

# 論文 粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの 圧縮強度への影響

鶴田浩章<sup>\*1</sup>・松下博通<sup>\*2</sup>・陶 佳宏<sup>\*3</sup>

要旨：将来の性能設計への移行にともない，骨材の品質とコンクリートの要求性能との関係を明確に把握することが非常に重要となってくる。そこで，本研究では粗骨材の品質に着目し，高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材品質の影響を明確にすることを試みた。まず，粗骨材の物性値間の相関関係を明確にし，数種の粗骨材を使用した高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの圧縮強度試験を行うことにより，粗骨材物性値と圧縮強度との関係について調べた。その結果，圧縮強度を評価する指標として BS 812 に規定されている破砕値が非常に有効であることが分かった。

キーワード：粗骨材，骨材の破砕値，圧縮強度，高強度コンクリート，高流動コンクリート

## 1. はじめに

高性能減水剤の開発・改良や省力化施工の必要性から高強度・高流動コンクリートが広く使用されるようになってきた。それにともない，必要とされるコンクリートの性能に影響を及ぼす要因も多様になってきている。また，将来の性能設計を考えると，コンクリートに要求される性能をどのようにして評価するかということ是非常に重要なことであり，そのためには要求される性能と評価指標の関係を明確に把握しておく必要がある。

そこで，著者らは高強度コンクリートの強度を評価する指標について British Standards の BS 812 に規定されている骨材の破砕値に着目し，高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの圧縮強度と粗骨材の破砕値との関係について検討した。

## 2. 粗骨材物性値間の関係

まず，北部九州産の粗骨材および軽量骨材について物性試験を行った。その結果を表-1 に示す。なお，今回使用した軽量骨材は膨張けつ

岩を原料とした非造粒型人工軽量骨材である。

比重，吸水率，すりへり減量および粒形判定実積率はそれぞれ JIS にしたがって測定した。ただし，すりへり減量は軽量骨材に対しては適用されないことになっているが，今回は他の碎石との比較およびすりへり減量が大きい骨材のデータとしての必要性から JIS A 1121 に準じて測定した。破砕値は British Standards の BS 812 Testing aggregates Part 110. Methods for determination of aggregate crushing value (ACV) にしたがって測定した値である。破砕値の測定は粗骨材 (10 ~ 14mm) を一定体積になるように突き棒で突きながら詰め込み，その試料を容器に移しプランジャーをセットして圧縮荷重を載荷して行なった。荷重は 400kN を 10 分 ± 30 秒間で載荷し，除荷後破砕した試料を取り出し 2.36mm ふるいでふるってそれを通過した質量の全質量に対する割合を百分率で表し，2 回の測定結果の平均値を整数で表したものを破砕値とした。

なお，BS 812 では 400kN 破砕値が 30 を越える骨材については 10 % 破砕値を求めることに

\* 1 九州大学大学院助手 工学研究科建設システム工学専攻 工修 (正会員)

\* 2 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 工博 (正会員)

\* 3 松尾建設(株)技術研究所研究員 (正会員)

表-1 使用した粗骨材の物性値

記号	骨材岩種	比重	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	破砕値 (%)	粒形判定実積率 (%)
A	角閃岩 1	2.93	0.99	—	14	58.1
B	緑色片岩	2.94	0.64	—	18	58.9
C	安山岩 1	2.82	0.62	—	9	57.5
D	輝緑角閃岩	3.04	0.40	—	10	57.8
E	硬質砂岩 1	2.89	0.79	—	11	53.8
F	玄武岩	2.80	0.89	—	9	58.5
G	安山岩 2	2.71	0.76	11.8	13	57.8
H	結晶片岩 1	2.80	0.62	17.6	19	55.4
I	閃緑岩	2.73	0.61	12.8	15	57.5
J	ひん岩	2.78	0.46	11.4	12	56.8
K	硬質砂岩 2	2.73	0.46	12.0	14	56.5
L	硬質砂岩 3	2.73	0.56	10.7	17	58.8
M	硬質砂岩 4	2.73	0.36	10.2	13	61.1
N	石英斑岩	2.69	0.87	11.6	14	58.2
O	硬質砂岩 5	2.69	0.78	13.0	17	58.5
P	安山岩 3	2.73	0.72	10.0	9	57.1
Q	結晶片岩 2	2.81	0.52	15.7	13	59.4
R	角閃岩 2	2.73	1.00	21.6	17	59.0
S	軽量骨材	1.46	12.60	36.5	36	55.0

