

論文 コンクリート用骨材の各種強度試験

森濱 和正^{*1}・河野 広隆^{*2}・加藤 俊二^{*3}

要旨：ダム内部コンクリート用骨材に要求される特性の評価方法の確立をめざし、コンクリートの施工性から求められる特性を検討するため、各種強度試験を行った。骨材の強度に与える要因として比重および骨材の大きさがあり、点載荷試験による圧裂強度はワイブル分布にしたがうことがわかった。このように確率分布する骨材の評価方法として、割れやすさについては破砕試験を行い、沈下量と粒度分布を測定すること、かけやすさについてはすりへり試験を行い、粒度分布を測定することによって評価できる可能性があることを示した。

キーワード：骨材強度、破砕性、かけやすさ、比重、寸法効果、ワイブル分布

1. まえがき

ダムコンクリート用骨材の採取にあたり、環境保全、省資源・省エネルギーの観点から、これまで廃棄されていた岩石を内部コンクリート用骨材に利用することが検討されている。現在は内部用骨材も外部用と同じ基準が適用されているから、内部コンクリートは直接外部の影響を受けることはなく外部用骨材とは異なった品質が要求される。一方、ダムは非常にマッシブな構造物であり、水密性を要求される構造物であることから、セメントの水和熱による温度ひび割れ抑制対策が重要になる。そのため、ここでは、現在合理化施工として普及しているRCD用コンクリートに使用する骨材に要求される特性の評価のため、各種品質のうち骨材強度について検討した。骨材強度は、コンクリート練混ぜ時にはかけによる粒度変化、それに伴う施工性の低下、ローラ転圧による骨材の割れ、硬化後のコンクリートの強度、耐久性など広範囲に影響を与える基本的な特性であるからである。骨材強度に与える影響要因、骨材の割れやすさ（破砕性）などについて検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用骨材

強度試験に用いた骨材は、Gダムから採取した花崗閃緑岩の碎石であり、熱変性による変質の程度に応じⅠ～Ⅲに分類した。骨材の物理試験結果を表-1に示す。粒度は、例えば40mmから5mmの範囲は4005で示した。

2.2 コア供試体の強度試験

骨材の基本的な強度特性を把握するため、15080骨材からφ50×100mmおよびφ50×50mmコアを採取し、圧縮強度および点載荷試験を行った。

表-1 骨材の物理試験結果

試料	粒度範囲	比重	吸水率 %	安定性 %	単位体積質量 kg/l	実積率 %	F _M
Ⅰ	15005	2.67	0.45		1.79	67.3	8.38
	4005	2.66	0.61	0.08	1.58	59.3	7.30
Ⅱ	15005	2.66	0.72		1.78	67.4	8.38
	4005	2.66	0.83	3.8	1.58	59.9	7.31
Ⅲ	15005	2.64	1.24		1.76	67.5	8.34
	4005	2.63	1.52	8.6	1.55	59.7	7.23

*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 （正会員）

試験前には比重、動弾性係数、超音波伝播速度を測定した。圧縮強度試験時には縦および横ひずみを測定し、コンクリートの場合と同様に静弾性係数、ポアソン比を求めた。点载荷試験は「岩の調査と試験」（土質工学会、現地盤工学会）に準じて行い、(1)式により圧裂強度を求めた。

$$f_{pt}=0.9 P/D^2 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 f_{pt} : 圧裂強度 (N/mm^2)、 P : 破壊荷重 (N)、 D : 载荷点距離 (mm)

