

低品質骨材の有効利用に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON ADEQUATE METHODS OF USING LOW QUALITY AGGREGATE

藤原忠司*

By Tadashi FUJIWARA

It is very important for the concrete industry to find adequate methods of using low quality aggregate, because the quality of aggregate has become lower and recently it is not easy to obtain proper aggregate for concrete. In this experiment, it is examined whether low quality aggregate can be effectively used by the following two methods. One method is to adjust mix proportion of concrete in order to cover the defect of using low quality aggregate. In another method, good quality aggregate is mixed with low quality aggregate in order to improve the average characteristics of aggregate. Although the problem is not solved completely by these methods, there seems to be the possibility of using the low quality aggregate by properly adapting these methods according to the required properties of concrete.

Keywords : low quality aggregate, mix proportion, mixed aggregate

1. ま え が き

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張や塩分を含む海砂による鉄筋腐食に代表されるように、本来コンクリートの骨格材料であるべき骨材の資質がいま厳しく問われ、骨材を厳選して使用する姿勢が望まれている。他方、比重や吸水率等の物理的品質に優れた骨材がしだいに枯渇し、低品質化の傾向が強まっている現実もあり、骨材を厳選する方向とは逆に、低品質骨材を有効利用する方法の確立も重要な研究課題となりつつある^{1)~4)}。

たとえば、骨材に樹脂を含浸して物理的性質を改良するのも、低品質骨材有効利用の1つの方法ではあり得ようが、現段階では必ずしも現実的でない。骨材自体の性質を高めるのが難しい以上、可能かつ容易な対応としては、低品質骨材使用の弱点を他の材料で補うことが考えられる。その具体的方法は種々考えられるが、本研究では、配合の適切な選定による母材の強化および良質骨材との混合による骨材の平均的性質の向上を取り上げ、これらの方法の有用性を検討した。

なお、骨材が低品質であることの悪影響は、細骨材よりも粗骨材で顕著であるといわれており⁵⁾、本実験でも、

粗骨材のみを対象としている。また、粗骨材として砂利も取り上げるべきであるが、種々の石質が入り交じった集合体であることによる粒子レベルのばらつきが、コンクリートの性質に大きな影響を及ぼすとの実験結果をすでに得ており⁶⁾、骨材の物性とコンクリートの性質との関連を即断できない面があるため、碎石のみに着目することとした。

2. 実験概要

実験に用いた碎石は、岩手県および青森県産の計15種類であり、その物理的ならびに力学的諸性質を表-1に示す。なお、圧縮強度および静弾性係数は、母岩より採集した $\phi 30 \times 60$ mmの円柱供試体を用いて求めた。一部については、コア試料により、碎石自体の乾燥収縮も測定している。

比重が2.50以上、吸水率が3.0%以下の規格に満たない骨材を低品質であると考えれば、使用碎石のうち、6種類がこれに該当し、さらに4種類は吸水率の規格に外れるから、品質に問題を有することになる。なお、実積率から明らかのように、各碎石の粒形は異なっており、コンクリートの諸性質には、この影響が含まれることになるが、本文ではこれを検討していない。

これらの碎石をすべて同一粒度になるように調整し、

* 正会員 工博 岩手大学助教授 工学部土木工学科
(〒020 盛岡市上田4-3-5)

表一 使用碎石

No	比重	吸水率 %	すり減り減量 %	安定性損失 %	実績率 %	圧縮強度 kgf/cm ²	弾性係数 $\times 10^5$ kgf/cm ²
1	2.28	10.97	34.25	33.09	60.8	676	0.96
2	2.34	11.35	35.30	61.10	58.3	253	0.92
3	2.39	5.31	18.08	11.15	58.5	1,120	3.54
4	2.42	7.87	33.41	57.12	60.2	317	1.37
5	2.48	6.02	13.21	5.78	59.0	1,094	3.99
6	2.48	5.26	14.58	14.17	56.7	922	3.01
7	2.50	4.53	24.08	18.75	58.4	1,061	3.25
8	2.54	4.61	26.27	6.88	59.8	962	3.66
9	2.57	3.31	14.90	2.20	58.0	1,613	4.67
10	2.62	4.58	26.48	12.10	58.3	990	3.01
11	2.65	2.45	16.98	9.27	54.4	1,330	5.48
12	2.71	0.78	10.88	6.22	57.4	1,404	7.99
13	2.73	1.41	14.50	3.60	57.2	2,341	7.78
14	2.91	0.58	5.70	2.30	58.6	3,105	9.94
15	2.95	0.76	8.30	7.72	56.7	2,206	9.93

