

論文 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

森濱 和正*¹・河野 広隆*²・加藤 俊二*³・土屋 浩樹*⁴

要旨：風化の程度により強度の異なる粗骨材を使用したコンクリートの圧縮および引張強度特性に関する実験を行った。その結果、骨材強度がモルタル強度より大きい場合、圧縮および引張強度に与える影響は小さいものの、弾性係数への影響は大きいこと、引張破壊時には骨材の割裂破壊する確率が大きくなることがわかった。

キーワード：低品質骨材、骨材の圧裂強度、コンクリートの弾性係数、特異点応力

1. まえがき

骨材の低品質化がいわれて久しく、資源の有効利用を考えると低品質の骨材の活用を考えていく必要があり、新たな規準等の検討も行わなければならない。こうした骨材を用いたコンクリートの強度特性に関する研究も数多く行われているが、定性的な特性の把握がほとんどである。筆者らは粗骨材を対象に、骨材強度の確率分布、寸法効果を考慮した強度の把握と、その評価方法などについて研究を行っている[1]。ここでは、確率分布を考慮した骨材強度とコンクリートの強度特性の関係を明らかにすることを目的に、圧縮強度試験から骨材強度と圧縮強度、応力-ひずみ関係、弾性係数、特異点応力について、引張強度試験から骨材強度と引張強度、骨材の破壊確率などについて検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

実験に使用した骨材は、K産地の砂岩骨材であり、風化の程度によりA～Dに分類した。骨材の主な物理試験結果、強度試験結果は表-1のとおりである。破

表-1 骨材の品質

骨材の種類	物理試験		破碎試験		点载荷試験			圧縮強度試験	
	比重	吸水率 %	破碎値 %	修正碎率 %	圧裂強度 N/mm ²	Aに対する比	変動係数 %	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 10 ⁴ N/mm ²
A	2.662	0.39	19.1	26.3	28.2	1.00	52.0	184	6.77
B	2.652	0.48	20.1	26.7	27.4	0.97	46.4	188	6.84
C	2.641	0.87	19.1	28.0	23.2	0.82	42.1	184	6.76
D	2.550	2.89	24.7	30.4	11.8	0.42	81.9	96	4.60
細骨材	2.661	0.79	-	-	-	-	-	-	-

碎試験はBS 812に準じ、点载荷試験は「岩の調査と試験」(土質工学会)に準じた。圧縮強度試験はφ5×10cmのコア供試体5個ずつの試験結果から確率分布を考慮して求めた[1]。骨材強度の特性値は、骨材A～Cはほぼ同じであるが、DはAに比べ約1/2である。圧裂強度の変動係数はいずれも大きく、A～Cは50%程度、Dはそれらの約2倍である。細骨材は骨材Aを破碎

*¹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)
 *²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)
 *³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)
 *⁴(株)アイ・エヌ・エー(正会員)

して製造した。

強度試験したコンクリートの配合条件は、粗骨材最大寸法は40mmで、C/Wを1.5、2.5、3.5の3種類とした。骨材Aを使用したコンクリートのスランプが8cmのときの単位水量、単位粗骨材絶対容積を求め、ほかの骨材使用の時もこ

表-2 コンクリートの配合

最大寸法 Gmax (mm)	セメント 水比 C/W (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位粗骨材絶対容積 ρ/m^3	単位量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G ¹⁾
40	1.5	66.7	42.5	409	167	250	803	1088
	2.5	40.0	38.0	409	165	413	665	1088
	3.5	28.6	32.6	409	165	577	527	1088

1) 骨材Aの場合の単位量

れらを一定とした。空気量も4.5~5.0%になるようにAE剤量を決めた。配合を表-2に示す。

そのほかの使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、混和剤はC/W=1.5、2.5にAE減水剤（主成分：リグニンスルホン酸化物ポリオール複合体）と空気量調整にAE剤（アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤）、C/W=3.5は高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系の複合剤）とAE剤を使用した。

2. 2 試験方法

圧縮および引張強度試験は、材齢7、28および91日で行った。供試体寸法は圧縮はφ12.5×25cm、引張はφ15×20cmである。圧縮試験時には縦および横ひずみを測定した。引張試験後は、割裂面の割れた骨材の面積を求めた。また、粗骨材を除いた配合のモルタルについても同様の強度試験を行った。モルタルの供試体寸法は圧縮および引張ともφ10×20cmである。