2.3 骨材自体の強度試験

- (1) 点 載 荷 試 験: 個々の骨材の強度を得るため、粒度15080、8040、4020ごとに30個ずつ試験し圧裂強度を求めた。試験方法はコアの場合と同様である。
- (2) 破 砕 試 験: 骨材の割れやすさをみるため、BS 812に準じた単粒度(4025~1005)と、連続粒度(8005、4005、2005)の破碎試験を実施した。20mm以下の試料については直径152mmの試験容器(小)を使用し、392kN(40t)まで载荷した。20mmを超えるものについては直径305mmの試験容器(大)で1569kN(160t)まで载荷した。ただし、4025については両容器を用いた試験を行った。载荷中は圧盤間の変位(沈下量)を4点測定した。载荷終了後は粒度分布と破碎値を測定した。
- (3) 衝 撃 試 験: ローラ転圧時に振動がかかることから、BS 812に準じて3020~1005の4種類の粒度の衝撃試験を行い、粒度分布と衝撃値を測定した。
- (4) すりへり試験: 骨材のかけを検討するため、JIS A 1121に準じて、A、B、C、E、Fの5種類の粒度区分の試験を行い、粒度分布とすりへり減量を測定した。

3. コア供試体の強度試験結果

3.1 コア供試体の比重分布

コアの比重の平均値と標準偏差は、Iでそれぞれ2.67, 0.017、IIで2.64, 0.027、IIIで2.62, 0.024であり、変質度Ⅲの骨材でも比較的良質であった。

3.2 圧縮強度

圧縮強度と比重の関係は、図-1のとおりである。比重2.60~2.68の間で圧縮強度はほぼ100~300 N/mm^2 に分布しており、比重の増加に伴い強度は急激に増加している。比重には上限があることを考慮し、(2)式により回帰することを試みた。

$$f_c = a \frac{\rho}{1 - \rho / \rho_{\max}} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 f_c : 圧縮強度 (N/mm^2)、 a : 比重0のときの傾きを示す回帰係数、 ρ_{\max} : 最大比重を示す回帰係数、 ρ : 比重である。

(2)式は図-1のようによく適合しており、比重と圧縮強度は非常に相関関係が高いことを示している。また、 $\rho_{\max}=2.729$ であり、この値は比重分布の標準偏差の約3倍に相当することから、ほぼ妥当な値である。比重の平均、平均±標準偏差に相当する圧縮強度は(2)式より、骨材Iで267、377、206 N/mm^2 、骨材IIで175、254、133 N/mm^2 、

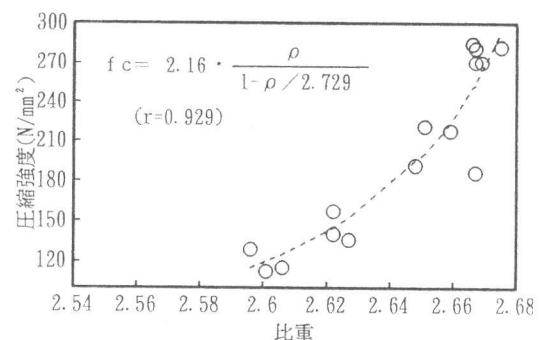


図-1 圧縮強度と比重の関係

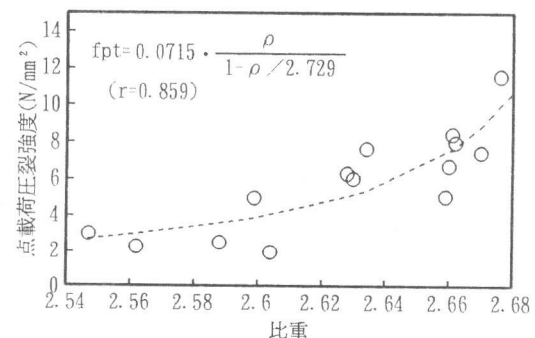


図-2 点载荷圧裂強度と比重の関係

骨材Ⅲで142、183、115N/mm²と広く分布している。

3.3 圧裂強度

点載荷試験による圧裂強度と比重の関係は図-2のとおりであった。図中には(2)式で回帰した結果も示した。ただし ρ_{\max} は圧縮強度で求めた値とした。圧縮強度と同様に比重の増加にともない急激に増加していることがわかる。圧裂強度と圧縮強度の関係は、係数aの比となることから、圧裂強度は圧縮強度の約1/30となる。