表二 コンクリートの配合

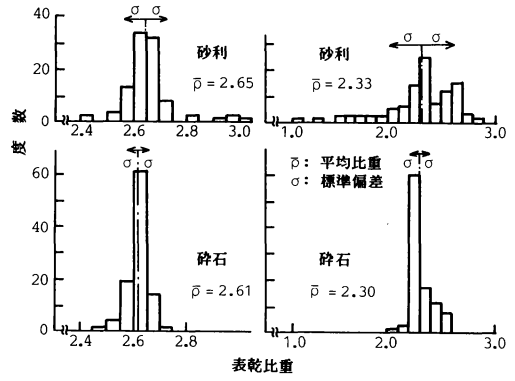
水セメント比 W/C (%)	単位量				混和剤
	水 W(kg/m ³)	セメント C(kg/m ³)	細骨材 S(kg/m ³)	粗骨材 G(l/m ³)	
30	194	647	553	386	減水剤
40		488	684		
50		388	762		
60		323	814		
70		297	851		
100		194	918		無

最大寸法を 25 mm とした。細骨材には、岩手県雫石川産の砂（比重 2.54，吸水率 3.3 %）を，セメントには，普通ポルトランドセメントを使用している。

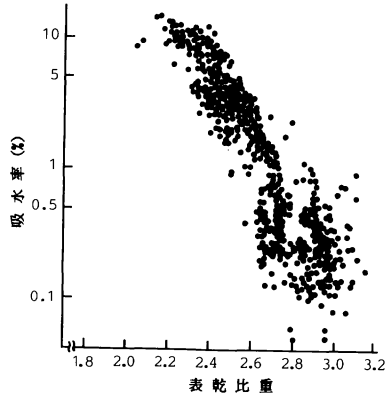
配合は，表二に示すとおり，粗骨材の果たす役割を明確にするため，単位水量および単位粗骨材容積を一定にした 6 種類であり，水セメント比の範囲を広く設定してある。また，同表の配合から，粗骨材を除いたモルタル供試体も作製している。

なお，以上の碎石および配合の種類は，コンクリートの力学的な特性と配合との関連を調べる実験において用いたものであり，他の実験項目の場合は，これらの中から適宜選択して使用した。

コンクリートの力学的試験（圧縮強度，割裂引張強度，弾性係数等）には， $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を，乾燥収縮および凍結融解試験には， $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体を用いた。水中養生期間は 28 日であり，温度 20°C，相対湿度 60 % の条件下で乾燥収縮を，温度 -10 ~ +20°C の気中凍結・気中融解によって耐凍害性を求めた。



図一 表乾比重の分布



図二 比重と吸水率の関係

3. 配合の調節による低品質骨材有効利用の可能性

(1) 碎石の均一性

本実験では，解析上の便宜を考慮し，粒子間のばらつきが少ないと予想される碎石を検討の対象としたが，その均一性をはじめに確認しておきたい。

各碎石から粒径 15 ~ 20 mm の粒子を無作為に 100 個採取して，1 個 1 個の比重および吸水率を測定した。図一はその測定例であり，比較的良品質および低品質の碎石の表乾比重の分布を，ほぼ同一の平均的な比重をもつ砂利と対比させて示している。

砂利の場合は，ばらつきが大きく，特に低品質の砂利でこの傾向が著しい。一方，碎石の分布の幅は狭く，分布を正規分布と仮定して求めた標準偏差の値と比較してみても，砂利に比べて均一性に優れているのが明瞭である。したがって，砂利を使用したコンクリートにみられた骨材の不均一性に由来する欠陥が，碎石使用の場合はそれほど問題にならないと考えられ，骨材とコンクリートとの諸性質の関連を検討するには，碎石の平均的な物

性のみに着目しても差し支えないと推定される。

図一2は、合計1500個の測定値について、比重と吸水率との関係を片対数上で求めた結果を示している。

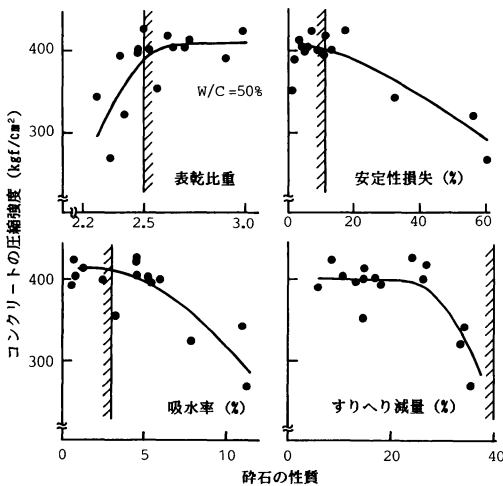
大略的には一定の傾向がみられるものの、両者の関係を単一の直線で表示するには無理がある。これは、母岩の石質によって、各碎石の比重と吸水率との関係が異なるためと推察され、碎石の品質とコンクリートの諸性質との関連を求める際に、比重および吸水率のいずれを指標とするかによって、その関係が幾分異なってくることを示唆している。

(2) 碎石の物性とコンクリートの性質との関係

骨材の品質は、一般に比重や吸水率等の物理的性質によって判定される。しかし、それらの物性でいずれの範囲の骨材を低品質とよぶかについての明確な定義は存在しないように思われる。低品質骨材とは本来、コンクリートの所望の性質を確保し得ない骨材と定義されるべきであると思われるから、骨材の物性で低品質であることの目安を得るためには、骨材の物性とコンクリートの性質との関係をよくとらえておく必要がある。

