

# 石灰石微粉末を用いて初期強度を改善した FA 置換率 40%の舗装コンクリートの曲げ強度特性<sup>†</sup>

時國 裕也\* 上野沙也加\* 牛尾 祐大\*  
福本 直\*\* 吉武 勇\*\*\*

## Flexural Properties of Concrete Pavement with Fly Ash Replacement of 40% Incorporating Limestone Powder

by

Yuya TOKIKUNI \*, Sayaka UENO \*, Yuta USHIO \*,  
Sunao FUKUMOTO \*\* and Isamu YOSHITAKE \*\*\*

Thermal power plant has occupied 90% of electric power supply after the earthquake disaster in Japan. Hence amount of coal-ash has increased gradually. Coal-ash, especially fly-ash, should be used for civil infrastructures, and concrete pavement must be a typical application using fly-ash. Fly-ash is a pozzolanic material, so it can contribute to various properties, such as strength development at mature age. The strength development at early age, however, is significantly slow and may negatively affect traffic service. Early strength may be improved when limestone filler is mixed in fly-ash concrete. In addition, the fly-ash concrete made with limestone aggregate may be recyclable as raw material for cement production. This study aims at developing the fly-ash pavement concrete which can make a traffic opening early and can be recycled. The paper describes the flexural strength properties of pavement concrete made with fly-ash of 40% replacement of cement. The result indicates the flexural strength at early age can be improved by using limestone filler, and assures sufficient strength development for traffic service at age of 2 days. In addition, the report shows flexural fatigue strength of the fly-ash pavement concrete is equal to or higher than the durability of conventional concrete pavement.

### Key words:

Concrete pavement, Fly-ash, Limestone filler, Flexural strength, Early age

### 1 緒 言

2011年の東日本大震災後、国内発電量に占める原子力依存度が2%以下に低下している一方で、9割以上を火力発電が占めている<sup>1)</sup>。これに応じて石炭火力発電の副産物である石炭灰の発生量も増加することから、石炭灰のさらなる有効活用が求められるものと考えられる。石炭灰の多くを占めるフライアッシュ（以下、FAと記す）は、ポズラン反応により、長期にわたり強度増進する特徴を有しており、セメント系材料にとって有用な混和材料である。そのため、FAはコンクリート構造物の長寿化対策のひとつとしても期待されている。

FAを大量使用できる構造物のひとつにコンクリート舗装がある。近年、国土交通省が道路関係予算で、「耐久性に優れたコンクリート舗装の積極的活用」を盛り込み、あらためてコンクリート舗装の活用が見直されている<sup>2)</sup>。特に、コンクリート舗装の多くは、鉄筋をほとんど用いず中性化対策を必要としないことから、FAの大量使用が期待できる。しかしFAをセメント代替材として用いると、初期材齢における強度発現の遅延が問題となるため<sup>3)5)</sup>、施工後に早期交通解放が求められる道路舗装への適用が

困難となる。

一方、石灰石微粉末（以下、LPと記す）は、コンクリート用混和材として使用する場合、ブリージングの低減、水和熱の抑制といった効果とともに、エーライトの初期水和反応促進による初期強度の増進効果が見込まれる<sup>6)</sup>。このことから、LPをFAとともに混和することで、初期強度にも優れ、長期材齢にかけて強度増進できるコンクリート舗装が期待される。

さらに、この舗装コンクリートに石灰石起源の骨材のみを用いれば、解体後のコンクリート塊すべてが次世代のセメント原料として活用できる可能性も考えられる<sup>7)</sup>。循環型社会、ライフサイクルコストの観点からも、このような舗装コンクリートを開発・実用化していくことの意義は大きいものと考えられる。

本研究では、初期から長期材齢にかけて強度増進でき、次世代のセメント原料としてリサイクル可能なハイボリュームフライアッシュ（HVFA）舗装コンクリートの開発を目的とする。特に本論文では、セメント質量に対してFAを40%置換したHVFA舗装コンクリートを主対象とし、比較用としてFAとLPをそれぞれ混和しない舗装コン

<sup>†</sup> 原稿受理 平成26年 1月 31日 Received Jan.31,2014

©2014 The Society of Materials Science, Japan

\* 正 会 員 山口大学大学院〒755-8611宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611.

