論文　細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの曲げ疲労強度

岡田 亮太[*1]・松尾 栄治[*2]・樋野 和俊[*3]・浜田 純夫[*4]

要旨：海砂の不足問題が顕在化しているセメント・コンクリート分野において，発生量が年々増加傾向にある石炭灰を細骨材代替材料として用いるメリットは大きい。本研究では細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの曲げ疲労特性を明らかにするため，疲労試験を行い，普通コンクリート，普通転圧コンクリートの S-N 曲線との比較を行った。さらに疲労強度のばらつきの原因を，静的曲げ強度のばらつき，配合要因から検討した。

キーワード：石炭灰，転圧コンクリート，曲げ強度，疲労強度，ばらつき

1.　はじめに

近年，循環型社会を目指す動きが活発であり，年々増加傾向を示す産業廃棄物や建設副産物として排出される各種粉体の有効利用もその一環である。石炭火力発電所における石炭灰の排出量もエネルギー需要とともに増加傾向を示しており，2010 年には 700 万トンを超えると予想され [1)]，処分地不足，処分費の高騰，環境負荷の問題が深刻化している。一方，海砂の過剰採取による環境への悪影響から，中国地方を中心に良質な細骨材の採取が極めて困難になっている。

このような背景から，石炭灰をコンクリート用細骨材の一部として利用する研究が盛んに行われている。筆者らはこれまでに，細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの配合設計方法を明らかにするとともに [2)]，得られた最適配合に基づき室内実験および実施工による検討 [3)] を行ってきた。その結果，室内実験における最適配合の静的曲げ強度は，材齢 28 日において，転圧コンクリートにおける一般的な配合強度である 5.7MPa を満足した。また実施工試験からは，室内実験での最適配合に対し，水粉体比を 3%程度高めに設定することで目標締固め率 96%を満たし，材齢 28 日において目標配合強度 5.7MPa を満たすことなどを明らかとした。

本研究が対象とする転圧コンクリート舗装を含むわが国のコンクリート舗装の設計法は，コンクリート舗装版に交通荷重による応力と温度変化による応力の合成応力が繰返し載荷され，それによって曲げ疲労破壊が生じることを設計原理としている。したがって，この設計法においてコンクリート舗装版の曲げ疲労破壊は，コンクリート舗装版の供用寿命を予測する重要な役割を担っており，特に実績のない新しい材料を用いたコンクリート舗装版の場合には，その疲労特性を明確にしておくことが必要である。

そこで本研究では，細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリート（以下 NS-FA 転圧コンクリート）について曲げ疲労試験を行い，得られた S-N 曲線について，普通コンクリート，一般的な転圧コンクリートの疲労試験を行っている既往の研究結果との比較を行った。また，疲労強度のばらつきについても検討を行った。

2.　実験方法

2.1　使用材料および配合

本研究で用いたセメントは早強ポルトランドセメントであり，粗骨材は山口県宮野産安山岩

*1 山口大学大学院　理工学研究科（正会員）
*2 山口大学助手　工学部社会建設工学科　博（工）（正会員）
*3 中国電力㈱　土木部　石炭灰有効活用プロジェクト　専任係長
*4 山口大学教授　工学部社会建設工学科　Ph.D.（正会員）

砕石（最大寸法 20mm，密度 2.71g/cm^3，実積率 59%）を使用した。また，石炭灰として中国電力㈱新小野田発電所の石炭灰原粉を使用した。その物理試験結果を**表-１**に示すが，強熱減量，28 日活性度指数以外は JIS 規格のⅡ種に相当する。また，**図-１**に石炭灰原粉の粒度分布を示す。