4. 骨材自体の強度試験結果

4.1 点載荷試験

骨材の変質度ごとの点載荷による破壊荷重と載荷点距離の関係を図-3に示す。載荷点距離が大きくなるにしたがい破壊荷重の増加は小さくなる傾向にある。破壊荷重は、理論的には載荷点距離の2乗に比例するはずであるが、結果は図-3のとおりであり、(3)式のように載荷点距離Dの指数をDの関数(2-b₁・D)として回帰し、図中にその回帰曲線と±1σ(σ:標準偏差)の曲線も示した。

$$P = a_1 D^{2-b_1 \cdot D} \quad (3)$$

ここに、P:破壊荷重(N)、D:載荷点距離(mm)、a₁, b₁:回帰係数である。

次に、圧裂強度と載荷点距離の関係を図-4に示す。図中には指数回帰曲線および±1σの曲

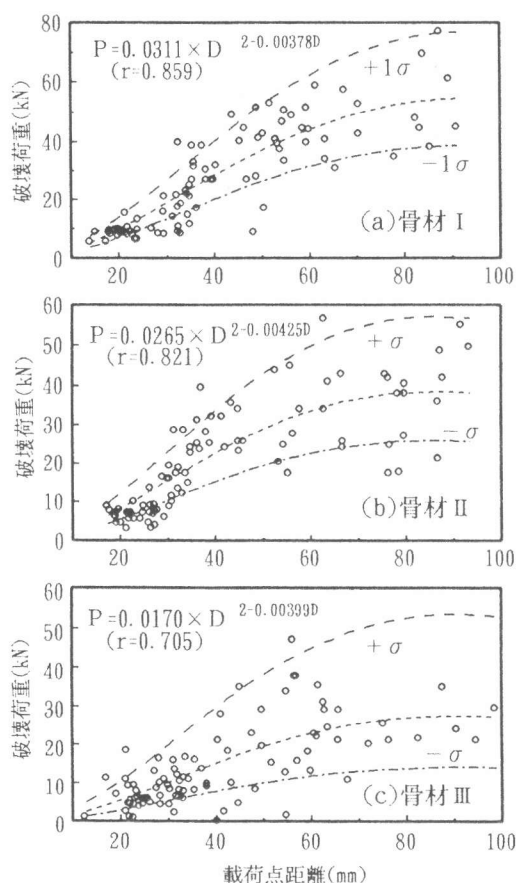


図-3 載荷点距離と破壊荷重の関係

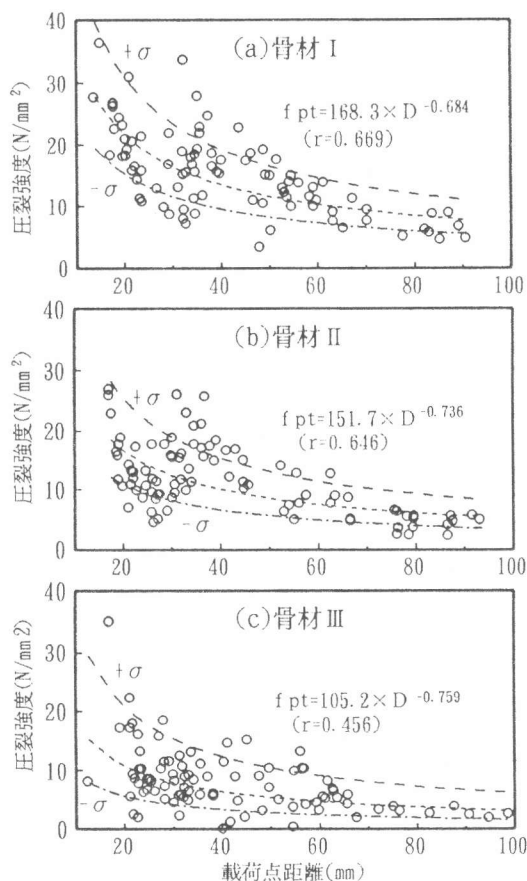


図-4 載荷点距離と点載荷圧裂強度

線も示した。図-4のように、載荷点距離が大きくなるほど圧裂強度は小さくなっており、骨材の強度には寸法効果のあることがわかる。

また、載荷点距離が大きいほど破壊荷重の増加が小さく(図-3)、載荷点距離が小さいほど圧裂強度が大きい(図-4)のは、骨材は一般に微小なクラックなどのある弱い部分から割れていくといわれており、骨材が小さいほど脆弱部が少なくなるためと考えられる。