\*\* 中国電力(株)〒730-8701広島市中区小町, The Chugoku Electric Power CO., INC, Naka-ku, Hiroshima, 730-8701.

\*\*\*正 会 員 山口大学大学院〒755-8611宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611.

リートについて曲げ強度の材齢変化を調べた。さらに、この HVFA 舗装コンクリートについて曲げ疲労試験もを行い、既往の研究成果と比較・評価を試みた。

## 2 実験方法

### 2.1 使用材料および配合

本研究では普通ポルトランドセメント OPC (密度:  $3.15\text{g/cm}^3$ , 比表面積:  $3340\text{cm}^2/\text{g}$ ) を使用した。FA の諸物性値を Table 1 に示す。これは、JIS A 6201 の II 種規定を満足したものである。また、初期強度改善のために用いた LP の諸物性値を Table 2 に示す。

リサイクル可能な舗装コンクリートを実現するために、骨材にはすべて石灰石骨材を使用した。細骨材は密度  $2.60\text{g/cm}^3$ , F.M. 2.90, 吸水率 2.4% の石灰砕砂、粗骨材は密度  $2.68\text{g/cm}^3$ , F.M. 6.60, 吸水率 0.53% の石灰砕石である。コンクリートの乾燥収縮および熱膨張係数の低減に効果がある石灰石骨材は、ひび割れ抵抗性の向上や目地間隔の大きいコンクリート舗装を実現することができる可能性がある。また、一般的な舗装コンクリートに求められるフレッシュ性状 (スランプ 2~6cm, 空気量  $4.5 \pm 1.5\%$ ) を満足するように、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と高級脂肪酸系の AE 剤を用いて配合の調整を行った。

FA は長期材齢においてポゾラン反応により強度が発現する混和材料である。一方、その FA をセメントに対して大量に置換することで、初期強度発現が緩慢となり交通解放が遅延する可能性がある。コンクリート舗装は施工後、できるだけ早期の交通解放が求められる。そこで本研究では強度管理の材齢を 7 日に設定し、予備試験により材齢 7 日までに曲げ強度  $4.5\text{MPa}$  を超過する配合を求めた。コンクリートの配合を Table 3 に示す。本研究では、予備試験および既往の研究成果<sup>4),5)</sup>に基づき、セメント質量に対して FA を 40% 置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) を主対象とした。さらにその比較用として、FA によるセメント置換を行わない舗装コンクリート (No.2), No.1 の配合に対して LP の代わりに FA を用いた舗装コンクリート (No.3) とした。また後述するように、No.1 の配合に対して早強ポルトランドセメント HPC (密度:  $3.14\text{g/cm}^3$ , 比表面積:  $4510\text{cm}^2/\text{g}$ ) を使用した HVFA 舗装コンクリート (No.4) を準備した。

### 2.2 静的曲げ強度試験

JIS A 1106 に準じて静的曲げ強度試験 (3 等分点載荷) を行った。コンクリートの練混ぜには強制二軸ミキサを使用し、セメント、FA、LP および細骨材を投入し 30 秒空練り後、水および混和剤を加えてさらに 180 秒間の練混ぜによりモルタルを作製した。その後、15mm メッシュで二分した粗骨材 (2015 : 1505 = 1 : 1) を加え 180 秒間の練混ぜを行った。100×100×400mm の角柱供試体を作製し、コンクリート打設後 20°C の養生室内に 1 日間静置した上で脱型し、試験材齢まで 20°C 水中養生を施した。すべての配合のコンクリートについて、材齢 1, 2, 3, 5, 7, 28, 56, 91 日において曲げ強度試験を実施し、さらに

Table 1 Properties of fly ash.

SiO <sub>2</sub>	60.9%
Moisture content	0.1%
Density	$2.16\text{g/cm}^3$
Blaine fineness	$3380\text{cm}^2/\text{g}$
28-day strength factor	83%
91-day strength factor	97%
Percentage of flow	101%
MB absorption	$0.33\text{mg/g}$
Ig.loss	2.6%

Table 2 Properties of limestone powder.

