

# 論文 骨材強度と練混ぜ時の骨材の破碎性に関する検討

加藤 俊二<sup>\*1</sup>・河野 広隆<sup>\*2</sup>・森濱和正<sup>\*3</sup>・土屋浩樹<sup>\*4</sup>

要旨：低品質骨材の有効利用を目的として、これらをコンクリートに用いる際に要求される特性の評価手法の確立をめざし、骨材の破碎性およびコンクリートの施工性に着目して骨材の強度試験およびコンクリートの練混ぜ試験を行った。ここでは、骨材強度の確率分布を考慮した骨材全体の弾性係数の評価方法の提案を行うとともに、練混ぜ時の骨材の破碎性および施工性を考えた骨材の評価手法の指標としての修正破碎率の可能性を示した。

キーワード：骨材強度，破碎性，練混ぜ，かけやすさ，粒度変化，コンシステンシー

## 1. はじめに

骨材の低品質化や環境問題等から、良質な天然骨材の採取が次第に困難になっている。このため、これまで廃棄していたような骨材資源（未利用骨材）を有効利用していくことは、環境保全、省資源の観点からも重要な課題である。このためには物性や強度等を考慮した骨材の様々な評価手法の検討が必要である。前報[1]では、骨材の強度はワイブル分布をしており、また破碎試験により骨材強度や破碎性等を評価できる可能性が得られたことを報告した。今回は、硬化コンクリートの弾性係数への影響を考え、骨材強度の確率分布を考慮した粗骨材の弾性係数の評価方法の検討を行うとともに、粗骨材の破碎値等の評価手法をさらに追求しかつ破碎性と施工性に着目し、有スランプコンクリートの練混ぜによる、骨材強度がコンシステンシーに及ぼす影響に関する検討を行った結果を報告する。

## 2. 試験内容

### 2. 1 使用骨材

骨材は、Kダムから採取した砂岩碎石の風化程度で分類したA～DおよびGダムから採取した花崗閃緑岩碎石の熱変成程度で分類したI～IVを用いた。一般的物理試験結果を表-1に示す。なお、骨材の粒度は、例えば40～5mmは4005のように示し、文中の粒径は各粒度の平均径を意味する。また、表中の提案法については後で述べる。

### 2. 2 骨材の強度試験

15080骨材から採取した $\phi 5 \times 10$ cmおよび $\phi 5 \times 5$ cmコア供試体各5個の圧縮強度および点載荷試験、各種粒度ごとに30個の骨材自体の点載荷試験、各種粒度の破碎試験を実施した。

### 2. 3 コンクリートの練混ぜによる粒度変化試験

練混ぜは、容量50 $\ell$ の2軸強制練りで「から練り30秒+本練り90秒」とした。骨材の粒度変化は、練混ぜ前に5mmごとにふるった骨材をそれぞれ計量し、練混ぜ後のコンクリート中の骨材を

<sup>\*1</sup>建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 研究員(正会員)

<sup>\*2</sup>建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 室長、工修(正会員)

<sup>\*3</sup>建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 主任研究員(正会員)

<sup>\*4</sup>(株)アイ・エヌ・エー (正会員)

全量洗い出し、再度ふるい分けて計量した。5mm以下についても同様である。

練混ぜに使用した材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材に骨材Aを破碎して製造したもの、粗骨材にA～Dの4005および2005である。また、コンクリートの配合条件は、C/W=2.5、粗骨材最大寸法40および20mm(以下、Gmax40およびGmax20)について、骨材Aを用いたときにスランプが8cmとなる単位水量、単位粗骨材絶対容積とした。また空気量は4.5～5%となるよう調整した。