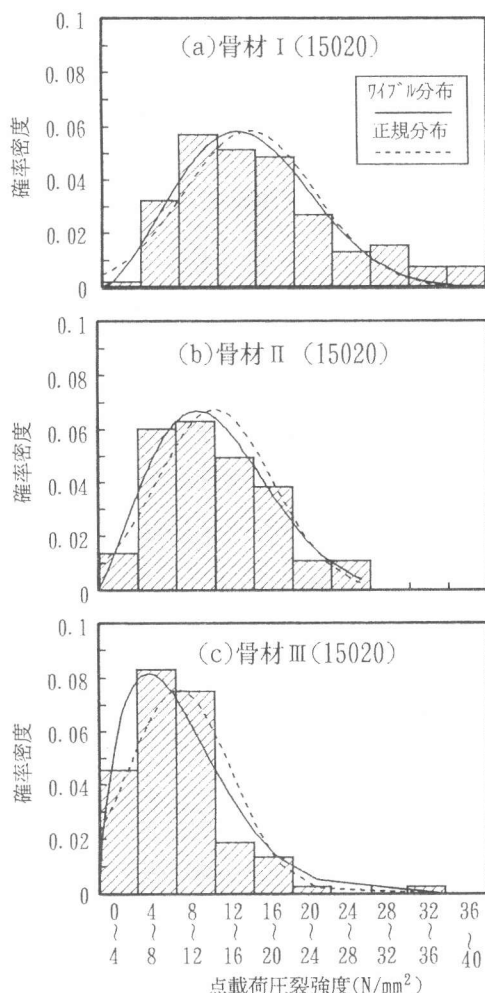


図-5 圧裂強度のヒストグラム

このように寸法効果を含む圧裂強度のヒストグラムは図-5のようであった。図中の点線は正規分布、実線はワイブル分布を示している。

ワイブル分布は、破壊確率を p としたとき、縦軸に $\ln \ln \{1/(1-p)\}$ を、横軸に $\ln \alpha$ をとった際、両者が直線になればワイブル分布にしたがい、この直線の傾きが m 、切片が α となる。図-6に圧裂強度の確率分布を示すように、ワイブル分布が成り立っていることがわかる。図-5より、変質度が大きいほど分布は左側に片寄り、強度が低下していることを示している。

4.2 破碎試験

破碎試験による破碎値と、粒度分布から求めた粗粒率の結果を図-7および8に示す。変質度が大きくなるにしたがい、破碎値は大きくなり、粗粒率は小さくなる傾向にある。荷重と沈下量測定結果から、(3)式によりみかけ応力 σ 、みかけひずみ ε を求め、図示した