図一3は、この検討の一例として、碎石の諸物性と水セメント比50%のコンクリートの圧縮強度との関連を示している。

総体的にいずれの関係にもばらつきがみられ、また上述の予測どおり、比重と吸水率とではコンクリートの強度との関係において傾向が若干異なるなど、単一の物性のみで碎石の品質を判定するのは難しいが、すりへり減量を除けば、現行の規格内にある碎石を用いたコンクリートの強度は、ほぼ一定の強度を確保しているから、規格が品質判定の有力な目安となるのは疑いない。ただし、この例では、吸水率が5%程度でも、良質骨材と同程度のコンクリート強度を有しており、物性によっては



図一3 碎石の性質とコンクリートの圧縮強度の関係

現行規格の緩和が可能であることを示唆している。むしろ、コンクリートの強度レベルによってこの関係は異なり、また耐久性等についても同様の検討を行う必要があるが、品質規格の見直しは重要な課題であり、現行の規格では使用不能と判定されかねない碎石でも、有効利用の道は残されているといえる¹⁾。

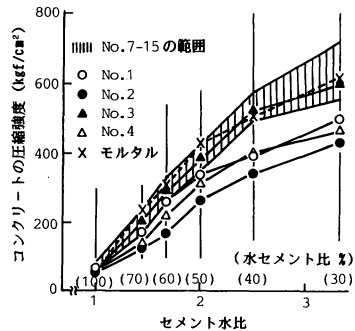
(3) コンクリートの強度特性

低品質骨材の定義については、今後検討の余地が十分残されているものの、ここでは比重2.5以上の規格に満たない碎石を低品質であると考え、以下の議論を進めたい。この規格を満たす碎石は、表一1のNo.7~15であり、これを用いたコンクリートの性質を一括して範囲で示し、これと低品質碎石の代表的な例であるNo.1~4を使用したコンクリートの性質を比較することとする。

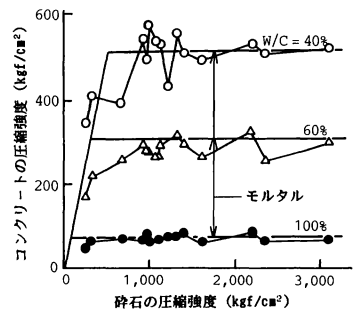
図一4は、このようにして求めたコンクリートの圧縮強度を示している。

規格内であっても、それぞれの碎石の品質はきわめて良質から規格限度まで大きく異なるが、それにもかかわらず、コンクリートの圧縮強度の範囲はきわめて狭く、セメント水比の広い範囲にわたって、ほぼモルタルの強度に等しい値となっている。

図一5は、碎石の圧縮強度とコンクリートの圧縮強度との関係を求めたものであり、いかに優れた碎石を用いても、コンクリートの圧縮強度はモルタルの圧縮強度を



図一4 コンクリートの圧縮強度



図一5 碎石とコンクリートの圧縮強度の関係

超えられない。これは、良質砕石使用の場合、コンクリートの圧縮強度がモルタルによって支配されるためと考えられる。

他方、砕石の品質が著しく劣る場合には、これが弱点部となり、コンクリートの圧縮強度はモルタル強度を下回る。特に、水セメント比が小さい領域においてこの傾向が強いため、高強度が望まれるコンクリートへ低品質の砕石を使用するには無理がある。逆に、水セメント比が極端に大きい配合では、砕石の品質によるコンクリート強度の差は小さいから、このような方面で、低品質の砕石を活用するのも、1つの手段と考えられる。

図-4から明らかなように、配合を調節することにより、低品質骨材を使用しても、ある程度のコンクリート強度は確保できる。たとえば、300 kgf/cm²のコンクリート強度を得るためには、規格内砕石使用の場合、水セメント比が60%程度であるのに対し、低品質砕石の場合は、45~55%の水セメント比でこれに対応できる。この水セメント比の違いは確かに大きいですが、良質骨材を遠隔地から購入するより、経済的である場合もあり得よう。この点をより一般化するため、次のような解析を試みた。

コンクリートをモルタルと粗骨材とからなる複合材料であると考えると、図-6のような直列および並列モデルを想定する。直列モデルでは、両材料に等しい力が作用し、並列モデルでは、両材料のひずみが等しい。

後述するコンクリートの静弾性係数を用いて、いずれのモデルが現実により近いかを検討したところ、 $E_a > E_m$ のときは直列モデル、 $E_a < E_m$ のときは並列モデルの適合性が優れていることを確認した。これが圧縮強度にも当てはまると仮定すれば、コンクリートの圧縮強度に関して、次の複合則が成立する。

$$F_c = k [1 - (1 - E_a/E_m) V_d] F_m + (1 - k) F_m \left. \begin{array}{l} E_a > E_m \text{ のとき } k = 0 \\ E_a < E_m \text{ のとき } k = 1 \end{array} \right\} \dots\dots (1)$$

ここで、 F_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)、 F_m ：モルタルの圧縮強度 (kgf/cm²)、 E_a ：粗骨材の静弾性係数 (×10⁵ kgf/cm²)、 E_m ：モルタルの静弾性係数 (×