Ig.loss	43.75%
CaO	55.62%
SiO <sub>2</sub>	0.09%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01%
MgO	0.35%
Density	$2.70\text{g/cm}^3$
Blaine fineness	$5000\text{cm}^2/\text{g}$

Table 3 Mixture proportions.

No	1 (4)	2	3
FA/cm	0.40	0.00	0.40
w/cm	0.33	0.33	0.33
W (kg/m <sup>3</sup> )	110	110	110
C (kg/m <sup>3</sup> )	200	334	200
FA (kg/m <sup>3</sup> )	134	0	174
LP (kg/m <sup>3</sup> )	50	50	0
S (kg/m <sup>3</sup> )	820	843	820
G (kg/m <sup>3</sup> )	1033	1062	1033
sp (kg/m <sup>3</sup> )	4.01	4.68	3.34
AE (kg/m <sup>3</sup> )	1.20	1.23	2.00

[Note] cm: cementitious material (=C+FA)

FA を 40% 置換した No.1 の配合では、364 日においても同様の試験を行った。なおすべての試験は、各材齢で 3 体とし、その平均値を曲げ強度として評価した。

### 2.3 曲げ疲労試験

試験期間が長期におよぶ疲労試験では、基準とする静的強度の値が重要となる。FA を使用したコンクリートは、ポゾラン反応効果により静的曲げ強度が長期にわたり増進する。そこで、静的曲げ強度試験と同様にコンクリートを作製し、疲労試験を行う直前に練混ぜバッチごとに 3 体の静的曲げ強度試験を行い、各疲労試験における載荷荷重を決定した。載荷方法は 3 等分点載荷 (JIS A 1106) とし、サーボバルブを用いた試験機を使用した。コンクリートの練混ぜは静的曲げ強度試験と同様である。なお、この試験においては、150×150×530mm 状の供試体を用いた。疲労試験の応力波形は、周波数 4Hz の正弦曲線変化とした。本論文の疲労試験における応力の表示には、下限応力の影響を考慮して応力振幅を用いている。舗装用コンクリートの曲げ疲労は繰り返し応力の影響を受けており、その耐久線図には修正 Goodman 線図の関係が成立する<sup>8)</sup>。疲労試験において、必ずある程度の荷重変動を伴うため、下限応力を 0 とすると衝撃が加わり真の繰り返し

返し回数より小さい値で破壊に至る可能性がある。そこで、下限荷重を 7.84kN とし、修正 Goodman 線図を用いて下限応力を 0%へ修正した応力振幅を用いて試験結果を整理した。応力振幅は 0.67, 0.73, 0.78, 0.83, 0.88 の 5 水準に設定した。また、繰り返し载荷回数が 200 万回で破壊しない場合は、途中打ち切りとした。

### 3 結果と考察

#### 3・1 静的曲げ試験

各配合における初期材齢 (1~7 日) の静的曲げ強度を Fig.1 に示す。本研究で主対象とした HVFA 舗装コンクリート (No.1) は、材齢 5 日で静的曲げ強度が 4.6MPa となり、目標曲げ強度の 4.5MPa を上回った。さらに、材齢 7 日では静的曲げ強度 4.8MPa に達した。コンクリート舗装は、現場養生を行った供試体の曲げ強度が配合強度の 70%以上 (3.5MPa) を超過した時点で交通解放される<sup>4)</sup>。この HVFA 舗装コンクリート (No.1) は、材齢 2 日で交通解放できる強度 (3.5MPa) を超過している。この結果は普通ポルトランドセメント (OPC) を使用したものであるが、早強ポルトランドセメント (HPC) を用いれば、FA 置換率 40%の舗装コンクリートでも 1-DAYPAVE のように材齢 1 日で交通開放できるレベルの強度を確保できる可能性も考えられる。そこで、HPC を用いてコンクリート (No.4) を打設し、現場養生を模してコンクリート表面を養生布で覆って湿潤状態になるよう散水を行い、試験材齢まで養生を行った後、同様に静的曲げ強度試験を実施した。材齢 1, 2, 3, 7 日における静的曲げ強度を Fig.2 に示す。なお、ここに示す No.1 の静的曲げ強度は、水中養生下の結果 (Fig.1) と異なり、No.4 と同じ現場養生の条件下で得られた結果である。HPC を用いた FA 置換率 40%の舗装コンクリート (No.4) は、現場養生を模した環境でも材齢 1 日で曲げ強度 3.9MPa となり、交通解放できる強度 (3.5MPa) を超過することができた。