3. コンクリートの圧縮強度

3. 1 材齢、C/Wと圧縮強度の関係

図-1にAとD、モルタルの材齢、C/Wと圧縮強度の関係を示す。材齢、C/Wが大きくなるほどAとDの強度差が大きくなっている。しかし、材齢91日、C/W=3.5のときでもAに対するDの強度比は0.86であり、骨材強度の違い（表-1）に比べればわずかである。

3. 2 骨材、モルタル強度とコンクリート強度の関係

骨材とモルタルの圧縮強度比 f_{ca}/f_{cm} とコンクリートとモルタルの圧縮強度比 f_{cc}/f_{cm} の関係は、図-2のとおりである。図中には同じ骨材を用いた貧配合でローラで転圧・締固めを行うダム（RCD工法）用コンクリートの結果 [2] も示しており、それらの関係を両対数で示してある。それぞれの骨材強度は一定なので、モルタル強度が大きくなる f_{ca}/f_{cm} は小さくなる。それに伴い f_{cc}/f_{cm} も小さくなっている。小阪ら [3]

は、図-3のように $f_{ca}/f_{cm} > 1$ は左上がり、 $f_{ca}/f_{cm} = 1$ のときがピークになり、 $f_{ca}/f_{cm} < 1$ は左下がりになると報告している。しかしながら、今回の結果は、左下がりの線が右にずれ、

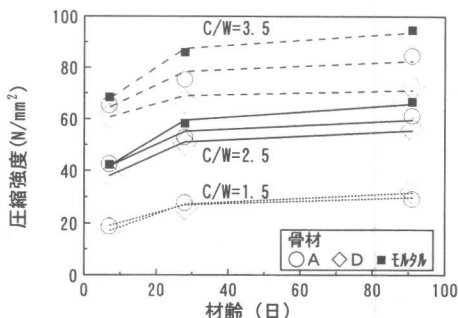


図-1 圧縮強度

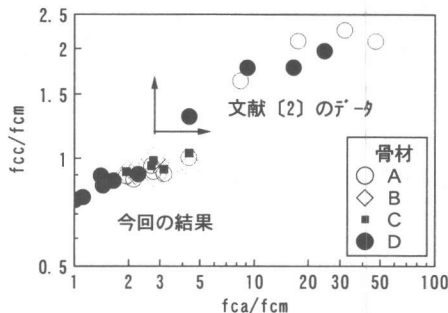


図-2 骨材強度、モルタル強度とコンクリート強度の関係

f_{ca}/f_{cm} の増加に伴い f_{cc}/f_{cm} が1以上でも増加傾向、つまりモルタル強度よりコンクリート強度の方が大きくなった。後者の結果はRCD用コンクリート特有の現象なのか、通常のコンクリートについてもこのようなことがいえるのか今後の検討が必要である。前者については、骨材強度とその変動係数が大きいと、コンクリートの応力の増加に伴い低強度の骨材の破壊が進行していくことにより、図-3の左下降線が右にずれるものと考えられる。

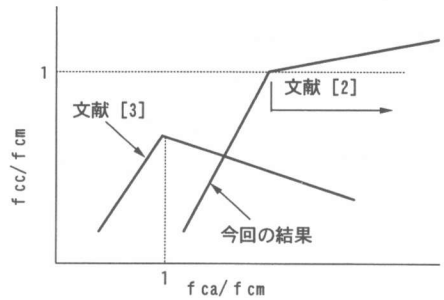


図-3 f_{cc}/f_{cm} と f_{ca}/f_{cm} の関係の模式図

そこで、コンクリートを図-4のようにモデル化し、骨材の破壊する確率をつぎのように計算した。単位体積のコンクリート中に単位量に相当する一辺 d の粗骨材があり、モルタルのみの部分と、モルタルと骨材が重なった部分のひずみが一致するものと仮定したとき、骨材に作用する応力 σ_{ca} は式(1)で求められる。

$$\sigma_{ca} = \frac{f_{cc}/E_c}{\frac{1-d}{E_m} + \frac{d}{E_a}} \quad (1)$$

ここに、 E_c 、 E_m 、 E_a ：コンクリート、モルタル、骨材の弾性係数。

骨材強度はワイブル分布する[1]ことから、 σ_{ca} に相当する確率を骨材の破壊確率とした。

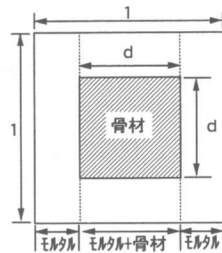


図-4 骨材とモルタルの構成モデル

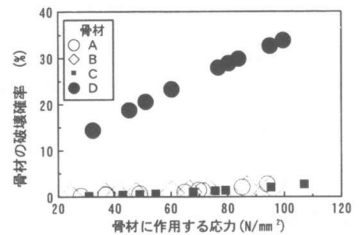


図-5 骨材に作用する応力と骨材の破壊確率

計算結果を図-5に示す。A~Cの破壊確率はわずかであるが、Dは応力の増加とともに破壊確率も大きいことから、骨材の破壊がコンクリート強度に影響を与えているものと考えられる。