試験に用いた転圧コンクリートは，締固め率 96%，材齢 28 日における曲げ強度 5.7MPa を目標[4]とした。**表-２**にその配合および静的曲げ強度試験結果を示す。練混ぜは強制練りミキサを用いて行い，粗骨材と石炭灰を投入後，60 秒間の空練りを行った。その後，セメント，水の順に投入し，それぞれ 60 秒間練混ぜを行った。なお，それぞれの材料投入後 30 秒で一旦ミキサを停止させ，ミキサ側面のかき落としを行った。供試体の寸法は 15×15×53（cm）である。締固めは振動締固めとし，2 層に分け各層において全体的にペーストの流動化が確認できるまで締固めを行った。疲労試験開始まで水温 20℃の恒温水槽で養生を行った。また，疲労試験は供試体作製後，180 日以降に開始した。

2.2　試験方法

載荷方法は静的強度試験，疲労試験ともにスパン 45cm の 3 等分点載荷とした。試験装置は電気油圧サーボ方式の振動疲労試験装置を用いた。(**図-２**)疲労試験の応力波形は，周波数 3Hz の正弦曲線変化とした。疲労試験で応力を表示する場合に，応力振幅，上限応力比のいずれを基本にするかは議論の必要性があるが，本研究では下限荷重の影響が無視できないことを考慮し，応力振幅の考え方を採用した。応力振幅は 0.4，0.5，0.6，0.65，0.7 の 5 段階と設定し，下限荷重は静的曲げ強度の 10%とした。また，供試体が破壊しない場合の途中打切り回数は 200 万回とした。

3.　実験結果

3.1　S-N 曲線

表-３に疲労試験結果を示す。この結果から明らかなように，各応力振幅のデータは疲労現象特有のばらつきを示しているので，順序統計量

表-１　石炭灰原粉の物理的性状

項目		結果
湿分 (%)		0.1
強熱減量 (%)		5.3
SiO_2 (%)		55.4
密度 (g/cm^3)		2.12
フロー値比 (%)		103
吸水率 (%)		0
粉末度	45×10^{-6}mふるい残分 (%)	21
	比表面積 (cm^2/g)	3,560
活性度指数	28日 (%)	75
	91日 (%)	91

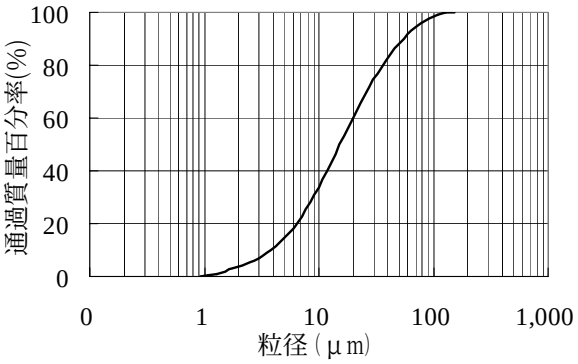

図-１　石炭灰原粉の粒度分布

表-２　疲労試験に用いた供試体の配合と強度

単位粗骨材容積（%）	W/(C+FA)（%）	W/C（%）	単位量（kg/m^3）			
			C	W	石炭灰	G
100	23	49.7	300	149	349	1599
平均静的曲げ強度　f_{br}:6.47（MPa） （供試体数:8体，変動係数:8.9%）						

図-２　疲労試験概略図

の理論[5]を用いて解析を行った。表中の生存確率 P(N)は順序統計量の理論を適用し式(1)より求めた。

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

ここで，r：破壊時の繰返し回数の小さいものからの順位

n：同一条件で試験を行った供試体数

なお，200 万回での途中打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[6]が示している順序統計量に対して合理的解釈を与え P(N)を推定する方法を適用した。すなわち，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＋1)の供試体が実験に供されたとして 200 万回で(n－m＋1)番目の供試体が破壊したとみなすと，P(N)は式(2)で求められるとしている。