表-1 骨材の物理的性状

骨材の種類	粒度	表 乾 比 重	吸水率 (%)	安定性 (%)	実積率 (%)	破碎試験						骨材の圧裂強度		提案法による骨材強度	
						破碎値(%)			修正破碎率(%)			圧裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
						1600	800	400	1600	800	400				
K-A	15080	2.67	0.12	0.01	-	-	-	-	-	-	-	12.3	50.9	-	-
	8040	2.67	0.13	0.01	-	-	-	-	-	-	-	18.8	69.9	-	-
	4020	2.67	0.26	0.05	54.8	-	-	-	-	-	-	23.4	48.1	-	-
	2005	2.66	0.51	0.14	56.5	14.9	-	-	31.5	-	-	31.0	55.6	178.7	6.65
	15005	2.67	0.26	0.05	-	-	-	-	-	-	-	22.7	59.1	-	-
	8005	2.66	0.31	0.07	-	20.0	11.9	7.3	20.0	11.9	7.3	25.7	57.7	184.1	6.77
	4005	2.66	0.39	0.10	57.9	19.1	-	-	26.3	-	-	28.2	52.0	179.1	6.66
K-B	15080	2.68	0.16	0.00	-	-	-	-	-	-	-	10.1	48.2	-	-
	8040	2.67	0.21	0.02	-	-	-	-	-	-	-	14.3	73.5	-	-
	4020	2.65	0.37	0.03	54.4	-	-	-	-	-	-	19.8	43.2	-	-
	2005	2.65	0.58	0.09	56.5	14.9	-	-	28.6	-	-	31.6	45.6	175.1	6.57
	15005	2.66	0.33	0.04	-	-	-	-	-	-	-	21.1	61.5	-	-
	8005	2.66	0.39	0.05	-	19.9	11.1	5.3	19.9	11.1	5.9	24.4	59.4	187.3	6.84
	4005	2.65	0.48	0.06	57.9	20.1	-	-	-	-	-	27.4	46.4	188.7	6.87
K-C	15080	2.67	0.08	0.01	-	-	-	-	-	-	-	12.1	57.8	-	-
	8040	2.66	0.24	0.03	-	-	-	-	-	-	-	11.2	46.4	-	-
	4020	2.64	0.80	0.09	54.7	-	-	-	-	-	-	20.5	35.2	-	-
	2005	2.64	0.93	0.14	56.7	15.5	-	-	32.6	-	-	24.7	46.3	175.5	6.58
	15005	2.65	0.52	0.07	-	-	-	-	-	-	-	18.5	52.9	-	-
	8005	2.65	0.66	0.09	-	22.6	13.2	7.0	22.6	13.2	7.0	20.1	49.5	183.6	6.76
	4005	2.64	0.87	0.11	58.2	19.2	-	-	28.0	-	-	23.2	42.1	174.6	6.56
K-D	15080	2.59	1.41	0.16	-	-	-	-	-	-	-	5.3	99.3	-	-
	8040	2.58	1.81	1.09	-	-	-	-	-	-	-	8.8	95.8	-	-
	4020	2.55	2.83	3.88	55.9	-	-	-	-	-	-	12.4	113.7	-	-
	2005	2.55	2.95	3.69	57.6	22.4	-	-	33.9	-	-	11.8	68.5	97.6	4.64
	15005	2.57	2.25	2.21	-	-	-	-	-	-	-	9.8	86.4	-	-
	8005	2.56	2.54	2.89	-	25.6	17.2	11.4	25.6	17.2	11.4	10.8	83.2	96.2	4.60
	4005	2.55	2.89	3.78	59.6	24.7	-	-	30.4	-	-	11.8	81.9	96.2	4.60
G-I	15080	2.68	0.14	-	51.9	-	-	-	-	-	-	10.7	37.9	-	-
	8040	2.66	0.43	0.26	54.2	-	-	-	-	-	-	17.8	44.5	-	-
	4020	2.66	0.55	0.47	56.9	-	-	-	-	-	-	18.0	41.9	-	-
	2005	2.67	0.66	1.23	57.2	-	-	15.7	-	-	38.4	27.1	51.9	215.7	7.28
	15005	2.67	0.45	-	67.6	-	-	-	-	-	-	19.7	50.2	-	-
	8005	2.66	0.55	0.66	-	20.0	-	-	25.1	-	-	22.1	47.3	213.7	7.23
	4005	2.66	0.61	0.86	59.7	21.0	-	-	27.5	-	-	23.7	48.9	210.5	7.14
G-II	15080	2.67	0.58	-	49.9	-	-	-	-	-	-	7.6	52.4	-	-
	8040	2.66	0.62	2.06	54.2	-	-	-	-	-	-	15.3	32.1	-	-
	4020	2.66	0.72	2.97	56.8	-	-	-	-	-	-	13.0	42.5	-	-
	2005	2.66	0.94	4.52	57.5	-	-	16.0	-	-	38.9	18.7	63.8	204.1	6.97
	15005	2.66	0.72	-	67.6	-	-	-	-	-	-	14.5	53.3	-	-
	8005	2.66	0.76	3.20	-	20.9	-	-	26.0	-	-	16.3	50.2	194.3	6.70
	4005	2.66	0.83	3.76	59.8	22.0	-	-	29.1	-	-	16.6	55.3	187.3	6.51
G-III	15080	2.64	0.85	-	49.7	-	-	-	-	-	-	6.8	55.1	-	-
	8040	2.63	1.09	7.46	54.5	-	-	-	-	-	-	9.3	86.7	-	-
	4020	2.64	1.30	10.0	56.3	-	-	-	-	-	-	9.9	60.1	-	-
	2005	2.63	1.73	6.97	56.8	-	-	17.5	-	-	42.3	14.5	55.7	162.3	5.81
	15005	2.63	1.25	-	67.6	-	-	-	-	-	-	10.7	69.7	-	-
	8005	2.63	1.38	8.17	-	24.6	-	-	30.7	-	-	11.9	70.7	167.2	5.94
	4005	2.63	1.52	8.52	60.0	26.0	-	-	38.3	-	-	12.8	61.4	170.0	6.02
G-IV	15080	2.60	1.82	38.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8040	2.59	3.08	38.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4020	2.61	2.84	44.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2005	2.62	3.01	21.1	58.0	-	-	27.1	-	-	43.9	-	-	-	-
	15005	2.60	2.71	35.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8005	2.61	3.01	34.7	-	30.3	-	-	27.4	-	-	-	-	-	-
	4005	2.61	2.97	32.6	55.8	31.0	-	-	18.5	31.0	-	34.5	-	-	-
K-A	細骨材	2.66	0.79	3.00	66.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3. 試験結果