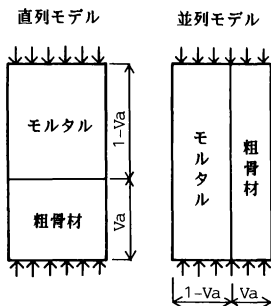


図-6 解析モデル

10⁵ kgf/cm²)、 V_a ：粗骨材容積率

上式は、 $E_a > E_m$ のとき、コンクリートの圧縮強度がモルタルの圧縮強度に等しいことを意味しており、それは図-4からもほぼ妥当であるのが認められる。一方、 $E_a < E_m$ の場合の上式の適合性は、図-7に示されており、おおむね実験値に適合しているといえる。

式中の諸要因 (F_m , E_m , E_a) は、一般的な測定項目ではない。そこで、実験結果をもとに、これらの要因を配合および骨材の物性と関連付けてみると、次のようになる。

$$F_m = 256(C/W) - 114 \dots\dots (2)$$

$$E_m = 0.59(C/W) + 1.06 \dots\dots (3)$$

$$E_a = 14.6 \rho_a - 32.9 \dots\dots (4)$$

ここで、 C/W ：セメント水比 (ただし、40% < W/C < 70%の範囲)、 ρ_a ：粗骨材の比重

これらを式(1)に代入し、粗骨材の比重をパラメーターとして、セメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係を求めると、図-8が得られる。

たとえば、300 kgf/cm²のコンクリート強度を得たい場合、粗骨材の比重が2.40であれば、水セメント比を63%に、比重が2.30では49%に選定すればよいと読み取れる。この図は、あくまで本実験に特有のものであるが、多くの実験を重ねることにより、骨材の品質に対

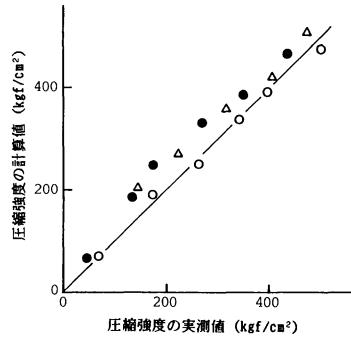


図-7 コンクリート強度推定式の検討

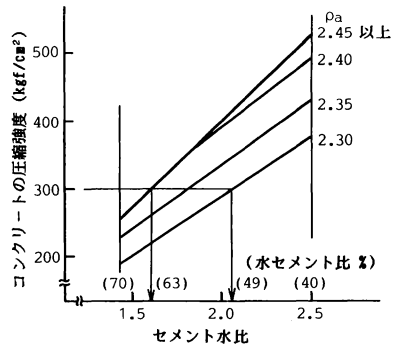


図-8 コンクリートの圧縮強度推定図

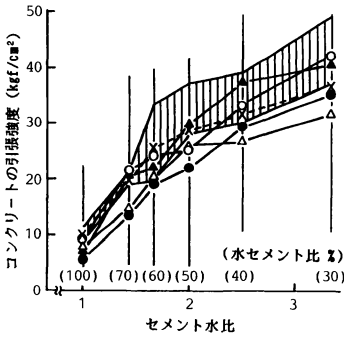


図-9 コンクリートの引張強度

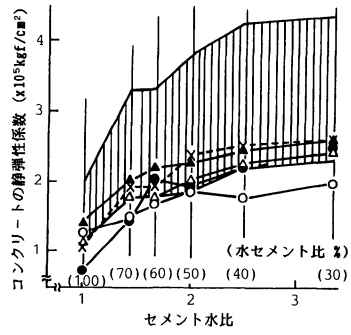


図-11 コンクリートの静弾性係数

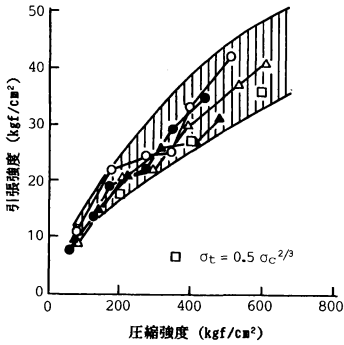


図-10 コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係

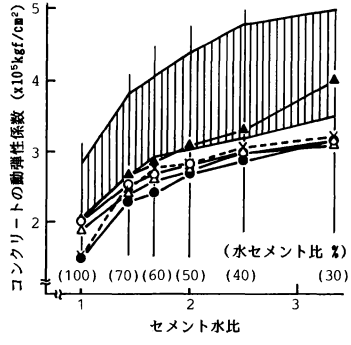


図-12 コンクリートの動弾性係数

応じた配合条件の選定に関するより普遍的で有用な関係が得られると期待される。

図-9は、コンクリートの割裂引張強度を示している。

規格内の砕石を用いたコンクリートの引張強度は、圧縮強度の場合に比し、範囲が広く、モルタルの引張強度を上回る場合が多い。圧縮強度に関しては、母材（モルタル）をほとんど補強しない砕石が、引張強度に関しては、これを補強するのが認められる。この役割には、砕石の物理的ならびに力学的性質のほか、その形状等も大きく関連すると予想される。