3.3 応力-ひずみ関係

応力-ひずみ曲線を式(2)の n 次式[4]で回帰した。

$$1 - \frac{\sigma_c}{f_c} = \left[1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right]^n \quad (2)$$

ここに、 f_c ：圧縮強度、 σ_c 、 ε_c ：圧縮応力とひずみ、 n ：回帰係数、 ε_0 ：圧縮強度時のひずみを表す回帰係数。

式(2)による回帰は非常に適合性がよかった。求めた回帰係数 n 、 ε_0 と圧縮強度の関係を図-6、7に示す。 n は圧縮強度が大きくなるほど小さくなり、1に漸近している。骨材の強度との関係を見るため、式(3)で骨材の種類ごとに n と圧縮強度の関係を回帰した。その結果は表-3①のとおりである。

$$n = \exp(1/a_1 f_c^{b_1}) \quad (3)$$

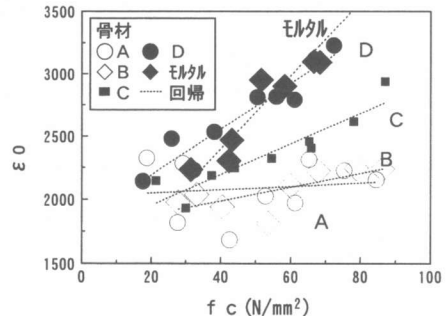


図-6 ε_0 と f_c の関係

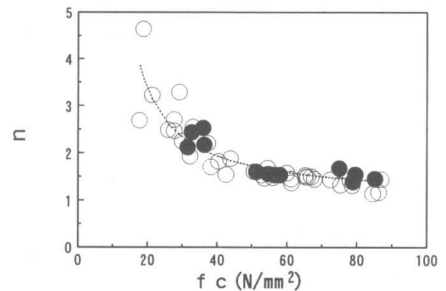


図-7 n と f_c の関係

係数 a_1 は圧裂強度と負の相関、 b_1 は正の相関関係がある。

ε_0 と圧縮強度の関係は、定数型の状態指示変数 [5] を導入して線形回帰した。回帰結果は表-3 ②のように、切片 a_2 は骨材の圧裂強度に関わらずほぼ一定値、傾き b_2 は負の相関があり、骨材強度が小さく、圧縮強度が大きくなるほど ε_0 は大きくなる。この原因として、骨材の強度が大きいと弾性係数も大きいためひずみが抑制されること、一方、骨材強度が小さいと弾性係数が小さいのでひずみが大きくなること、骨材の破壊が進行して変形が大きくなるためと考えられる。

3. 4 弾性係数およびポアソン比

コンクリートの応力-ひずみ関係から圧縮強度の $1/3$ の割線弾性係数、ポアソン比を求めた。弾性係数は図-8 のように骨材の弾性係数と同じように A に対し B はほぼ同じ、C はわずかに小さく、D はかなり小さくなっている。骨材の弾性係数がコンクリートに与える影響は大きい。

コンクリートの弾性係数は複合則が成り立ち、主に骨材とモルタルの弾性係数と体積によって求められるといわれている。これらを考慮した計算式は種々提案されているうち、骨材とモルタルの付着とポアソン比も考慮されている小阪ら [6] の式によって弾性係数を求めた。実測値との関係は図-9 のように全体的には弾性係数が小さいほど実測値と計算値の開きは大きい傾向がある。しかしながら、骨材 A~C は実測値とほぼ一致しているのに対し、D が大きくなっている。

ポアソン比は、骨材の種類による違いはほとんどなく、圧縮強度の増加に伴い 0.17 から 0.23 程度に大きくなる一般的な傾向を示した。

表-3 回帰結果

		A	B	C	D	モルタル
応力ひずみ	①					
	a_1	0.028	0.023	0.052	0.117	0.234
	b_1	1.070	1.129	0.913	0.737	0.587
②	ε_0					
	a_2	2024	1772	1709	1824	1219
	b_2	1.27	5.38	12.17	18.33	29.45
	r	0.839				0.973