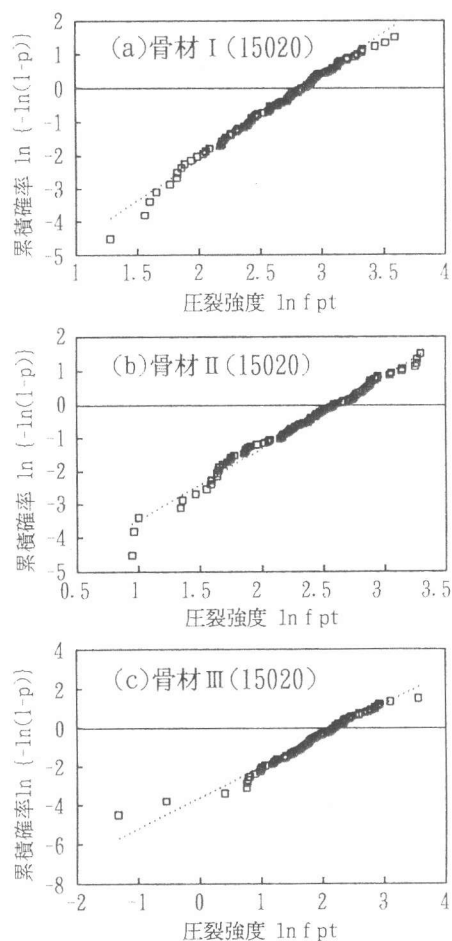


図-6 圧裂強度の確率分布

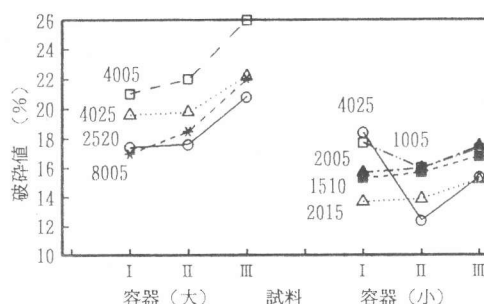


図-7 骨材の種類と破碎値の関係

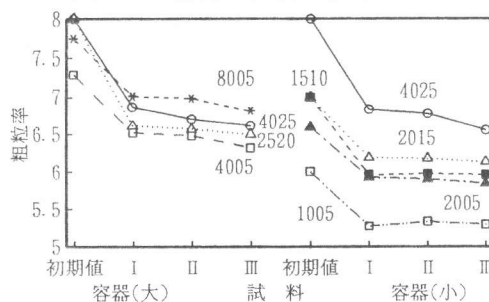


図-8 骨材の種類と粗粒率の関係

一例が図-9である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \text{荷重} / (\text{容器の断面積} \times \text{粗骨材の実積率}) \\ \varepsilon &= \text{沈下量} / \text{試料の高さ} \end{aligned} \right\} (3)$$

みかけひずみの増加によりみかけ応力は急激に増加しており、(4)式により回帰した。

$$\sigma = E_0 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon / \varepsilon_{\max}} \quad \text{-----} (4)$$

ここに、 E_0 ：初期($\varepsilon=0$)接線弾性係数(N/mm^2)を表す回帰係数、 ε_{\max} ：最終ひずみを表す回帰係数。

図-10に破砕値、回帰係数 E_0 と圧裂強度のピーク値(ワイブル分布で頻度が最も高いときの強度)の関係を示すように、ピーク値の増加により破砕値は低下しており、 E_0 は増加している。骨材の比重の変動、大きさにより骨材強度は広く分布するが、その平均的な強度、変形性を破砕試験によって表せる可能性を示している。

また、破砕試験前後の粒度分布を比較した一例が図-11である。図は各粒度の骨材量を面積で表したものであり、縦軸はふるいの呼び寸法 d_a から d_b の骨材量 $As(\%)$ をふるいの目の差($d_a - d_b$)で割った値である。(a)図は連続粒度の場合であり、白い部分(割れて損失した粒度)と網かけの部分(増えた粒度)があり、粒度によって割れやすい粒度と、割れにくい粒度のあることがわかる。(b)図は単粒度の場合であり、割れて小さくなっていくことがわかる。連続粒度の関係を変質度で比較したのが図-12である。図は山の部分(増えた粒径)と谷の部分(減った粒径)と同じ傾向がある。粒径ごとに詳細にみると、60~80では $I < II < III$ の順に損失が大きくなっており、30~40では逆の傾向になっていることなどがわかる。点载荷試験の破壊荷重(図-3)の結果から、粒径が大きくなれば破壊荷重は大きくなるが、変質度が大きいとばらつきも大きくなり、割れやすくなることが予想される。逆に、良質な場合は大きな粒径は割れにくく、大きい粒径の骨材