低品質砕石を用いたコンクリートの引張強度は、相対的に劣る傾向を示す。しかし、その傾向は圧縮強度の場合ほど明瞭ではなく、中にはモルタルの引張強度を上回る例もあり、この点にも、コンクリートの引張強度を単に砕石の物性と関連付けられない難しさがうかがわれる。いずれにせよ、低品質骨材を使用しても、配合の調節によって、ある程度のコンクリートの引張強度を確保することは可能となる。

コンクリートの圧縮強度と引張強度との関係は、図-10のようになる。

土木学会コンクリート標準示方書では、引張強度を実測しない場合、次の関係式を用いて、圧縮強度の値から推定することとしている。

$$\sigma_t = 0.5 \sigma_c^{2/3} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 σ_t ：コンクリートの引張強度 (kgf/cm²)、 σ_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

この式に従って計算した値を図中に示しており、規格内の砕石を用いたコンクリートの範囲内でやや下側に位置しているから、ほぼ妥当な推定式と考えられる。低品質の砕石を使用したコンクリートも、この範囲に収まっており、示方書の式によって、引張強度を圧縮強度から推定しても差し支えないと思われる。この図は、コンクリートの圧縮強度と引張強度の比で示される脆度係数が、砕石の品質によって大きな影響を受けないことをも意味している。

(4) コンクリートの弾性的特性

コンクリートの静弾性係数および動弾性係数を、それぞれ図-11, 12に示す。

規格内砕石を用いたコンクリートの弾性的性質は、砕石の種類によって大きく異なっており、圧縮強度特性とは際立った対照を示している。また、モルタルの弾性係数に比較し、これらの砕石を用いたコンクリートのほとんどは、より大きな弾性係数を有しているのが認められる。

砕石の静弾性係数とコンクリートの静弾性係数との関係を求めたのが、図-13である。

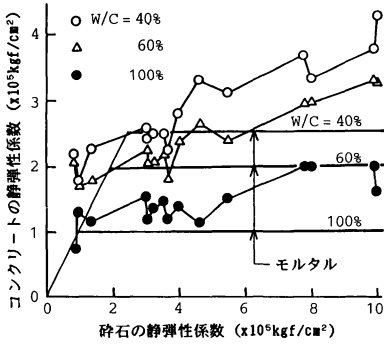


図-13 砕石とコンクリートの静弾性係数の関係

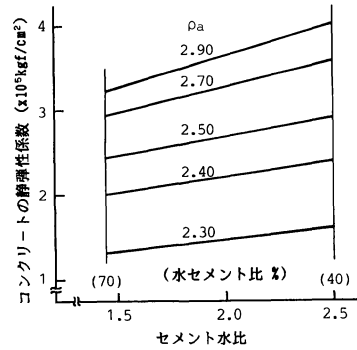


図-15 コンクリートの静弾性係数推定図

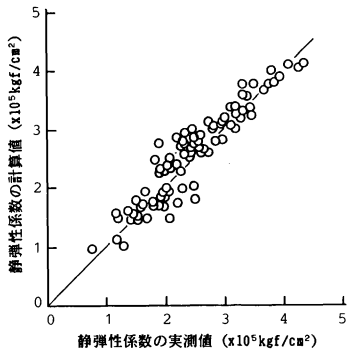


図-14 静弾性係数に関する複合式の検討

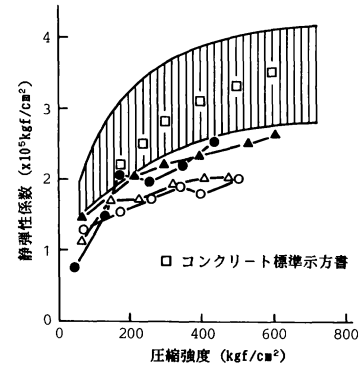


図-16 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

骨材の弾性係数が大きいほど、コンクリートの弾性係数も大きい傾向は明瞭であり、この関係は、図-5の圧縮強度の場合とは著しく異なる。強度の場合は、砕石とモルタルのうちの弱点となる材料の強度に大きく支配されるのに対し、弾性係数は両材料の容積割合を考慮した平均的性質によって決まるため、強度とは異なる性質を示すと考えられよう。

この弾性係数に関しては、厚肉球殻モデルを設定した次の Hashin-Hansen の複合式⁷⁾がある。

$$E_c = E_m \frac{(1 - V_a) E_m + (1 + V_a) E_a}{(1 + V_a) E_m + (1 - V_a) E_a} \dots\dots\dots (6)$$

図-14は、この式の適合性を検討したものであり、低品質骨材使用を含めて、計算値は実測値に比較的良好に適合している。

前述の圧縮強度と同様に、上式をより一般化しようとした試みが、図-15である。

低品質の砕石を用いたコンクリートの弾性係数が小さいのは明瞭であり、たとえば $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の弾性係数を望む場合、2.40より小さい比重の砕石では、いくら配合を調節しても、それがきわめて難しいことをこの図は示唆している。

