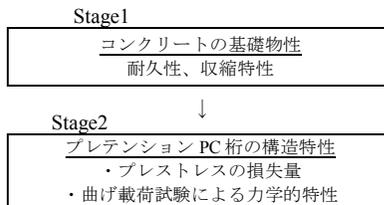


図-1 試験フロー

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³
混和材	FA	分級フライアッシュ(七尾大田火力発電所産) 密度:2.41 g/cm ³ 、比表面積:4600cm ² /g
細骨材	S	川砂(庄川産)表乾密度:2.61 g/cm ³
粗骨材	G	砕石(庄川産)表乾密度:2.61g/cm ³
減水剤	SP	ポリエーテル系高性能減水剤
AE 剤	AE	アニオン系界面活性剤

表-2 配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP (B×%)	AE (B×%)	
		W	B		S			G
			C	FA				
PreFA20	320	150	375	94	729	967	0.60	0.10
PreFA15	348	150	366	65	762	958	0.55	0.03
PreH	38.7	150	388	-	731	1058	0.50	0.01
PosFA20	380	150	316	79	784	949	0.51	0.04
PosH	39.5	150	380	-	820	949	0.50	0.005

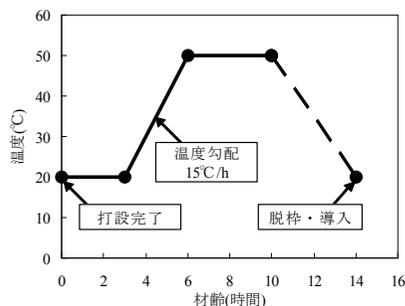


図-2 蒸気養生の方法

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	対象配合					
		プレテン配合			ポステン配合		
		FA20	FA15	H	FA20	H	
凍結融解試験	JISA1148	—	—	—	○	—	
促進中性化試験	JISA1153	—	—	—	○	○	
圧縮クリーブ試験	JISA1157	○	○	○	○	○	
乾燥収縮試験	JISA1129	○	○	○	—	—	

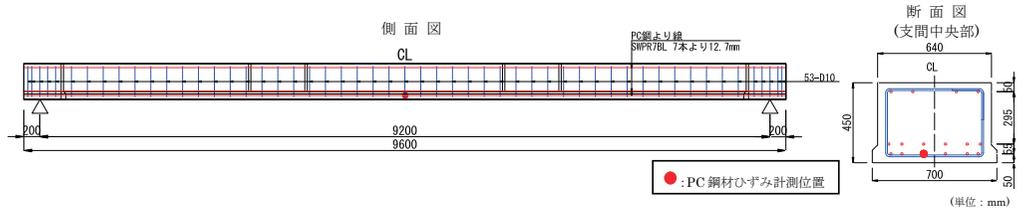


図-3 プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置

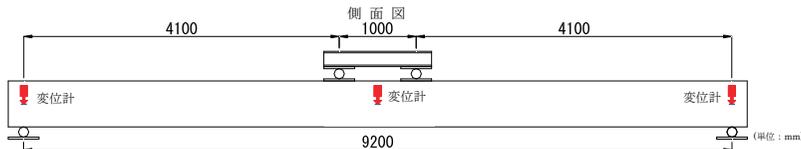


図-4 荷重方法および計測機器の配置

表-4 荷重試験の計測項目および検討項目

計測項目	検討項目
①ひび割れ発生荷重	ひび割れ耐力
②終局荷重	破壊耐力
③変位	桁の剛性
④PC 桁の表面ひずみ	終局ひずみ
⑤PC 鋼材および鉄筋ひずみ	平面保持
⑥ひび割れ図	ひび割れ性状

表-5 荷重条件

実験の種類	曲げ荷重実験
荷重の種類	4点曲げ荷重
荷重位置	支間中央から0.5m(2箇所)
ひび割れ発生荷重の計算値 P_{cr}^{**}	134.0kN
終局荷重の計算値 P_u^{**}	303.8kN

*PreFA15の実強度を基に算出した値

2.5 プレストレス損失の検討

プレテンション PC 桁の一般図および PC 鋼材ひずみの計測位置を図-3に示す。製作したプレテンション PC 桁は JIS A 5373 に規定される AS09 桁とし、PreFA20、PreFA15 および PreH 配合でそれぞれ 1 体を製作した(以降、PreFA20 桁、PreFA15 桁および PreH 桁)。なお、プレストレスの導入は材齢 14 時間とした。緊張力は導入直後の PC 鋼材応力度で 1172N/mm^2 とし、導入直後の PC 桁下縁の応力度は 11N/mm^2 程度となった。また、PreFA20 桁および PreFA15 桁は蒸気養生後に 3 日間の湿潤養生を行った。プレストレス損失の検討は PC 桁支間中央部の PC 鋼材のひずみを長期間(1~3 ヶ月程度)計測することにより行った。PC 鋼材ひずみの計測には温度補償型ひずみゲージを使用した。