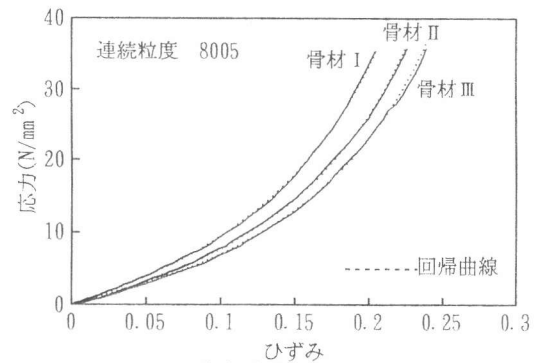


図-9 破砕試験の応力-ひずみ関係

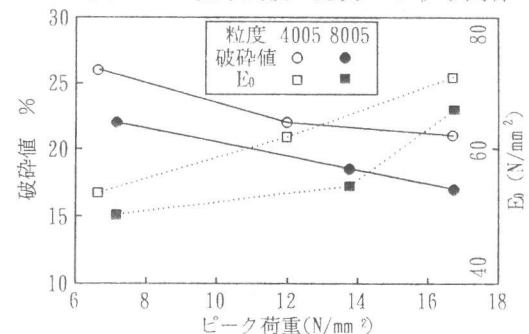


図-10 ピーク強度と初期接線弾性係数

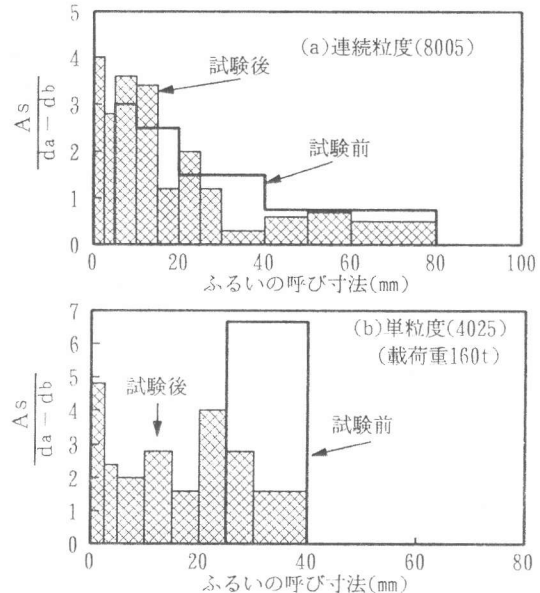


図-11 試験前後の粒度分布の比較

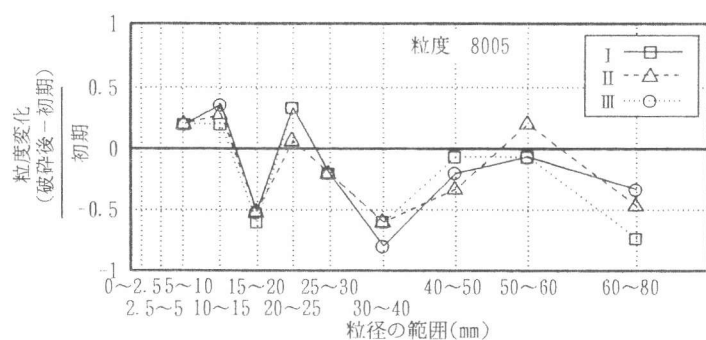


図-12 骨材の変質度ごとの粒度分布の比較

間にある中程度の骨材が割れやすくなることが考えられる。

このように、破碎試験を連続した粒度で行い、沈下量を測定し、破碎試験後粒度分布を測定することにより、骨材の強度、変形性、割れやすさ（破碎性）などがわかる。

4.3 衝撃試験

衝撃試験の結果を図-13および14に示すように、変質度に応じて衝撃値は大きく、粗粒率は小さくなっており、骨材の相対的強度を表しているものと考えられる。

4.4 すりへり試験

試験結果を図-15および16に示す。また試験前後の粒度の変化を図-17に示す。破碎試験の場合とは異なり、全粒度ともほぼ均等に減っており、4030粒度と微小な粒度（2.5mm以下）が増えている。これは碎石の角張った部分などがかけて、わずかに粒度が小さくなった部分と、微小な部分に分離したものと考えられ、練混ぜなどによる粒度変化の指標にできる可能性を示している。