一般に、コンクリートの弾性係数は圧縮強度と比較的高い相関にあるといわれ、土木学会コンクリート標準示

方書でも、実測によらない場合は、これを圧縮強度から推定することが認められている。図-16は、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係であり、図中には、示方書による推定値も示してある。

示方書の値は、規格内にある砕石を用いたコンクリートの範囲のほぼ中間に位置し、一見して妥当であるようにも思える。しかし、規格内であってもその範囲は広く、場合によっては、強度から定めた弾性係数が過大あるいは過小となりかねない。しかも、低品質砕石を用いたコンクリートの弾性係数は、規格内砕石の範囲から外れ、圧縮強度から推定される値よりもきわめて小さいから、示方書に従って弾性係数を使用した場合には、実際よりも過大な値となって、設計どおりの弾性変形等にならない可能性が強い。したがって、特に低品質の砕石を使用するときには、弾性係数の値を示方書の解説で述べられているように、実測して求める必要があろう。

(5) コンクリートの乾燥収縮特性

表-1の砕石 No.2, 9, 13 および 14 を対象とし、表-2の配合に従って、コンクリートの乾燥収縮特性を求めた。得られた収縮の経時変化を双曲線型と仮定し、終局の収縮値を計算して、解析の対象とする。

コンクリートの乾燥収縮が単位水量によって大きく支配されることはよく知られているが、単位水量はワーカ

ピリチーの決定的要因でもあり、主として後者を考慮して単位水量を定める場合が多い。ここでも、スランプをほぼ同一とするため、各配合の単位水量を一定とした。したがって、ワーカピリチーをある程度犠牲にしてまでも、収縮を低減したいと考える場合には、本文とは異なる結論が導かれよう。

図-17に、実験結果を示す。

低品質骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は大きく、骨材の品質がコンクリートの収縮に大きくかわることは疑いない。コンクリートの複合則については多くの提案があり、その中では次の Hansen らの式⁸⁾の信頼性が高いと思われる⁹⁾。

$$\epsilon_c = \frac{(\epsilon_m - \epsilon_d)\{n+1-(n-1)V_d^2 - 2nV_d\}}{n+1} + \epsilon_a \quad \left. \begin{array}{l} n = E_a/E_m \geq 1 \text{ の場合} \\ \dots\dots\dots (7) \end{array} \right\}$$

$$\epsilon_c = \frac{(\epsilon_m - \epsilon_d)\{n+1-(n-1)V_d\}}{n+1+(n-1)V_d} + \epsilon_a \quad \left. \begin{array}{l} n = E_a/E_m \leq 1 \text{ の場合} \\ \dots\dots\dots (8) \end{array} \right\}$$

ここで、 ϵ_c : コンクリートの収縮 ($\times 10^{-6}$)、 ϵ_m : モルタルの収縮 ($\times 10^{-6}$)、 ϵ_a : 粗骨材の収縮 ($\times 10^{-6}$)

構成材料の収縮に関しては、次のような実験式が成り立つ。

$$\epsilon_m = 3.04 W/C + 1179 \dots\dots\dots (9)$$

$$\epsilon_a = 1.94 \times 10^8 \rho_a^{-14.3} \dots\dots\dots (10)$$

図-18は、これらの式を複合則に代入して、コンクリートの乾燥収縮をより一般的に表示しようとした試みである。

低品質骨材を用いたコンクリートの収縮が大きいのは、骨材の弾性係数が小さいために、モルタルの収縮を拘束する能力が弱いためであり、また従来看過される傾向の強かった骨材自体の収縮が無視できないほどに大きいことも強く関連している。

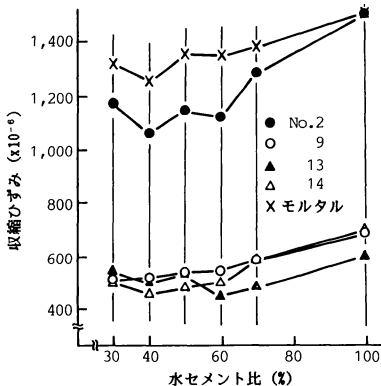


図-17 コンクリートの乾燥収縮

全体的に、水セメント比が小さいほど、コンクリートの収縮が小さい傾向は認められるが、骨材の品質の影響に比べれば、その効果は小さく、単位水量が一定の場合には、配合の調節によってコンクリートの収縮を低減させようとしても、それには限度がある。

(6) コンクリートの耐凍害性

コンクリートの凍結融解試験の結果を、図-19に示す。

資料が十分でないため、上述の諸特性と同様の解析は難しいが、砕石の品質がコンクリートの耐凍害性に大きく影響することは疑いない。水セメント比が70%の場合、骨材の吸水率の大きさに応じて、相対動弾性係数の低下は著しくなる。しかし、モルタル自体の耐凍害性が劣るため、たとえ良質の砕石を用いても、ある程度の劣化は免れないから、骨材の品質にかかわらず、水セメント比を低く抑えることの意義は大きい。