鶴田ら<sup>9)</sup>および Bentz ら<sup>9)</sup>は、LP の充填作用やエアライトの水和促進効果によって若材齢コンクリートの強度増進が認められると報告している。本研究においても、Fig.1 に示すように、LP を混和しない配合 (No.3) よりも LP を混和した配合 (No.1) の方が、材齢 1 日の曲げ強度が 0.5MPa 大きく、初期強度は高い傾向を示した。さらに FA 置換率 40%で Kumar ら<sup>4)</sup>が行った水結合材比  $w/cm=0.34$  の HVFA 舗装コンクリート、および Naik ら<sup>5)</sup>が行った  $w/cm=0.36$  の HVFA 舗装コンクリートの静的曲げ強度と比較しても、本研究の HVFA 舗装コンクリート (No.1) の方が初期材齢から高い強度を示した。したがって、LP を HVFA 舗装コンクリートに適量混和することで、初期強度を向上させることができ、交通開放の早期化に寄与できるものと考えられる。

各配合における材齢 7~91 日までの静的曲げ強度を Fig.3 に示す。FA を 40%内割置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) は、単位セメント量が  $200\text{kg}/\text{m}^3$  と少ないため、材齢 7 日の静的曲げ強度は No.2 の舗装コンクリー

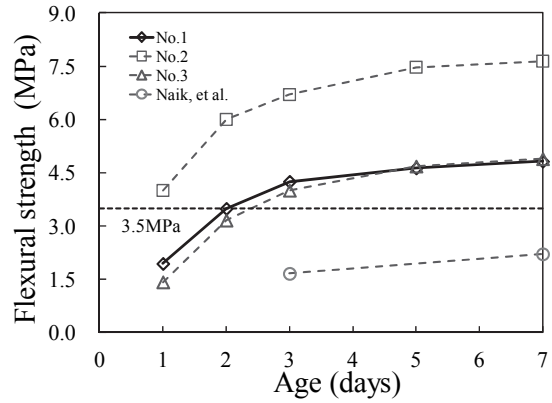


Fig.1 Flexural strength at early age.

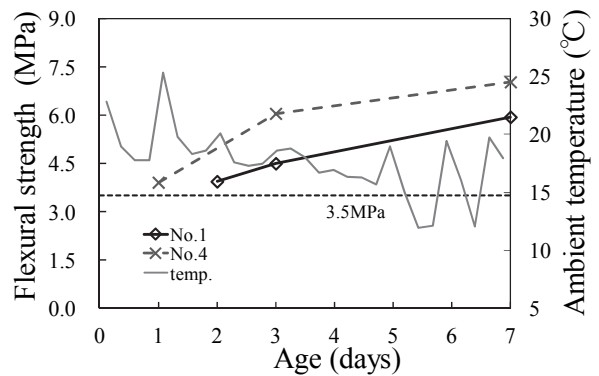


Fig.2 Flexural strength of HVFA concrete made with HPC/OPC.

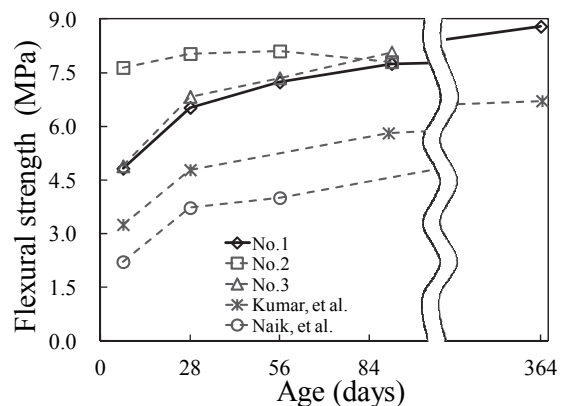


Fig.3 Flexural strength development.