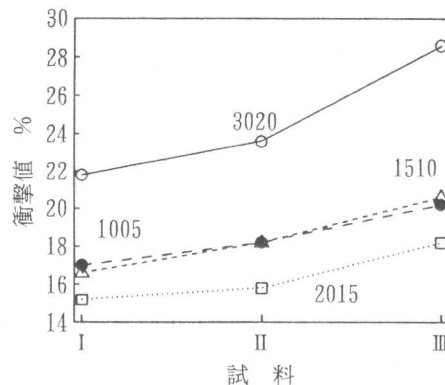


図-13 骨材の種類と衝撃値の関係

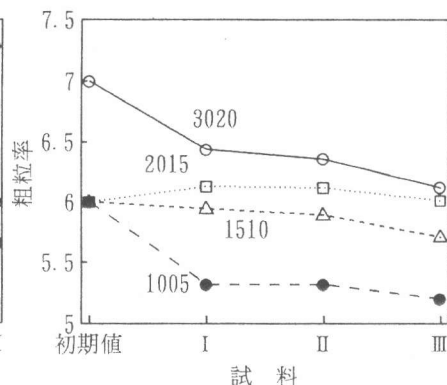


図-14 骨材の種類と粗粒率の関係

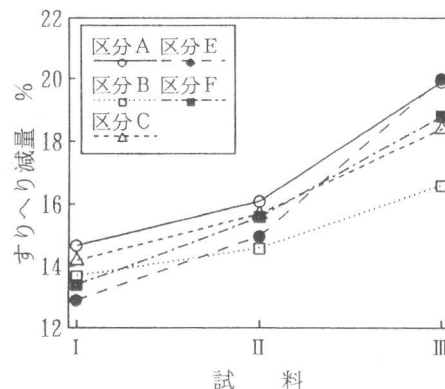


図-15 骨材の種類とすりへり減量

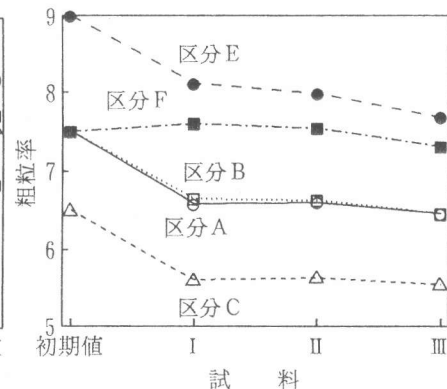


図-16 骨材の種類と粗粒率の関係

5. まとめ

骨材の強度試験より、以下のことが明らかになった。

- ① コア試験強度は比重との相関が非常に高い。
- ② 点载荷試験骨材強度には寸法効果がある。比重の影響と寸法効果により強度分布は大きく、その分布はワイブル分布にしたがう。
- ③ 破碎試験時の沈下量、粒度分布測定により、骨材強度、変形性、割れやすさ（破碎性）などを表せる。
- ④ すりへり試験時の粒度分布測定により、練混ぜによる粒度変化を表せる可能性がある。

今後、以上の試験結果と、コンクリートとしての施工性や強度性状の関係を調べる必要がある。

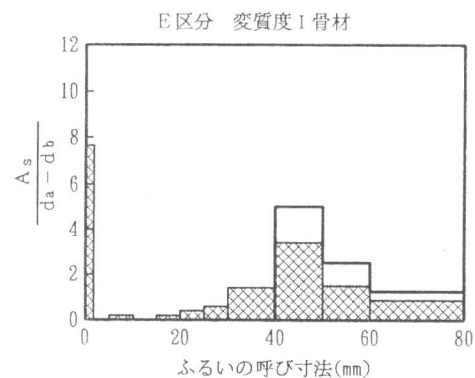


図-17 試験前後の粒度分布の比較