水セメント比を50%とした場合には、モルタルの耐凍害性が良好になると推察され、比較的吸水率の大きな低品質砕石を用いても、モルタルがその弱点を補い、コンクリートに劣化が認められない例もある。しかし、砕石の品質がきわめて劣れば、この配合でも、コンクリートの耐凍害性をほとんど期待できない可能性が強い。圧

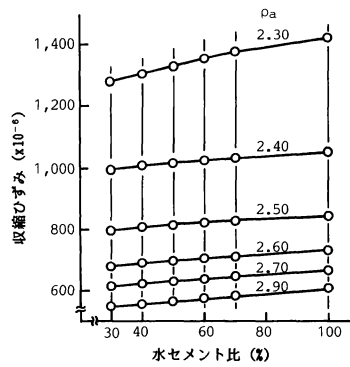


図-18 コンクリートの乾燥収縮推定図

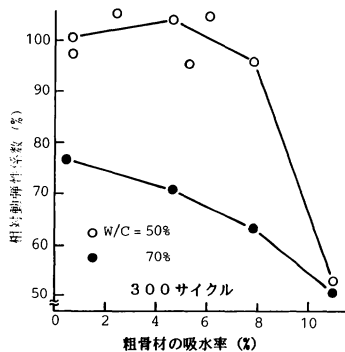


図-19 コンクリートの耐凍害性

縮強度と同様に、コンクリートの耐凍害性も、構成材料のうちの弱点となる材料によって基本的に決定されると考えられ、低品質骨材自体の劣化が凍害発生の主因となる場合もあり得るから、あまりにも品質が劣る骨材を寒冷地において使用するには無理があるように思われる¹⁰⁾。

4. 混合使用による低品質骨材有効利用の可能性

(1) コンクリートの強度特性

表一の極端に品質が劣る砕石 No. 1(A) にきわめて良質の砕石 No. 15(D) を組み合わせた場合および品質の差が比較的小さい砕石 No. 4(B) と No. 10(C) を組み合わせた場合の二通りを選定し、良質骨材との混合による低品質骨材の有効利用の可能性を検討した。以下、これらの混合骨材をそれぞれ砕石 A-D, 砕石 B-C とよぶ。良質骨材の混合割合は、全粗骨材量 (容積) に対して、20%刻みとした。配合は、表二の水セメント比 30, 50, 70% の 3 種類である。

図一20 は、コンクリートの圧縮強度を示しており、図中の混合割合とは、良質側の砕石の混入割合である。

水セメント比が 30% および 50% の場合は、良質骨材の割合が増すほどコンクリートの圧縮強度が増大しており、混合による効果が見受けられる。これに対し、水セメント比 70% については、強度がほとんど増大せず、特に砕石 B-C では、混合の効果がない。

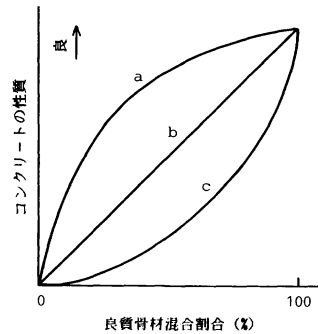
前述のように、コンクリートの圧縮強度は、モルタルと粗骨材との相対的な強度の関係によって大きく左右される。混合使用によって強度の改善をはかる場合でも、たとえきわめて良質の骨材を混合したとしても、その強度はモルタル強度を超えられないことをよく認識しておく必要がある。また、大きな水セメント比では、モルタル強度が、骨材の強度を下回る可能性が強く、コンクリートの強度はモルタル強度に支配されるため、混合の効果を期待できない。図の水セメント比 70% の場合はこれに相当すると考えられる。

混合使用によってコンクリートの諸性質が改善される効果を模式的に示せば、図一21 のようになる。

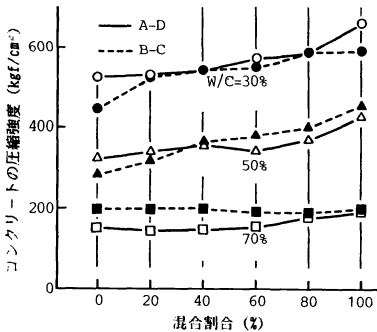
いうまでもなく、(a) のようなタイプであれば、混合の効果は理想的であり、他方、(c) のようであれば、その効果は薄い。この図と対比させるため、図一20の結果を書き換えたのが図一22 であり、ここでは、低品質骨材を単独で使用した場合 (混合割合: 0%) を基準とした強度比で示してある。改善効果の小さい水セメント比 70% は割愛した。

混合の結果は、骨材の組合せではっきり異なり、砕石 B-C は理想的な (a) のタイプに近いのに対し、砕石 A-D は、混合割合が 60% 程度まで明確な効果を示さない (c) のタイプとなっている。したがって、混合使用とするときには、実際に組み合わせる骨材について、このタイプの違いをよく見極めておく必要がある。