#### 3. 1 骨材試験結果

##### (1) コア供試体の強度試験

圧縮強度と比重の関係を図-1(a)に、圧裂強度と比重の関係を同図(b)に、圧縮強度と弾性係数の関係を(c)に示す。なお、図中の線は岩種ごとに(1)式で回帰した結果である。

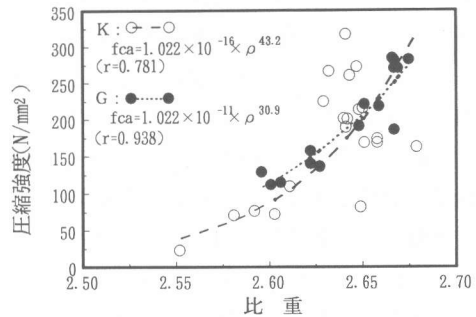
$$\left. \begin{aligned} fc &= a \cdot \rho^b \\ E &= c \cdot fc^d \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここで、fc：圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 ρ：比重  
 E：弾性係数(×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>)  
 a, b, c, d：回帰係数。

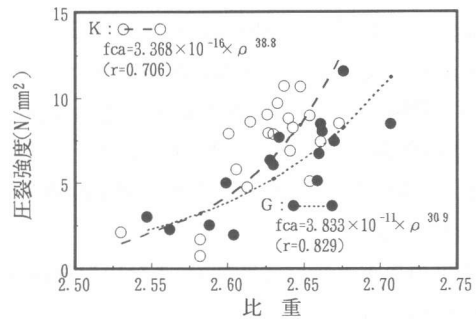
比重と圧縮強度との関係を見ると、岩種ごとに(1)式で回帰した結果は骨材種に関わらずよく適合している。また、2本の回帰線はほぼ一致していることから、比重と圧縮強度は骨材種に関わらず高い相関があり、これらの関係は(1)式で表すことができるといえる。比重と圧裂強度の関係も同様の傾向を示している。圧縮強度と弾性係数の関係は、圧縮強度の増加に伴い弾性係数も増加するが、骨材種に関わらず圧縮強度が200N/mm<sup>2</sup>以上になると弾性係数はほぼ一定となり、その最大値はおよそ8×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>のようである。

##### (2) 骨材自体の強度試験

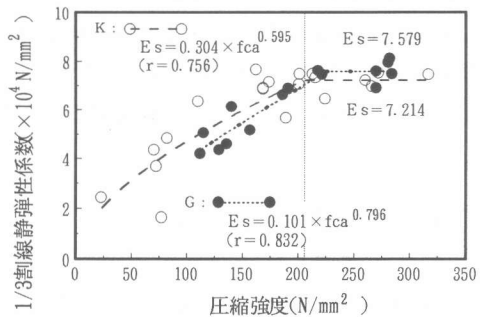
図-2～4に点載荷試験結果を示す。骨材の種類が異なっても、前報[1]でも報告したように載荷点距離が大きくなるほど圧裂強度は小さくなり、骨材強度には寸法効果があり、寸法効