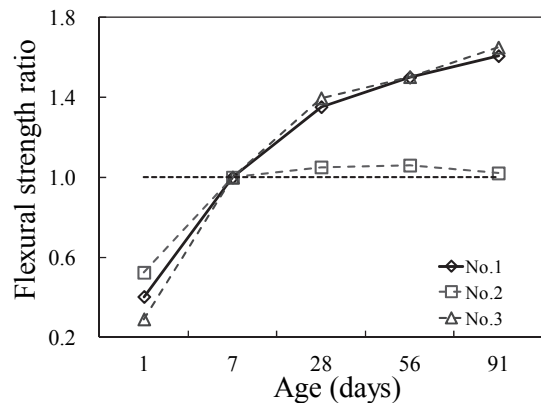


Fig.4 Flexural strength ratio.

トよりも著しく小さくなる。しかしながら、No.2 の配合では、材齢 28 日以降の静的曲げ強度の増加はほとんどみられない。また、Fig.3 に示すように FA を 40%置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) は、単位セメント量が  $200\text{kg/m}^3$  と少ないため、材齢 28 日の静的曲げ強度は  $6.5\text{MPa}$  程度となり、FA によるセメント置換を行わない舗装コンクリート (No.2) の材齢 28 日静的曲げ強度  $8.0\text{MPa}$  より小さかったが、それ以降でも静的曲げ強度の増進がみられた。これは、長期材齢におよぶ FA のポズラン反応に伴う強度増進効果と思われる。なお、材齢 182 日では FA を用いないコンクリート (No.2) と同等のレベルまで強度増進しており、材齢 364 日では上回っている。加藤ら<sup>10)</sup>によれば、FA を大量に使用した舗装コンクリートの静的曲げ強度は材齢 364 日においても増進することが報告されており、本研究においても同様の結果が得られた。

また、No.3 の配合では LP を混和していないため、材齢 5 日までの静的曲げ強度は FA を 40%置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) と比較して低い値を示したが、材齢 7 日ではほぼ同等となり、材齢 7 日以降の材齢では同様の強度増進を示した。

各配合について長期材齢における強度増進を比較するため、材齢 7 日強度に対する材齢 1, 7, 28, 56, 91 日の静的曲げ強度の比を Fig.4 に示す。材齢 7 日から 91 日の間において、FA を用いた舗装コンクリート (No.1, No.3) の静的曲げ強度比は増進し、材齢 91 日では 1.6 にも達している。一方、FA を用いない舗装コンクリート (No.2) は、材齢 7 日以降の静的曲げ強度比にほとんど変化はみられない。これらの結果からも、FA 置換率 40%の HVFA 舗装コンクリートは一般的な FA を置換しない舗装コンクリートと比べ、長期的に FA のポズラン反応により強度の増進が期待できることが窺える。

### 3・2 初期強度発現の回帰

FA はセメントに一部代替置換した場合、コンクリートの初期強度発現が緩慢になることが知られ、その強度発現を予想しておくことが望まれる。西村ら<sup>11)</sup>は、レディミクストコンクリートの工場教社において、共通配合で作製した FA コンクリートの圧縮強度試験を実施し、若材齢から長期材齢に至る強度発現性について Gompertz 式と Goral 式の比較を行っている。その結果、圧縮強度の発現性予測には、Gompertz 式よりも Goral 式の方が FA コンクリートの強度発現の推定に適していると報告している。しかしながら、曲げ試験を主対象とする本研究では、Goral 式よりも早期に一定値に収束できる Gompertz 式の方が、材齢 7 日までの曲げ強度発現を適切に回帰できたことから、以下では Gompertz 式による回帰結果について示す。

材齢 7 日までの静的曲げ強度が配合によって異なることから、初期強度発現の比較を容易にするため、一般化 Gompertz 式を変形し、強度比 (各材齢における静的曲げ強度/材齢 7 日における静的曲げ強度) に対し、式 (1)