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

コンクリートの疲労寿命の分布形に関しては,対数正規分布関数，Weibull 分布関数，McCall 分布関数などの各種モデルが提案[5]されているが，本研究では疲労試験結果を対数正規分布関数に当てはめる一般的な手法で解析し，既往の研究結果との比較を試みた。対数正規分布関数を用いた場合の P(N)と N の関係は式(3)で回帰することができる。またその場合に，P(N)＝0.5(t＝0)に相応する平均疲労寿命 m(logN)および標準偏差σ(logN)は，それぞれ式(4)と式(5)で表すことができる。

$$t = A\log N + B \qquad (3)$$

$$m(\log N) = -\frac{B}{A} \qquad (4)$$

$$\sigma(\log N) = \frac{1}{A} \qquad (5)$$

表-３　疲労試験結果

S	r	N	P（N）
0.70	1	1,096	0.857
	2	1,097	0.714
	3	2,258	0.571
	4	151,342	0.429
	5	184,661	0.286
	6	296,041	0.143
0.65	1	2,583	0.857
	2	3,809	0.714
	3	43,352	0.571
	4	145,090	0.429
	5	268,857	0.286
	6	293,985	0.143
0.60	1	19,091	0.857
	2	185,517	0.714
	3	199,659	0.571
	4	471,992	0.429
	5	846,016	0.286
	6	1,752,825	0.143
0.50	1	75,015	0.857
	2	164,728	0.714
	3	552,750	0.571
	4	578,420	0.429
	5	1,361,287	0.286
	6	1,367,656	0.143
0.40	1	1,186,366	0.750
	2	2,000,000	0.500

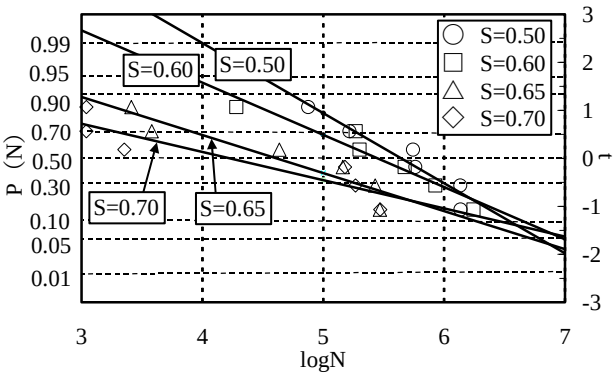

図-３　対数正規確率紙における P(N)-N 曲線

ここで，A および B は実験より求まる定数であり，t は正規分布曲線の対称軸からの距離で，任意の P(N)に対して標準正規積分表より求まる。**図-３**は，P(N)と N の関係を対数確率紙上にプロットしたものである。この図においてデータは概ね一直線上に並んでおり，各応力振幅のデータがそれぞれ対数正規分布の母集団に属しているとみなすことができる。

表-４は，各応力振幅の t と N の関係を N 軸

方向の最小二乗法で求めた回帰式と，式(4)と式(5)より求めた平均疲労寿命 m(logN)および標準偏差σ(logN)を示したものである。表中のm(logN)とSの関係をN軸方向の最小二乗法で求めることにより，P(N)＝0.5の場合のS-N曲線が式(6)のように得られる。

$$S = -0.140 \log N + 1.302 \qquad (6)$$

3.2 S-N曲線の評価

表-5は，小梁川ら[7]井上ら[8]小林ら[9)10)]および本研究で得られたP(N)＝0.5のときのS-N曲線式，200万回疲労強度，各応力振幅での疲労寿命の標準偏差σ(logN)の範囲，全測点のS-N曲線からのN軸方向のばらつきの標準偏差を示している。**図-4**は，**表-5**において下限応力が基準強度(静的強度)の10%の場合における各S-N曲線を示したものである。**図-3**より，NS-FA転圧コンクリートのS-N曲線は，一般的な転圧コンクリートおよび一種再生骨材を使用した転圧コンクリートのS-N曲線と比較し，傾きが大きく応力振幅が小さくなるほど同一応力振幅での疲労強度の差が大きくなっている。このことから，一般的な転圧コンクリートと比較し，NS-FA転圧コンクリートの繰返し荷重に対する耐久性能は，応力振幅が小さくなるほど低下することが明らかとなった。