2.6 荷重実験による構造特性の検討

荷重方法および計測機器の配置を図-4に示す。フライアッシュを用いた PC 桁の力学的特性を把握するため、有効プレストレス計測後のプレテンション PC 桁を用いて荷重実験を実施した。荷重実験における計測項目および検討項目を表-4に、荷重条件を表-5に示す。荷重荷重はロードセルにより計測し、桁の鉛直変位については支間中央部および支点部に取り付けた変位計により計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリートの基礎物性

(1) 凍結融解に対する耐久性

凍結融解試験の結果を図-5に示す。なお、凍結融解試験に用いた FA15 の空気量は 4.0%であった。蒸気養生後に気中保管した試験体(PosFA20-D)および蒸気養生後に湿潤養生を 3 日間実施した試験体(PosFA20-W3)の 300 サイクル時の相対動弾性係数はともに 99%となり、フライアッシュを用いたコンクリートは十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。また、初期の湿潤養生が凍結融解抵抗性に及ぼす影響はほとんどないことも確認された。

(2) 中性化に対する耐久性

促進中性化試験の結果を表-6に、試験結果を基に算出した一般環境における中性化深さを図-6に示す。なお、図-6の中性化深さは、促進期間26週での中性化速度係数を基に、阿部らの研究⁵⁾による式(1)を用いて一般環境における中性化深さを算出したものである。

$$C = A \times \sqrt{\frac{CO_2}{5}} \times \sqrt{t} \tag{1}$$

ここに、C:中性化深さ(mm), A:促進中性化試験(CO₂濃度5%)の試験値から求まる中性化速度係数(mm/√年), CO₂:一般環境におけるCO₂濃度(0.03%), t:年数

PosH-D, PosFA-D および PosFA-W3 の促進期間26週における中性化深さはそれぞれ2.3mm, 10.0mm および6.3mmであった。このことから、FAコンクリートの中性化深さは、早強単味のコンクリートよりも大きくなることが確認された。一方、PosFA20-Dの中性化深さは10.0mmであるのに対し、蒸気養生後に3日間の湿潤養生を実施したPosFA20-W3の中性化深さは6.3mmであり、湿潤養生を行うことで中性化深さは小さくなることが確認された。福澤ら⁶⁾の研究によると、蒸気養生後、水中養生を行った供試体の中性化深さが蒸気養生後、気中保管した供試体の中性化深さよりも小さくなることが示されており、本試験でも同様の傾向となった。また、図-6より、100年後の中性化深さは、PosH-Dで2.5mm, PosFA20-Dで11mm, PosFA20-W3で6.9mmであり、FAコンクリートの中性化深さは早強単味のコンクリートより大きくなっているものの、一般的な環境で求められる中性化残りは10mmであり、通常のかぶり(35~45mm)であれば湿潤養生なしのFAコンクリートでも中性化に対して十分な耐久性を有しているといえる。

(3) クリープ特性

PreFA20, PreFA15 および PreH の載荷材齢182日までのクリープ係数を図-7に、PosFA20 および PosH の載荷材齢182日までのクリープ係数を図-8に示す。

また、各配合の圧縮強度試験結果を図-9に示す。なお、クリープ係数は、クリープひずみをプレストレス導入時のヤング係数で除したものである。載荷材齢182日におけるPreFA20, PreFA15 および PreH のクリープ係数はそれぞれ、1.01, 0.85 および 1.09 となり、PreHと比較し、PreFA20で7%程度、PreFA15で22%程度小さくなることが確認された。これは、図-9に示すようにPreFA20 および PreFA15の材齢14日以降の圧縮強度がPreHより高くなったことによると考えられる。一方、材齢28日以降の圧縮強度が同程度であるポステン配合では、載荷材齢182日におけるPosFA20 および PosH

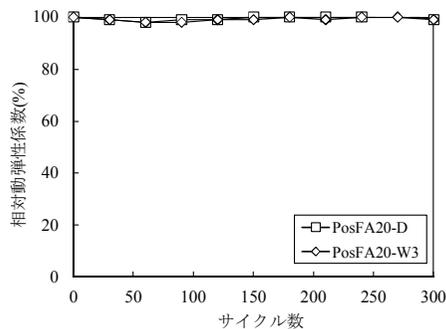


図-5 凍結融解抵抗性

表-6 促進中性化試験の結果

配合	養生方法	中性化深さ(mm)				
		1週	4週	8週	13週	26週
PosFA20	D	2.4	4.9	7.8	8.9	10.0
	W3	1.0	2.7	4.2	5.1	6.3
PosH	D	0.0	0.2	0.8	1.1	2.3