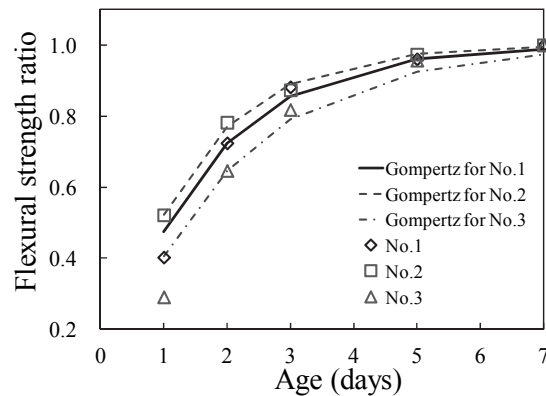


Fig.5 Flexural strength prediction formula (age of 1-7 days).

Table 4 Regression and correlation coefficients (age of 1-7 days).

No.	C	R
No.1	0.644	0.997
No.2	0.737	0.999
No.3	0.520	0.996

を用いて回帰を行った。実験係数を最小二乗法により決定し、各配合における実験係数  $C$  を求めた。

$$K_{t/7} = \frac{f_f(t)}{f_f(7)} = 1 - \text{EXP}(-C \cdot t) \quad (1)$$

ここで、 $K_{t/7}$ : 材齢 7 日強度に対する各材齢の静的曲げ強度比

$f_f(t)$ : 材齢  $t$  日における静的曲げ強度 (MPa)

$f_f(7)$ : 材齢 7 日における静的曲げ強度 (MPa)

$C$ : 回帰係数

$t$ : 材齢 (日)

各配合における材齢 1~7 日の曲げ強度の回帰結果を Fig.5 に示すとともに、回帰によって得られた係数  $C$  および相関係数  $R$  を Table.4 に示す。なお、Table.4 に示す回帰係数  $C$  は強度発現速度に関する定数を示すものである。

セメント質量に対して FA を 40%置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) と FA によるセメント置換を行わない舗装コンクリート (No.2) について回帰係数を比較すると、No.1 では 0.644, No.2 では 0.737 となったことから、HVFA 舗装コンクリートの初期強度発現が遅いことが確認できる。しかしながら、この HVFA 舗装コンクリート (No.1) の回帰係数  $C$  (0.644) は、LP の代わりに FA を用いた舗装コンクリート (No.3) の回帰係数  $C$  (0.520) に比べて高くなっており、これは LP による初期強度増進効果を裏付けるものである。さらに、相関係数  $R$  から、静的曲げ強度の発現性の回帰には、Gompertz 式の妥当性が窺えた。

### 3・3 曲げ疲労試験

Table 5 は本研究で行った FA 置換率 40%の舗装コンクリート (No.1) の曲げ疲労試験結果を示したものである。表中の記号について、 $S$  は応力振幅、 $N$  は破壊回数、 $P(N)$

Table 5 Flexural fatigue test results.

$S$	$r$	$N$	$P(N)$
0.88	1	96	0.889
	2	239	0.778
	3	288	0.667
	4	421	0.556
	5	824	0.444
	6	852	0.333
	7	3735	0.222
	8	10260	0.111
0.83	1	540	0.875
	2	959	0.750
	3	1667	0.625
	4	3477	0.500
	5	7009	0.375
	6	15336	0.250
	7	118443	0.125
0.78	1	3215	0.889
	2	6149	0.778
	3	13738	0.667
	4	17922	0.556
	5	46411	0.444
	6	105376	0.333
	7	173360	0.222
	8	308666	0.111
0.73	1	674899	0.857
	2	754800	0.714
	3	839399	0.571
	4	2000000	0.429
	5	2000000	N/A
0.67	1	249379	0.800
	2	2000000	0.600
	3	2000000	N/A