また，設計に用いられる200万回疲労強度は，生存確率50%では半分が供用中に限界疲労状態に達する可能性があるため，もう少し高い生存確率の値での限界疲労強度が設定される。**図-5**は，得られたS-N曲線についてN軸方向のばらつきの標準偏差σ(S-N)（**表-5**参照）を求め，±1σ(S-N)と±2σ(S-N)の範囲を示したも

表-4　各応力振幅のtとNの回帰式

S	回帰式	m(logN)	σ(logN)
0.70	t=－0.59･logN＋2.48	4.225	1.701
0.65	t=－0.79･logN＋3.66	4.615	1.261
0.60	t=－1.09･logN＋5.93	5.449	0.919
0.50	t=－1.46･logN＋8.24	5.644	0.685
0.40	t=－2.97･logN＋18.74	6.301	0.336

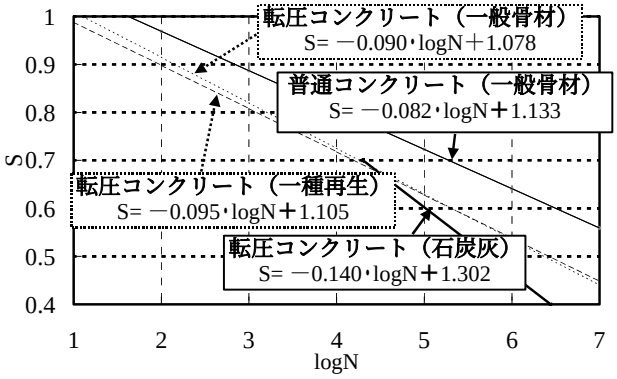

図-4　本研究および他研究者のS-N曲線

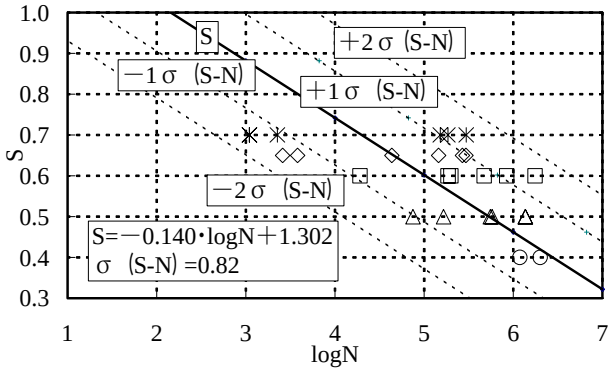

図-5　疲労寿命のばらつきとS-N曲線

表-5　各疲労試験におけるS-N曲線，σ(logN)，σ(S-N)

コンクリート	使用骨材	試験者	S-N曲線	200万回強度	σ（logN）	σ（S-N）
普通コンクリート	一般骨材	小梁川	S=-0.111･logN+1.339 (S=-0.082･logN+1.133)	0.64 (0.57)	0.70～1.14	0.732
転圧コンクリート	一般骨材	井上	S=-0.105･logN+1.213 (S=-0.090･logN+1.078)	0.55 (0.5)	0.65～0.89	0.574
	一種再生骨材	小林	S=-0.095･logN+1.105	0.51	0.65～1.49	0.786
	フライアッシュ	筆者	S=-0.140･logN+1.302	0.42	0.34～1.70	0.822

注：(　)は疲労試験時の下限応力を同一レベルに修正した場合のS-N曲線

のである。－1(S-N)と－2σ(S-N)の曲線はそれぞれ P(N)が 0.86 および 0.98 の S-N 曲線に相当することになる。200 万回疲労強度 S は，P(N)＝0.86 のとき 0.30，P(N)＝0.96 のとき 0.19 となり，設計における限界疲労強度は小さくなる。