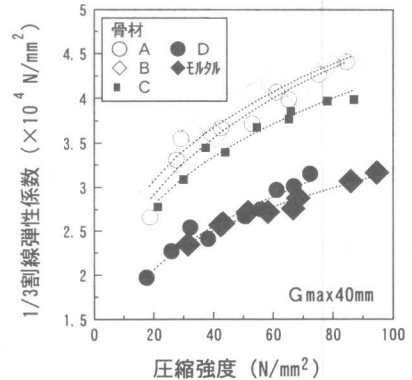


図-8 圧縮強度と割線弾性係数の関係

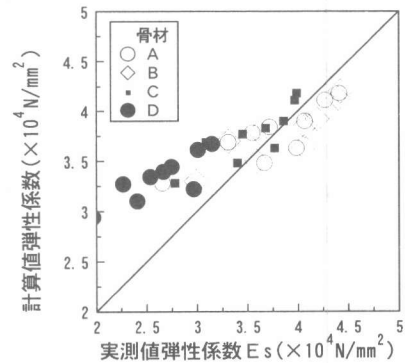


図-9 実測値弾性係数と計算値弾性係数の関係

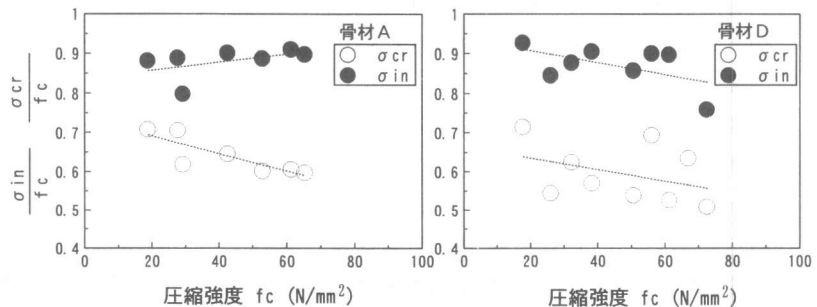


図-10 圧縮強度と特異点応力の関係

3. 5 特異点応力

応力-ひずみ関係から特異点応力を求めた。開始応力 σ_{in} はポアソン比が増加し始めるとき、臨界応力 σ_{cr} は体積ひずみが減少から増加に転じる点として求めた。比例限界応力は、応力-ひずみ曲線の増加し始める点が不明確であったことから求められなかった。圧縮強度に対する特異点応力の比を図-10に示した。モルタルの特異点応力は、圧縮強度によらずほぼ一定であり、 $\sigma_{in}=0.74$ 、 $\sigma_{cr}=0.94$ であった。コンクリートの開始応力比は、いずれの骨材についても0.51~0.75の範囲にあり、圧縮強度の増加に伴い減少傾向にあった。臨界応力比は、A~Cは0.80~0.96の間で増加傾向にあったが、Dは0.76~0.93の間で減少傾向であった。Dは、圧縮強度の増加に伴い骨材の破壊確率が高くなることから(図-5)、骨材の破壊の進行により臨界応力比は減少傾向にあるものと考えられる。

4. コンクリートの引張強度

4. 1 材齢、C/Wと引張強度の関係

図-11にAとD、モルタルの材齢、C/Wと引張強度の関係を示す。材齢、C/Wが大きくなるとそれぞれの強度差が大きくなっている。また、C/W=3.5ではモルタルは材齢により強度は増加しているが、コンクリートは約5 N/mm²一定である。

4. 2 骨材の圧裂強度、モルタルの引張強度とコンクリートの引張強度の関係

骨材の圧裂強度とモルタルの引張強度比 f_{ta}/f_{tm} とコンクリートとモルタルの引張強度比 f_{tc}/f_{tm} の関係は図-12のとおり、A~CとDに分かれており f_{ta}/f_{tm} に明確な違いがある。それにもかかわらず f_{tc}/f_{tm} の範囲は、A~CとDでは大差ないことから、骨材の圧裂強度がモルタル強度の2倍以上あればコンクリートの引張強度に与える影響は小さいものと考えられる。

4. 3 骨材の割裂面積率

引張試験後、割裂面の骨材が割裂破壊している面積を測定し、理論的な骨材断面積の比(ここでは割裂面積率と呼ぶ)を求めた。割裂面積率と引張強度の関係を図-13に示す。ここでもA~CとDは明確に分かれており、DはA~Cと比較して1.5~2倍割裂破壊しやすいことを示している。

引張強度差はわずかであるのに割裂面積率がこのように違う理由として、骨材の割裂破壊する確率に注目し、次のように計算した。骨材の圧裂強度はモルタルの2倍以上あるので、引張最大荷重に達したときモルタルに割裂ひび割れを生じ、そ