なっており<sup>1)</sup>、軽量骨材はその例に該当することになるが、破砕値が大きい骨材のデータとして他の骨材と比較するために、400kN 破砕値を測定した。

一般的にコンクリートの圧縮強度には骨材の品質が影響すると言われているが、その中でも骨材強度の因子として挙げられるのが、すりへり減量と破砕値である<sup>2)</sup>。そこで、すりへり減

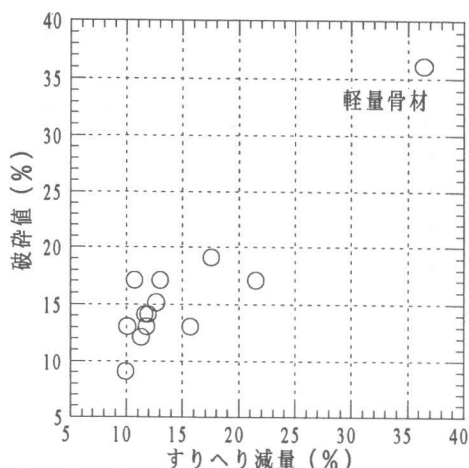


図-1 破砕値とすりへり減量の関係

量と破砕値の関係を示したのが図-1である。このようにすりへり減量と破砕値の間には直線関係が見られ、今回使用した軽量骨材についても砕石の場合のすりへり減量と破砕値の関性に近いことが分かった。

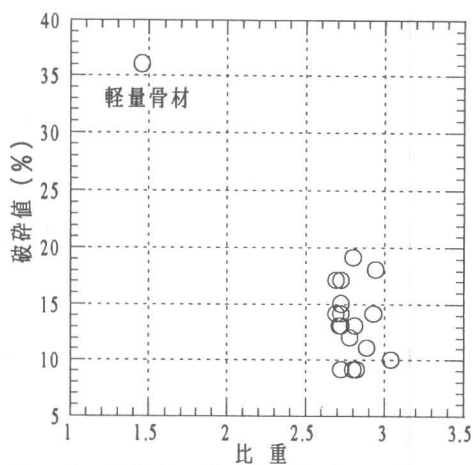


図-2 粗骨材の破砕値と比重の関係

図-2には破砕値と比重の関係を示す。破砕値の変化と比較して比重の変化の範囲が小さいため両者の関係がつかみにくい。この傾向は破

碎値と吸水率についても同じであった。

### 3. コンクリートの圧縮強度への破碎値の影響

#### 3.1 実験概要

##### (1) シリーズ I

まず、セメント水比と圧縮強度の関係を明らかにするために材齢 3, 7, 28 日において  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体で圧縮試験を行った。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は表-1 中の角閃岩 1 (A) ( $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ )、細骨材は海砂 (比重 2.59, 吸水率 1.43%, F.M.2.72) を使用した。配合は単位セメント量を 350, 450, 550  $\text{kg/m}^3$ , 単位水量を 140  $\text{kg/m}^3$  から 5  $\text{kg/m}^3$  ずつ 170  $\text{kg/m}^3$  までそれぞれ変化させ、合計 17 種類とした。細骨材率は各セメント量に対して 44, 39, 33% と一定とし W/C の変化に対しては補正しないものとした。減水剤は高縮合トリアジン系高性能減水剤を 3 //C =100 kg 使用した。コンクリートの練混ぜは可傾式ミキサで行ない、減水剤も他の材料と同時に投入しその後 3 分間練り混ぜた。供試体は打設後すぐに標準養生室内に放置し、キャッピングは超早強セメントを用いて行ない、標準養生を行なった。