は生存確率を表している。この結果より各応力振幅の破壊回数は疲労現象特有のばらつきを示しているため、順序統計量の理論<sup>12)</sup>を用いた。また、表中の生存確率  $P(N)$  は順序統計量の理論を適用し (2) より求めた。

$$P(N) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (2)$$

ここで、 $r$  : 各応力レベルの繰り返し回数の小さいものからの順位

$n$  : 各応力レベルの供試体本数

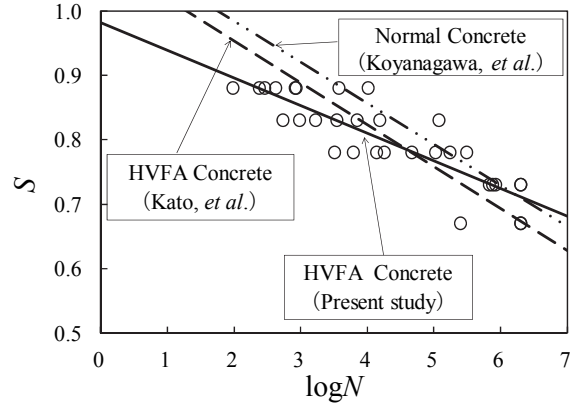


Fig.6 Fatigue test results.

なお、繰り返し回数 200 万回での途中打ち切りデータが含まれる場合にはそのデータの処理が問題となる。本研究では浜田ら<sup>13)</sup>の解析方法を踏まえて  $P(N)$  を推定する方法を適用した。 $n$  個の供試体のうち  $m$  個が 200 万回までに破壊しなかった場合、 $(n+m+1)$  番目の供試体が破壊したとみなすと、 $P(N)$  は式 (3) で求められるとしている。

$$P(N) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (3)$$

また、本研究のような疲労試験において下限応力の影響を無視することができない。そこで、修正 Goodman 線図<sup>8)</sup>を用いて下限応力を 0% へ修正した応力振幅を用いて試験結果を整理した。Fig.6 には、本試験結果から得られた  $S-N$  曲線と併せて、小梁川ら<sup>14)</sup>が行った普通コンクリートの  $S-N$  曲線および加藤ら<sup>15)</sup>が行った HVFA 舗装コンクリート (FA 置換率 50%) の  $S-N$  曲線を本研究と同一条件に修正し、本試験結果との比較を行うものとする。なお、これらは生存確率が 50% のときの  $S-N$  曲線、すなわち  $P(N)=0.5$  のときの  $S-N$  曲線および 200 万回疲労強度を示している。本研究の FA 置換率 40% の舗装コンクリートの  $S-N$  曲線は、既往の研究に比べ、傾き、切片ともに小さな値となった。200 万回疲労強度をみると、本研究では 0.71 となり、加藤らの 0.68 と比較すると差は 3% 程度にすぎない。また、普通コンクリートを用いた小梁川らの研究結果と比較しても 0.71 と同等の値を得ている。このことより、本研究の舗装コンクリートの曲げ疲労は、普通コンクリートの曲げ疲労とほぼ同等であると推測される。

#### 4 結 言

本研究は、初期から長期材齢にかけて強度増進でき、セメント原料としてリサイクル可能な舗装コンクリー

Table 6 Fatigue strength and  $S-N$  curves.

Concrete	Authors	$S-N$ curve	Fatigue limit*
HVFA Concrete	The present study	$S = -0.043 \log N + 0.983$	0.71
HVFA Concrete	Kato <i>et al.</i>	$S = -0.065 \log N + 1.084$	0.68
Normal Concrete	Koyanagawa <i>et al.</i>	$S = -0.064 \log N + 1.113$	0.71

\*: at 2 million cycles



トの開発を目的とし、FA と LP を用いた HVFA 舗装コンクリートの曲げ強度および曲げ疲労強度特性について検討したものである。本研究の範囲内で得られた結論を以下に記す。