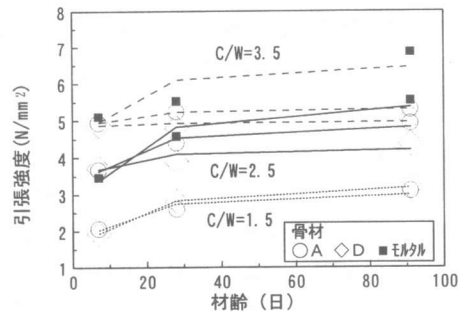


図-11 材齢と強度の関係

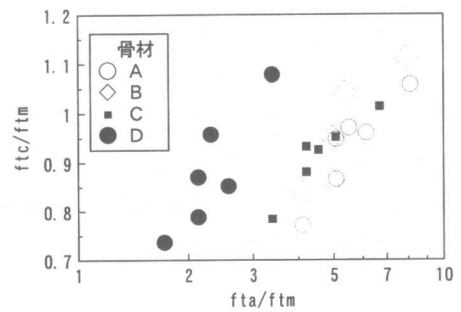


図-12 骨材強度、モルタル強度とコンクリート強度の関係

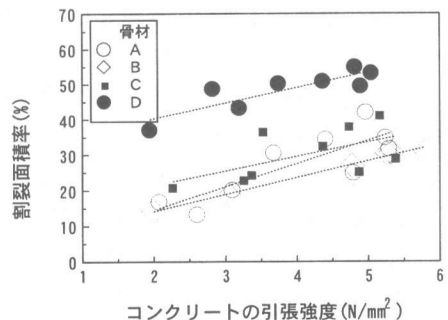


図-13 引張強度と骨材割裂面積率

れ以後引張最大荷重を骨材が負担すると仮定し、式(4)によって骨材に生じる引張応力 σ_{ta} を求めた。

$$\sigma_{ta} = \frac{2P}{\pi d l} \frac{V_a}{V_m + V_a} \quad (4)$$

ここに、P：引張最大荷重、d、l：供試体の直径、長さ、 V_a 、 V_m ：コンクリートの単位体積あたりの骨材体積、モルタル体積。

骨材の圧裂強度の分布から、 σ_{ta} に相当する破壊確率を求め、それを割裂面積率とした。

割裂面積率の計算値と実測値の関係は図-14に示すように、A～Cの計算値が若干小さいだけであり、今回仮定したと同程度の引張応力が骨材に作用したものと考えられる。

5. まとめ

岩種が同じで風化により強度が異なり、強度の変動係数が大きい4種類の骨材を用いたコンクリートの強度特性試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 骨材強度がモルタル強度より大きい場合、コンクリートの圧縮強度への影響は小さい。
- ② 応力-ひずみ曲線は、式(2)のn次式による回帰の適合性がよく、回帰係数nと ε_0 は骨材強度とよい相関関係がある。
- ③ 弾性係数は、従来からいわれているように骨材とモルタルの弾性係数と体積の影響が大きい。ポアソン比には骨材強度の影響はないようである。
- ④ 特異点応力は、開始応力には骨材強度の影響はほとんどないようであるが、臨界応力は骨材強度が小さくなると低下し、コンクリート強度が大きくなるほどその影響は大きい。
- ⑤ コンクリートの引張強度に対しても骨材の圧裂強度がモルタルの引張強度より大きい場合には、骨材強度の影響は小さい。

【参考文献】

- [1] 加藤俊二ほか：骨材強度と練混ぜ時の骨材の破碎性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、1997. 6
- [2] 土屋浩樹ほか：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論文報告集、Vol. 19、1997. 6
- [3] 小阪義夫ほか：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響、日本建築学会論文報告集、第228号、pp. 9-10、1975. 2
- [4] 濱田稔：鋼コンクリート応圧材に関する研究、建築雑誌、第43号、pp. 13-15、1929. 5
- [5] 早川毅：回帰分析の基礎、朝倉書店、pp. 138-150、1986. 10
- [6] 小阪義夫ほか：コンクリートのヤング係数におよぼす骨材の影響について、セメント技術年報、第22巻、pp. 260-261、1968

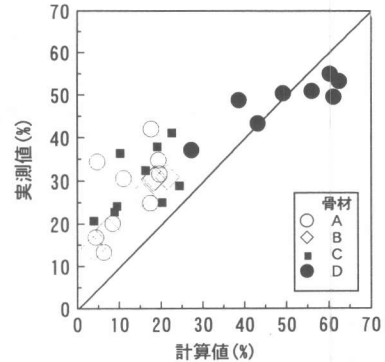


図-14 骨材割裂面積率の実測値と計算値の比較