##### (2) シリーズ II

シリーズ II では表-1 中の A~F 6 種類の粗骨材 ( $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ ) を使用し、破碎値とコンクリートの圧縮強度の関係を把握することを試みた。粗骨材以外の材料はシリーズ I と同一とし、配合は表-2 の a~c の 3 種で行なった。なお、減水剤使用量、練混ぜ方法、供試体寸法、キャッピング、養生についてもシリーズ I と同様とした。

表-2 配合 (シリーズ II)

	C ( $\text{kg/m}^3$ )	W ( $\text{kg/m}^3$ )	W/C (%)	s/a (%)
a	350	160	45.7	42.0
b	450	150	33.3	39.0
c	550	150	27.3	33.0

### (3) シリーズ III

シリーズ III では、表-1 中の P~S 4 種類の粗骨材 ( $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ ) を使用し、破碎値と高流動コンクリートの圧縮強度の関係を把握することを試みた。使用材料は普通ポルトランドセメント、細骨材 (海砂 : 比重 2.58, F.M. 3.08)、混和材として高炉スラグ微粉末 (比重 2.90, 比表面積  $6000\text{cm}^2/\text{g}$ , セメントに対する置換率 50%) を使用した。配合は単位水量を 170  $\text{kg/m}^3$ , 単位粗骨材容積を 330  $\text{l/m}^3$  一定とし、水結合材比 (W/B) を 23, 28, 33, 40, 50% と変化させた。ただし、角閃岩 2 (R) と軽量骨材 (S) については全ての W/B に対して行なったが、他の骨材については W/B=28% および 50% に対してのみ行なった。混和剤は W/B=23~40% についてはポリカルボン酸系高性能 A E 減水剤を結合材質量の 1%, W/B=50% についてはリグニンスルホン酸系 A E 減水剤を結合材 100kg に対し 250ml の割合で使用した。

練混ぜは二軸強制練りミキサで行ない、骨材、結合材を投入後、水および混和剤を投入し 3 分間練り混ぜた。供試体は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を使用し、標準養生後材齢 7, 28 日で圧縮強度試験を行なった。なお、供試体端面は研磨機を使用して平滑に仕上げた。

#### 3.2 実験結果および考察

##### (1) セメント水比と圧縮強度の関係

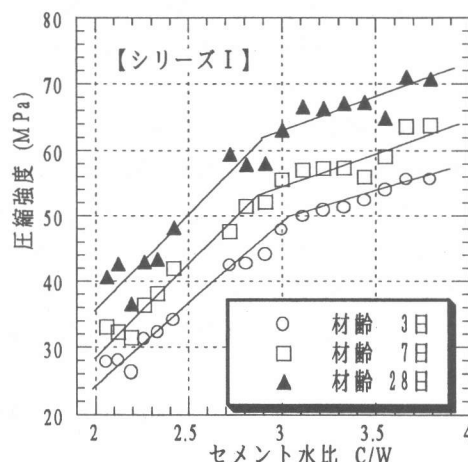


図-3 C/W と圧縮強度の関係

図-3にシリーズIの圧縮強度試験結果とセメント水比との関係を示す。図より高強度になるとセメント水比と圧縮強度は一次的な関係ではなく、 $C/W=3$  辺りで回帰線が屈折し、軽量骨材に見られるような2直線で表される関係<sup>3)</sup>が見られた。これは、骨材自体の強度がコンクリートの強度の伸びに影響したものと考えられる。なお、シリーズIの全ての配合におけるスランプの範囲は2.4~22.6cmであった。