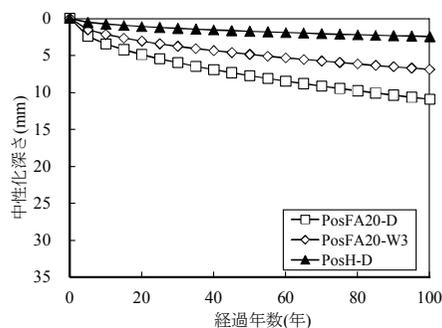


図-6 経過年数と中性化深さの関係

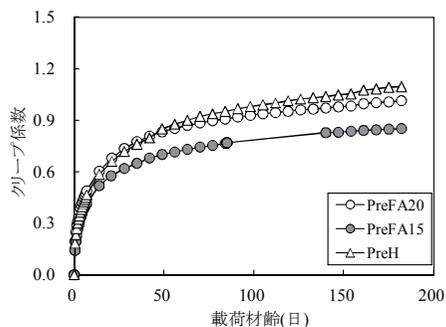


図-7 クリープ係数(プレテン配合)

のクリープ係数はそれぞれ 0.92 および 0.94 となり、同程度となった。このことから、フライアッシュの有無がクリープ係数に及ぼす影響はほとんどなく、圧縮強度が同程度であれば、クリープ係数も同程度になると考えられる。

(4) 乾燥収縮

PreFA20, PreFA15 および PreH の乾燥期間 182 日までの乾燥収縮ひずみを図-10に示す。乾燥材齢 182 日における PreFA20, PreFA15 および PreH の乾燥収縮ひずみはそれぞれ、 497μ , 467μ および 524μ で同程度であり、フライアッシュの有無が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

3.3 プレテンション PC 桁の構造特性

(1) プレストレスの損失量

PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の PC 鋼材応力度の経時変化を図-11に示す。図の時間軸の原点はコンクリートの打込み完了時とした。図中の有効プレストレスの計算値は PreFA15 桁のものであり、道路橋示方書に準拠し、桁の弾性変形、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮などを考慮して求めた。なお、有効プレストレスはプレストレス導入から 42 日後(載荷試験直前)の計算値であり、計算に用いたクリープ係数(0.68)および乾燥収縮ひずみ(30μ)は道路橋示方書に示されている値を比例配分し、材齢 42 日後の値に換算したものである。PreFA20 桁および PreFA15 桁の PC 鋼材応力度の経時変化は PreH 桁とほとんど同程度であり、圧縮強度が同程度であれば、フライアッシュを用いた PC 桁のクリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの損失は早強単味の PC 桁と同程度であることが確認された。また、PreFA20 桁および PreFA15 桁の PC 鋼材応力度は有効プレストレスの計算値を上回っており、道路橋示方書に準拠することでフライアッシュを用いた PC 桁の有効プレストレスを安全側に評価できると考えられる。なお、図-10の乾燥収縮ひずみの実測値(材齢 42 日で 345μ)を用いて有効プレストレスを計算値すると 1081N/mm^2 となり、道路橋示方書に準じた場合よりもさらに安全側の評価となる。

(2) 荷重-たわみの関係

PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の荷重と支間中央部のたわみの関係を図-12に、ひび割れ発生荷重および終局荷重を表-7に示す。図内には、PreFA15 桁の実強度を基に算出したひび割れ発生荷重および終局荷重を示した。荷重とたわみの関係は、PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁でほとんど差異がないことが確認された。PreFA20 桁, PreFA15 桁および PreH 桁の終局荷重はそれぞれ、 372kN , 354kN および 349kN であり、全ての桁で終局荷重の計算値を上回る結果となった。したがって、フライアッシュを用いた PC 桁はフライアッシュ

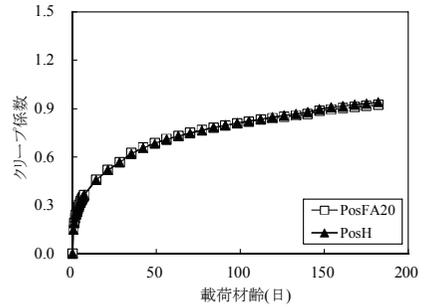


図-8 クリープ係数(ポステン配合)