(a) コア比重と圧縮強度



(b) コア比重と圧裂強度



(c) 圧縮強度と弾性係数

図-1 コア供試体の強度試験結果

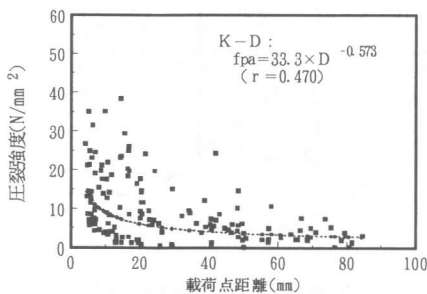


図-2 点載荷距離と圧裂強度

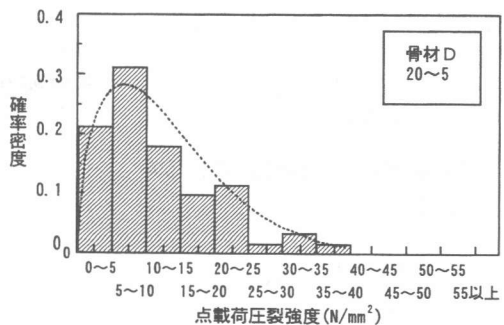
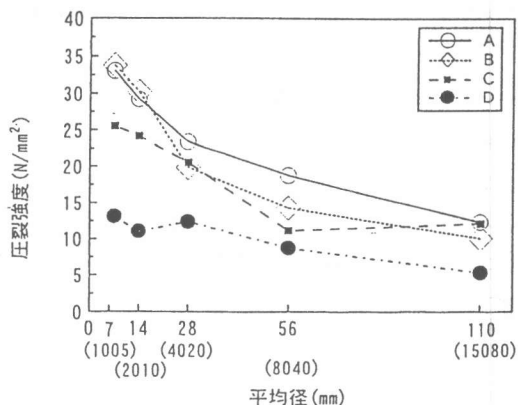


図-3 圧裂強度のヒストグラム

果を含む圧裂強度の分布はワイブル分布が成り立つ。各粒度の平均径とワイブル分布から求めた圧裂強度の平均値の関係をみると、粒径が大きくなるに従い圧裂強度は低下している(図-4)。このため、単純に「骨材の圧裂強度=コアの圧裂強度」は成り立たない。また、骨材の弾性係数も、圧裂強度と同様に確率分布することが考えられる。骨材の弾性係数は使用する骨材全体で評価する必要があり、骨材のコアの試験結果から求めた弾性係数は、骨材全体の弾性係数を示しているとは言えず、骨材全体の評価に用いるのは疑問である。そこで次の方法で各粒度ごとの骨材の平均弾性係数を求めることを提案する。



注) ( ) 内は粒度を表す

図-4 骨材の平均径ごとの圧裂強度

〈骨材の弾性係数の求め方(図-5)〉

①各単粒度ごとの圧裂強度と破壊確率の関係から微少な破壊確率 $\Delta p_i$ ごとの中央値 $p_i$ の圧裂強度 $f_{pai}$ を求める。

②コアの比重と圧縮強度 $f_{ca}$ および圧裂強度 $f_{pa}$ の関係(図-1(a)、(b)中の帰帰式)から(2)式が得られる。

$$f_{ca} = 17.0 f_{pa}^{1.11} \quad (\text{K骨材の場合}) \dots (2)$$

この関係式は骨材の大きさ $d$ =約100mmに相当する。また、今回試験した骨材の圧裂強度の寸法効果は約1/2乗であった(図-2)。骨材の圧縮強度の寸法効果は1/6~1/3で低下するといわれており[2]、1/5乗で低下すると仮定すると、各粒度に相当する平均径の $f_{ca}-f_{pa}$ の関係(3)式が得られる。

$$f_{cdi} = \frac{\sum f_{ci} \cdot p_i}{\sum \Delta p_i} \dots (3)$$

③これに①で得た $f_{pai}$ を代入して、 $f_{cai}$ を求める。 $f_{ca}$ と $E_{ai}$ の関係(1)式および図-1(c)から、 $f_{cai}$ のときの $E_{ai}$ を求め、各粒度ごとの平均弾性係数 $E_{adi}$ を(4)式により求める。