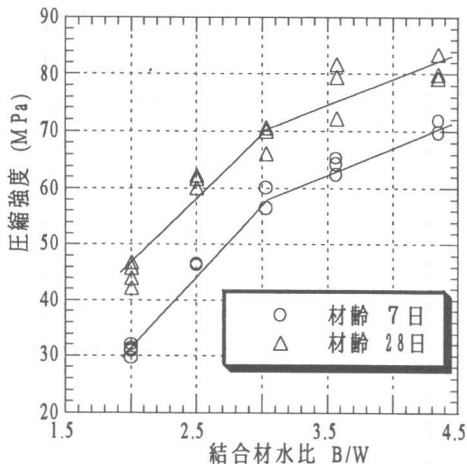


図-4 B/Wと圧縮強度の関係

シリーズIIIにおいて表-1中の角閃岩2(R)を使用した場合の結合材水比と圧縮強度の関係を図-4に示す。各W/Bごとの平均スランプフローはW/B=23%; 46×47cm, 28%; 74×73cm, 33%; 63×65cm, 40%; 41×42cm(スラブ°; 21.4cm), 50%; スラブ° 7.2cmであった。図よりB/W=3で回帰線が屈折しており、シリーズIと非常によく似た傾向を示した。

### (2) 破砕値と圧縮強度の関係

シリーズIIにおける各配合ごとのスランプの範囲は配合a; 4.3~8.0cm, 配合b; 4.8~9.5cm, 配合c; 4.5~7.8cmであった。図-5~7は圧縮強度試験結果を配合ごとに6種類の粗骨材の破砕値と圧縮強度の関係として整理したものである。

図-5~7へと高強度になるにつれて回帰線の傾きが急になっていることが分かる。これはコンクリートが高強度になるにつれて圧縮強度

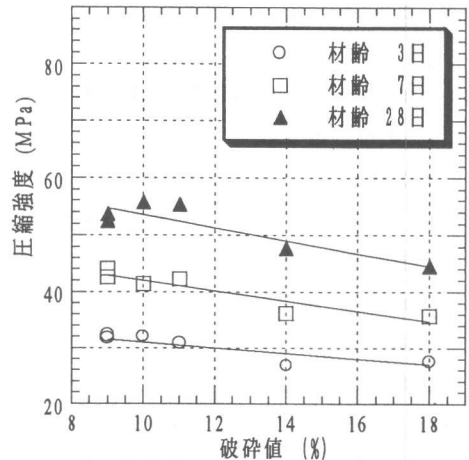


図-5 破砕値と圧縮強度(配合a)

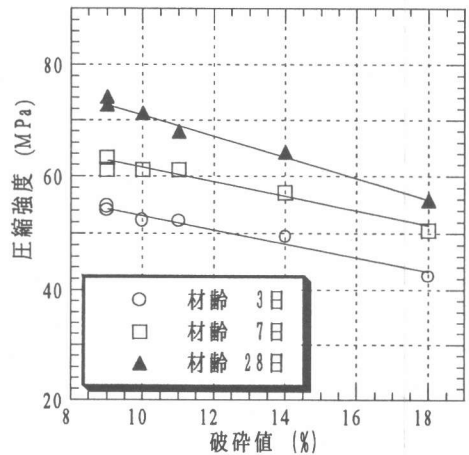


図-6 破砕値と圧縮強度(配合b)

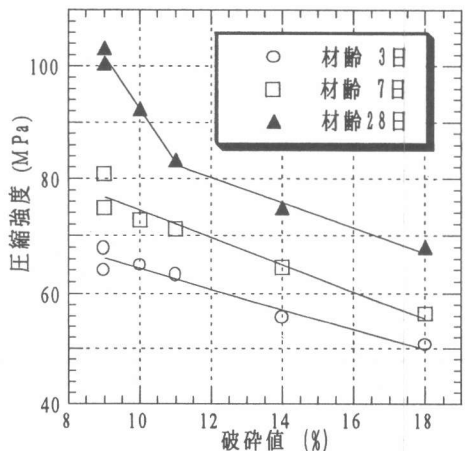


図-7 破砕値と圧縮強度(配合c)