3.3　ばらつきに関する検討

(1)静的曲げ強度

表-6 は，小林らが行った普通コンクリート(一般骨材使用)および転圧コンクリート（一種再生骨材使用），筆者らが行った NS-FA 転圧コンクリートの静的曲げ強度の変動係数を示したものである。転圧コンクリートの静的曲げ試験材齢が，普通コンクリートの静的曲げ強度試験材齢と比較し長期であるため，転圧コンクリートの強度が安定するであろうことも考慮すると，転圧コンクリートの静的曲げ強度の変動係数は，普通コンクリートと比較し明らかに大きな値を示している。これは，転圧コンクリート特有の締固めに起因する供試体密度のばらつきに起因するものであると考えられる。

図-6 に締固め率と静的曲げ強度の関係を示す。締固め率 97%付近の静的曲げ強度に注目すると，締固め率がほぼ同等の場合においても静的曲げ強度のばらつきが大きくなっている。このことから，NS-FA 転圧コンクリートの曲げ強度のばらつきは締固め率以外の要因にも影響を受けるものと考えられる。

例えば本研究のように極めて水粉体比が小さく，しかも粉体が混合体である場合は，練混ぜ方法の影響も大きいと考えられる。すなわち練混ぜを十分に行っても，単位水量の全てがセメント粒子との反応に使われるのではなく，練混ぜ時にまず石炭灰粒子の表面に吸着されてしまい水和に寄与しない水分があると推察される。その場合はモルタル（＝ペースト）マトリックス強度のばらつきの一因ともなり得るため，その確認と定量化および練混ぜ順序などの検討が今後の重要課題となる。また他には，水粉体比が小さいことによる自己収縮ひずみの増大が，

表-6　静的曲げ強度の変動係数

コンクリート	使用骨材	変動係数（%）	目標強度（MPa）	個数（個）
普通コンクリート	一般骨材	6.2	3.9	24
		6.9	5.9	24
転圧コンクリート	一種再生	8.0	5.1	13
	石炭灰	8.9	5.7	8

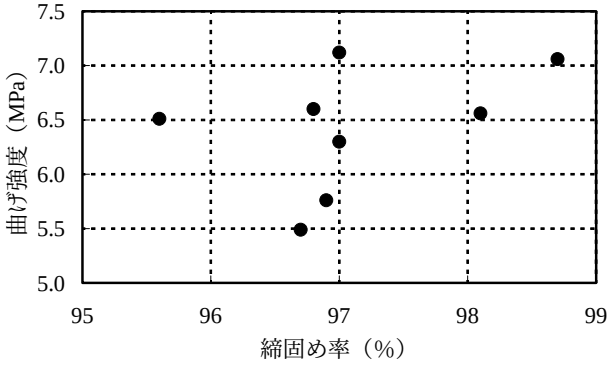

図-6　締固め率と静的曲げ強度の関係

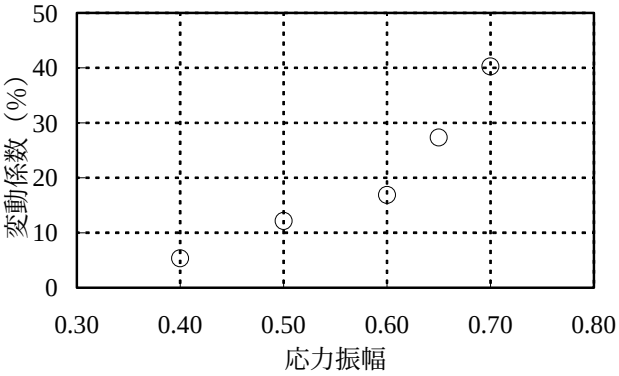

図-7　各応力振幅と破壊回数の変動係数

硬化モルタルの内部構造において不均一性を増大させた可能性もある。

また**表-2** に示したように，NS-FA 転圧コンクリートの単位粗骨材量は実積率近傍まで高めた値となっており，一般的な転圧コンクリートと比較しモルタルと粗骨材の境界面積は大きくなる。この場合，骨材とペーストの境界面は骨材同士が直接接触する状態の部分が多くなり，骨材とペーストの付着面積が減少する。