$$E_{adi} = \frac{\sum E_{ai} \cdot p_i}{\sum \Delta p_i} \dots (4)$$

④求めたい粒度の平均弾性係数を(5)式により求める。

$$E_a = \frac{\sum E_{ai} \cdot q_i}{\sum \Delta q_i} \dots (5)$$

ここで、 $q_i$ : 求めたい連続粒度に含まれる各単粒度の比率

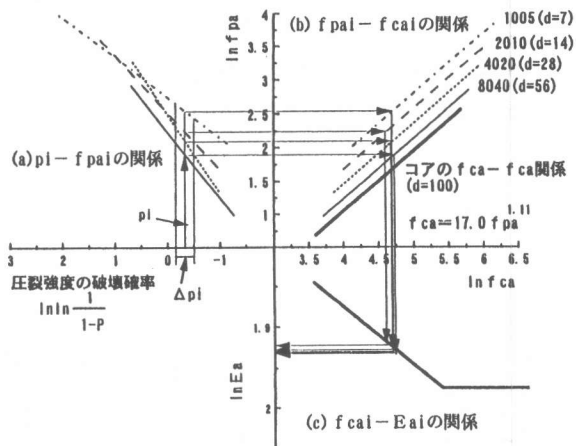


図-5 骨材の弾性係数の求め方

この方法により、確率分布を考慮した骨材全体の弾性係数が求められ、これが硬化コンクリートへの影響の評価指標の一つになると考える。

### (3) 骨材の破砕性

次に骨材の破砕性について述べる。これまでは骨材の破砕性を調べるために、BS812「骨材の破砕試験」による破砕値を用いてきた。しかし、破砕値は、骨材の粒度を合わせる等の一定条件における相対的な骨材強度を示すものであり、一定荷重の場合、粒度が大きくなるほど小さくなることが考えられる。このことを考慮すると骨材の破砕性については新たな評価手法が必要であるが、これについては石井らの研究[3]による修正破砕率による評価が適当と考える。修正破砕率は(5)式のように定義されており、その概念図を図-6に示す。

$$B_M^* = (\sum |\Delta f_i|) / 2 \quad \dots (5)$$

ここで、 $B_M^*$ ：修正破砕率

$\Delta f_i$ ：各ふるい目ごとの破砕前後の骨材の残留率。

この式を用いて、修正破砕率を求めた結果は表-1の通りである。図-7に示すように、粒度の違いでは破砕値はほぼ一定値であるのに対し、修正破砕率は粒度が大きくなるほど小さくなる傾向がある。修正破砕率は破砕前後の粒度変化を示すものであり、骨材の圧裂強度が確率分布をすることを考慮すると、骨材の破砕性を表すには修正破砕率が優れているといえる。