に及ぼす骨材の破碎値の影響が大きくなることを示している。特に、最もセメント量が多い配合cでは破碎値が最小の玄武岩と最大の緑色片岩との間に17~35MPaもの圧縮強度差が生じており、高強度コンクリートにおいては骨材の選定が非常に重要であることが分かる。さらに、この結果よりシリーズIの図-3の骨材自体の強度がコンクリート強度の伸びに影響したという考察も裏付けられることになる。つまり、シリーズIでは破碎値がやや大きい角閃岩を使用しており、高強度領域では破碎値の小さい粗骨材と比較してかなり強度が低くなる傾向にあるからである。もっと、破碎値の小さい粗骨材を使用すれば、セメント水比-圧縮強度の関係も一次的な直線で表されることも考えられるが、それだけ高強度領域では粗骨材の品質の影響が大きいということになる。

また、配合cの材齢28日強度に着目すると回帰線が2直線になる傾向を示していることから、破碎値が10以下の骨材では高強度コンクリートの圧縮強度への影響が著しく大きいということが分かる。

次に、シリーズIIIにおける破碎値とW/B=28%および50%の場合の圧縮強度(材齢7日および28日)の関係について図-8に示す。

シリーズIIIにおける粗骨材種類ごとのスランブフローの変化は、安山岩3(P)の場合;67

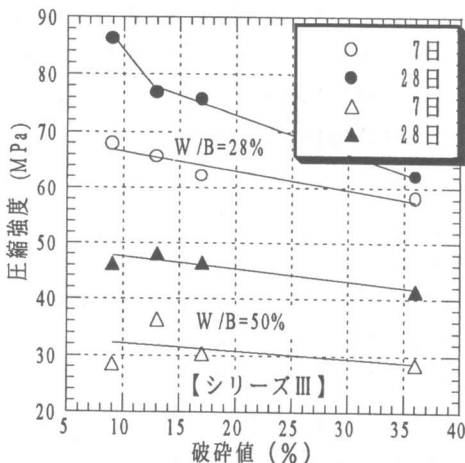


図-8 破碎値と圧縮強度の関係

×66cm, 結晶片岩2(Q)の場合;55×56cm, 角閃岩2(R)の場合;56×57cm, 軽量骨材(S)の場合;83×83cmであった。また、W/B=28%, 50%におけるモルタル強度はW/B=28%;7日79.2MPa, 28日93.8MPa, 50%;7日37.5MPa, 28日54.1MPaであった。

図-8よりシリーズIIIにおいても破碎値と圧縮強度の関係がほぼ直線関係にあることが分かる。また、W/B=28%と50%を比較して、高強度になるほど回帰線の傾きが急になっており、シリーズIIの場合と同様に骨材の強さの影響が顕著に現れている。さらに、破碎値が10近傍より小さくなると、シリーズIIと同様に著しい強度増加を示すことも確認される。先に示したそれぞれのW/Bにおけるモルタル強度から考えてもマトリックスはほぼ同じ強度を持っているので、骨材が混入することにより圧縮強度が低下し、さらにその低下の程度は骨材の破碎値に大きく影響を受け、その影響は高強度になるほど大きいことが分かる。このことからシリーズIと同様に高流動コンクリートの場合においても骨材の選択によっては結合材水比と圧縮強度の関係が一次的な関係を示さない場合が出てくることになる。

以上の破碎値と圧縮強度の検討より、高強度コンクリートおよび高流動コンクリートのどちらにおいても破碎値と圧縮強度がほぼ直線で回帰でき、圧縮強度を評価する指標として有効であると考えられる。そこで、前述のセメント水比と圧縮強度の関係と上記破碎値と圧縮強度の関係から高強度および高流動コンクリートのように空気量が非常に少ない場合においてはセメント水比説をもとに

$$f'c = A + B \cdot \frac{C}{W}$$

の定数A, BをA=f(破碎値), B=g(破碎値)のように破碎値の関数で表すことが可能であると考えられる。なお、その定数の決定については今後データを蓄積して検討する必要がある。