本研究のように単位粗骨材量が大きい配合の場合，モルタル粗骨材間の付着状態，ペースト

を介さない骨材同士の接触に近い部分の分布は，供試体により大きく異なると考えられる。これが付着強度の減少，ひいては応力集中の原因となる箇所のばらつきが生じ，静的強度のばらつきの原因となると考えられる。

(2)疲労試験の破壊回数

表-5より NS-FA 転圧コンクリートの疲労試験における破壊回数の標準偏差は,既往の研究と比較すると最も大きい値となっている。コンクリートの疲労寿命のばらつきは,静的強度のばらつきと密接に関係することから，前述の静的強度のばらつきが,破壊回数のばらつきに起因していると考えられる。

図-7に,各応力振幅と破壊回数の変動係数の関係を示す。この図より，応力振幅が大きいほど破壊回数のばらつきが大きいことがわかる。すなわち，NS-FA 転圧コンクリートは骨材同士が接触に近い状態で存在するため，モルタルの内部構造が不均質となる。そのため繰返し荷重が大きくなるほど，モルタルと骨材界面の接着強度が変動しやすい。結果的に曲げに対する弱点が発生しやすくなるため，曲げ疲労に対する抵抗性が低下している。このことは静的試験結果のばらつきにも反映されていると考えられる。

4. まとめ

(1) NS-FA 転圧コンクリートの S-N 曲線は，一般的な転圧コンクリートの S-N 曲線と比較し，応力振幅が小さくなるほど疲労強度の差が大きいものとなる。

(2) NS-FA 転圧コンクリートのばらつきは，モルタルの硬化性状およびモルタルと粗骨材における境界面の付着の不均一性に起因すると考えられる。

(3) NS-FA 転圧コンクリートの曲げ疲労破壊に対する弱点は，繰返し荷重が大きいほど顕著に現れる傾向がみられる。

【参考文献】

1) コンクリート委員会　コンクリート資源有効利用小委員会：ｺﾝｸﾘｰﾄﾗｲﾌﾞﾗﾘｰ「資源有効利用の現状と課題」，土木学会，平成 11 年

2) 岡田亮太，松尾栄治，斉藤 直，浜田純夫：細骨材使用量をゼロとしたフライアッシュ転圧コンクリートの性状，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1395-1400，2002

3) 岡田亮太，松尾栄治，樋野和俊，浜田純夫：細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの実施工試験，土木学会第 57 回年次学術講演回，pp.479-480，2002

4) 舗装委員会，セメントコンクリート舗装小委員会：転圧コンクリート舗装技術指針（案），（社）日本道路協会，平成 2 年 5 月

5) 石橋忠良，児島孝之，坂田憲次，松下博通：コンクリート構造物の耐久性シリーズ　疲労，pp. 41，技報堂出版，1987.9

6) 浜田純夫，中川建治，成岡昌夫：疲労試験における途中打切りデータの処理に関する研究，土木学会論文報告集，第 189 号，pp.99-105，1971.5

7) 小梁川 雅，国府勝郎，福田 正：コンクリート舗装版の曲げ強度に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 372 号，pp.131-137，1986.8

8) 井上岳美，尾本志展：転圧ｺﾝｸﾘｰﾄの疲労，第 42 回セメント技術年報，pp.543-546，1988

9) 小林良太，浜田純夫，上田 満：コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの曲げ疲労特性に関する研究，土木学会論文集，No.546，pp.133-143，1996.9

10) 小林良太，浜田純夫，加藤康弘：コンクリート再生骨材を使用したコンクリート舗装版の曲げ疲労特性に関する研究，土木学会論文集，No.581，pp.155-160，1997