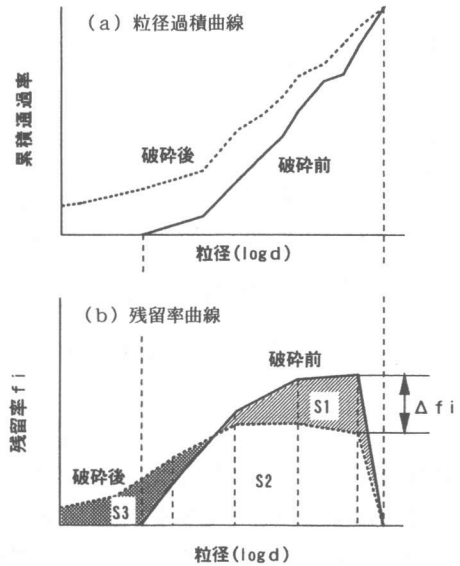


図-6 修正破砕率の概念図

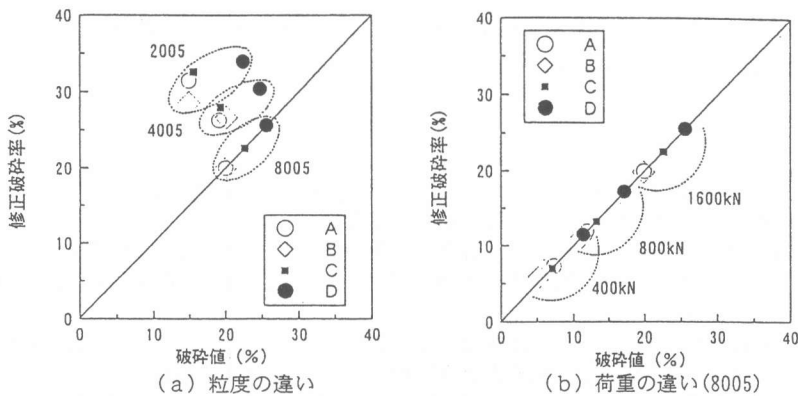


図-7 破砕値と修正破砕率の関係

### 3.2 コンクリートの練混ぜによる粒度変化

前述のように骨材の修正破砕率は、骨材の破砕性を評価する指標として適当なものとする。また、2軸強制練りミキサを用いた時の、コンクリートの練混ぜによる骨材の粒度変化の傾向は

破碎によるそれと類似していることもわかっている[4]。修正破碎率と練混ぜ時の粒度変化に伴う粗骨材減少率の関係を見ると、図-8に示すように修正破碎率はこれらとも良好な関係を示していることがわかる。また、図-9に示すようにスランプと練混ぜによる細骨材率の増加量には明確な関係がある。特に、細骨材率の増分とスランプの関係はGmaxに関わらず1本の直線で表され、これらの関係を用いることでフレッシュ性状に与える影響を求めることができる。なお細骨材率の増分は、粗骨材減少率を換算して求められるものである。

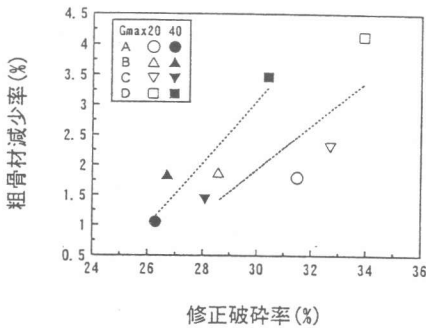


図-8 修正破碎率と粗骨材減少率の関係

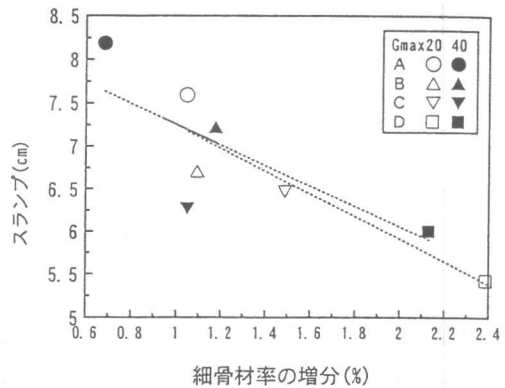


図-9 スランプと細骨材率の増分の関係

#### 4. まとめ

今回提案した骨材の弾性係数の求め方は、骨材強度の確率分布および寸法効果を考慮して骨材全体の弾性係数を求めるものである。これは硬化コンクリートへの影響の評価指標の一つになるものと考えられる[5][6]。また、修正破碎率は骨材強度の確率分布を考慮した骨材の粒度変化の状態を表すもので、練混ぜ時の骨材の破碎性を示す指標として適当であると考えられる。低品質の骨材は破碎性が大きく、コンクリートの練混ぜ時に粒度変化を起こしてコンクリートのフレッシュ性状に影響を与えるが、修正破碎率を適切に用いることでその影響を事前に評価することができ、骨材に応じた配合の選定も可能となる。

#### 参考文献

- [1] 森濱和正, 河野広隆, 加藤俊二: コンクリート用骨材の各種強度試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 417~422、1996. 7
- [2] 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門第2版、東京大学出版会、pp. 113、1976. 10
- [3] 石井武美: 粒子破碎の表示尺度の持つ物理的意義、土質工学会論文報告集、Vol. 29、No. 4、pp. 155~164、1989. 12
- [4] 加藤俊二, 河野広隆, 森濱和正: 骨材強度がコンクリートの施工性に与える影響の評価手法の検討、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集V、pp. 178~179、1996. 9
- [5] 森濱和正, 河野広隆, 加藤俊二, 土屋浩樹: 骨材強度がコンクリートの圧縮および引張強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次講演論文集、Vol. 19、1997. 6
- [6] 土屋浩樹, 河野広隆, 森濱和正, 加藤俊二: 骨材強度がRCD用コンクリートの性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次講演論文集、Vol. 19、1997. 6