### (3) 骨材の比重と圧縮強度の関係

コンクリートの圧縮強度の評価指標としての破砕値の有効性を他の骨材物性値と比較するために図-9にシリーズIIにおける骨材の比重と圧縮強度の関係を、図-10にシリーズIIIにおける骨材の比重と圧縮強度の関係を示す。

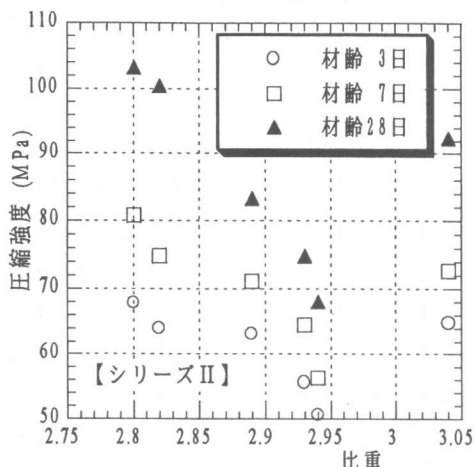


図-9 比重と圧縮強度の関係

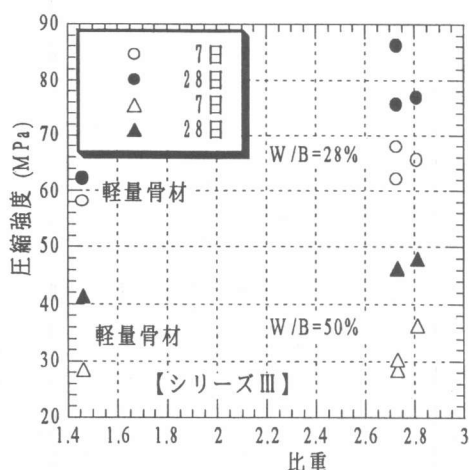


図-10 比重と圧縮強度の関係

図より明らかなように、破砕値と比較して比重はばらつく範囲が狭いために、明確な傾向はつかみにくい。この傾向は吸水率においても同様であり、骨材の強度の因子である破砕値やすりへり減量が圧縮強度を評価する指標として有効であると言える。さらに、このような指標は簡便な試験によって測定できることが不可欠であり、500kN程度載荷可能な耐圧試験機があれば測定できるという点、試験中の骨材の状況が

コンクリート中における圧縮応力下の骨材の状態に近いという点からも破砕値が有効ではないかと考えられる。

### 4. まとめ

- (1) 粗骨材の物性値については、すりへり減量と破砕値の間に直線で回帰できるような関係が見られたが、比重および吸水率については破砕値との明確な相関は見られなかった。
- (2) 高強度および高流動コンクリートのどちらにおいてもセメント水比と圧縮強度の間には2直線で表される関係が見られ、高強度領域においては粗骨材の種類により強度が大きく変化することが分かった。
- (3) 高強度および高流動コンクリートのどちらにおいても粗骨材の破砕値と圧縮強度の間に直線的に表される関係が見られ、特に高強度領域では破砕値の小さい、つまり破砕抵抗性の高い粗骨材が圧縮強度に著しい影響を及ぼすことが分かった。
- (4) 比重および吸水率とコンクリートの圧縮強度の間には明確な相関は見られなかった。
- (5) 以上のことより空気量が非常に少ない高強度および高流動コンクリートにおいては圧縮強度を評価する際にセメント水比説における1次式中の定数A、Bを破砕値の関数として表すことが可能であると考えられる。
- (6) コンクリートの圧縮強度を評価する指標として、すりへり減量と破砕値が非常に有効であると考えられるが、測定のための試験方法および試験中に骨材がおかれる状況を考慮すると破砕値が最も有効であると言える。

### 参考文献

- 1) BS812 Part 110, British Standards Institution, pp.1-8, 1990
- 2) 岡田 清, 六車 照編: コンクリート・ハンドブック, 朝倉書店, pp.335-387, 1981
- 3) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート便覧(第二版), 技報堂出版, p.455-464, 1996