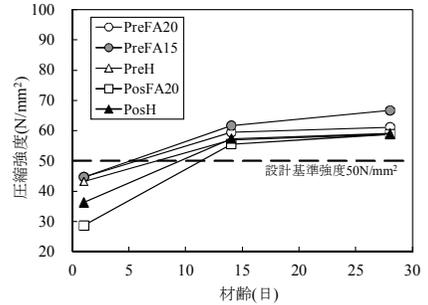


図-9 圧縮強度試験結果

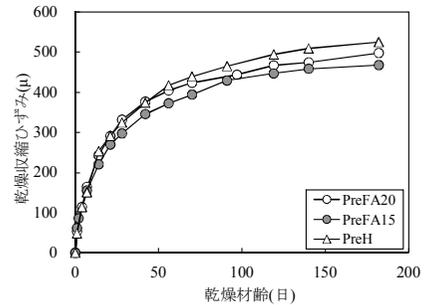


図-10 乾燥収縮ひずみ

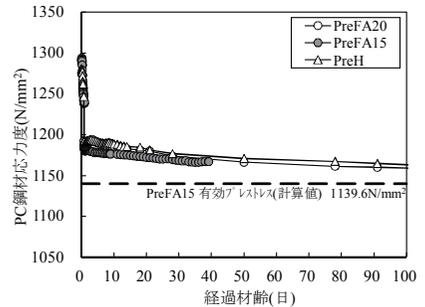


図-11 PC 鋼材応力度の経時変化

の置換率によらず、通常の PC 桁と同等以上の性能を有しており、弾性理論や平面保持の仮定に基づく、通常的设计方法により、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できると考えられる。

4. まとめ

フライアッシュコンクリートの収縮特性、耐久性および構造特性の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 凍結融解試験の結果、初期の湿潤養生が凍結融解抵抗性に及ぼす影響はほとんどないことが確認された。また、相対動弾性係数は 90%を上回っていることから、FA コンクリートは十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。
- (2) 促進中性化試験の結果、FA コンクリートの中性化深さは早強単味のコンクリートより大きくなっているものの、一般的な環境における 100 年後の中性化深さの計算値は最大で 11mm であり、通常のかぶり(35~45mm)であればフライアッシュを用いたコンクリートでも中性化に対して十分な耐久性を有しているといえる。
- (3) クリープ試験の結果、フライアッシュの有無がクリープ係数に及ぼす影響はほとんどなく、圧縮強度が同程度であれば、クリープ係数も同程度になることが確認された。
- (4) PreFA15 桁のプレストレスの損失量は、PreFA20 桁および PreH 桁と同程度となった。また、道路橋示方書に準拠して算出した有効プレストレスは安全側の評価となった。
- (5) PreFA15 桁の荷重とたわみの関係は、PreFA20 桁および PreH 桁とほぼ一致した。また、弾性理論や平面保持の仮定に基づく、通常的设计手法により、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できた。
- (6) 以上より、結合材の 15%から 20%をフライアッシュで置換した PC 桁の実用化は十分に可能であるといえる。なお、本検討の結果を基に、石川県の宮坂橋歩道橋でフライアッシュが採用され、フライアッシュを用いた日本初の PCT 桁橋が実現した。

参考文献

- 1) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp197-202, 2011
- 2) 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—, 電力土木, No.357, p11-15, 2012
- 3) 橋本徹, 久保哲司, 参納千夏男: 産官学連携による北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ有効利用促進に向けた取組み, 電力土木(別刷), No.361, pp.56-60, 2012
- 4) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートの PC 桁への適用に関する研究, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム,
- 5) 阿部道彦, 榊田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志, 友沢史紀: コンクリートの促進中性化試験の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 409 号, pp.1~pp10, 1990.3
- 6) 福澤祥宏, 松下博通, 佐川康貴, 鶴田浩章, 中原晋: フライアッシュを混入した高強度コンクリートの強度および中性化に関する検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp495~pp496, 2005

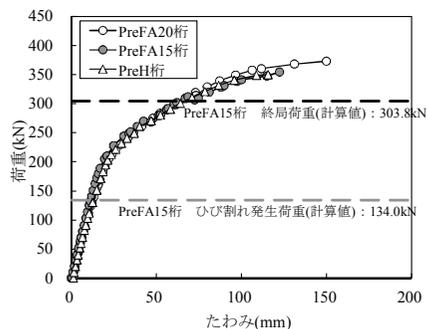


図-12 荷重-たわみの関係

表-7 ひび割れ発生荷重および終局荷重

		ひび割れ発生荷重 Pcr(kN)	終局荷重 Pu(kN)
PreFA20 桁	計算値	126.1	301.0
	実測値	147.0	372.0
PreFA15 桁	計算値	134.0	303.8
	実測値	171.7	354.0
PreH 桁	計算値	121.6	298.8
	実測値	152.0	349.0