- (1) 普通ポルトランドセメントに対して、FA を質量比 40%置換した HVFA 舗装コンクリート (No.1) の静的曲げ強度は、材齢 2 日で交通解放が可能となる曲げ強度 3.5MPa を、材齢 5 日で 4.5MPa を超過できる。さらに、早強ポルトランドセメントを用いた HVFA 舗装コンクリート (No.4) は、現場養生を模した環境でも材齢 1 日で曲げ強度 3.9MPa を示し、早期交通解放にも対応できることがわかった。
- (2) FA を 40%置換した舗装コンクリート (No.1, 3) では、材齢 91 日で FA 無置換の舗装コンクリート (No.2) の静的曲げ強度とほぼ同等になり、材齢 364 日では上回った。
- (3) 石灰石微粉末を混和した HVFA 舗装コンクリート (No.1) は、混和しないコンクリート (No.3) よりも材齢 1 日で 0.5MPa 高い曲げ強度を示すなど、初期強度発現が高くなり、早期交通開放に寄与できる。
- (4) 材齢 7 日強度を基準とする曲げ強度比に対して本研究で示した Gompertz 式を用いることで、初期強度発現を予測評価することができる。
- (5) HVFA 舗装コンクリート (No.1) の 200 万回疲労強度は、既往の舗装コンクリートと有意な差異はなく、従来の曲げ疲労特性と同等と考えて設計することができる。

#### 参 考 文 献

- 1) Shizen enerugi Hakusho 2013, "Agency for Natural Resources and Energy 2013".
- 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Road Bureau and Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism City Bureau, "Road relation budget budgetary request outline in 2012" (2011).
- 3) Y.Kato, S.Hamada, T.Ichioka and R.Kobayashi, "Flexural strength of pavement concrete with high volume fly ash", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.6, pp.563-568 (2006).
- 4) B.Kumar, G.K.Tike and P.K.Nanda, "Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete for pavements", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.19, No.10, pp.906-911 (2007).

- 5) T.R. Naik, B.W. Ramme and J.H. Tews, "Pavement construction with high-volume class C and class F fly ash concrete", ACI Materials Journal, No.92, pp.200-210 (1995).
- 6) M.Tsuruta, A.Obatake and H.Nakamura, "Properties of matter of the concrete which replaced a part of fine aggregate with a limestone powder", Proceedings of JCI, Vol. 26, No.1, pp.99-104 (2004).
- 7) F.Tomosawa, T.Noguchi, A.Oshio and K.Sakai, "Study on practical application of completely recyclable concrete, part 1. general scheme and various completely recyclable concrete", Architectural Institute of Japan, pp.393-394 (1996).
- 8) R.Kobayashi, Y.Kato and S.Hamada, "Bending fatigue strength of pavement concretes with normal and recycled aggregates", Journal of Pavement Engineering, JSCE, Vol.2, pp.29-36 (1997).
- 9) D.P.Bentz, T.Sato, I.Varga and J.Weiss, "Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures", Cement and Concrete Composites, Vol.34, pp.11-17 (2012).
- 10) Y.Kato, S.Hamada, T.Ichioka and R.Kobayashi, "Long-term characteristics of high volume fly ash concrete strength and design method for thickness of the pavement", Journal of Construction Management and Engineering, JSCE, Vol.63, No.1, pp.66-71 (2007).
- 11) H.Nishimura, I.Yoshitake, K.Takahashi and T.Saito, "Prediction formula for compressive strength of fly ash concrete based on common tests", Proceedings of JCI, Vol. 32, No.1, pp.161-166 (2010).
- 12) H.Ishikawa, "Reliability analysis of fatigue lives of machines and structures under service loads (part II. weibull failure model and TTF based on order statistics)", The Society of Materials Science, Japan, Vol. 24, No.260, pp.121-132 (1975).
- 13) S.Hamada, K.Nakagawa and M.Naruoka, "On the treatment of censored date in fatigue test", Proceedings of JSCE, Japan, Vol.189, pp.99-105 (1971).
- 14) M.Koyanagawa, H.Yoneya and T.Fukuda, "Flexural fatigue strength equation for concrete pavement slab design in consideration of probabilistic properties", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, Vol.426/V-14, pp.151-157 (1991).
- 15) Y.Kato, S.Hamada, T.Ichioka and R.Kobayashi, "Flexural fatigue strength and design by the  $P-S-N$  curve for HVFA pavement concrete", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.4, pp.377-382 (2007).