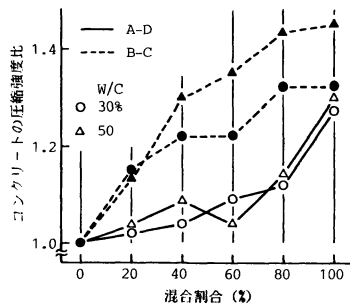
前掲の図一1 によれば、粒子レベルでとらえた砕石のばらつきは、確かに砂利と比較して小さいものの、砕石 A などにはきわめて劣悪の粒子が多数含まれている。このような粒子がコンクリート中において、強度上の弱点となるのは明らかであり、たとえ良質骨材の混合割合を高めたとしても、残存する劣悪粒子が強度の増進を阻むことは強く懸念される。砕石 A-D を用いたコンクリートの強度改善が思わしくない理由は、この劣悪粒子の作用によると推察され、骨材の性質を粒子レベルでと



図一21 混合によるコンクリートの性質の改善 (模式図)



図一20 コンクリートの圧縮強度



図一22 コンクリートの圧縮強度比

らえておく必要があるのを示唆している。

図-23は、混合割合によるコンクリートの引張強度を、強度比で示している。

いずれの場合も、混合による強度の顕著な改善がみられず、図-21の分類に従えば、(c)のタイプに属する。特に、碎石A-Dでは、混合割合のベシマムが存在するようなきわめて独特の傾向を示しており、良質骨材の混入が引張強度を低めるようでは、逆効果といえる。この理由については定かでないが、物理的性質に極端な差のある骨材の組合せであるため、強度に部分的な偏りが生じて、それが悪影響をもたらしたと推察される。

(2) コンクリートの弾性的特性

図-24および図-25は、それぞれコンクリートの動弾性係数および静弾性係数を示している。

いずれの場合も、良質骨材の混合割合が増すに従って、弾性係数もほぼ直線的に増大しており、混合による一定の効果が認められる。コンクリートの弾性的な性質に対しては、強度特性と異なり、混合骨材の平均的な物性が関連するため、このような傾向を示すと考えられるが、前述の式(6)で、低品質の骨材を用いたコンクリートをマトリックスとし、これに良質骨材を混合すると想定して、混合骨材を用いたコンクリートの静弾性係数を碎石A-Dの場合について算出すると、図-26が得られた。

計算値は実測値にほぼ一致しており、弾性係数の改善

効果は、この複合則に従っていると考えられる。

(3) コンクリートの乾燥収縮特性

図-27は、コンクリートの乾燥収縮の終局値を示している。

いずれの場合も、良質骨材の混合割合が増すに従い、収縮はほぼ直線的に減少しており、コンクリートの乾燥収縮に対しても、弾性係数と同様、混合骨材の平均的な物性が関連すると推察される。静弾性係数の場合と同じ想定をして、式(7)、(8)の複合則を適用した計算結果を同図中に示しており、実測値に近似する値となっている。

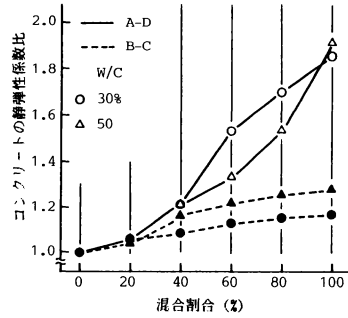


図-25 コンクリートの静弾性係数比

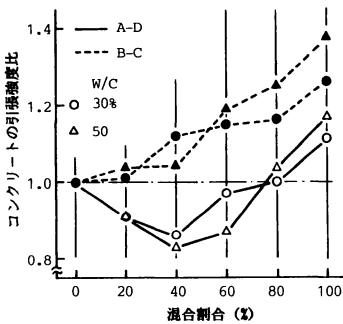


図-23 コンクリートの引張強度比

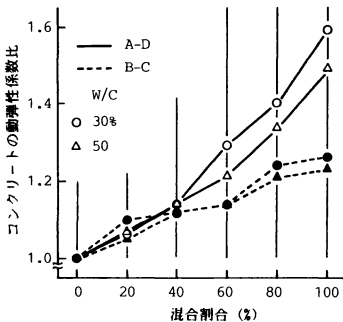


図-24 コンクリートの動弾性係数比

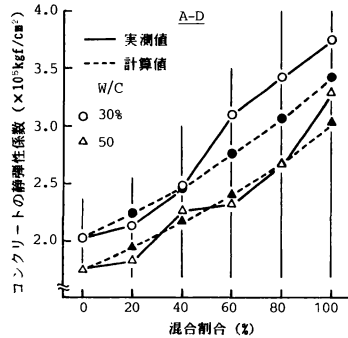


図-26 静弾性係数に関する複合式の検討

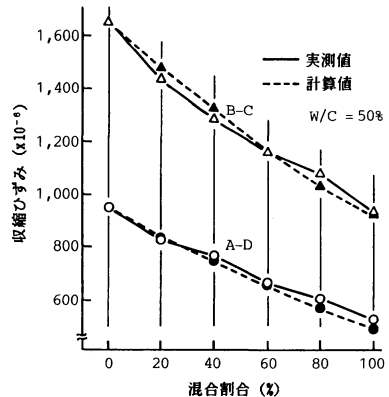


図-27 コンクリートの乾燥収縮

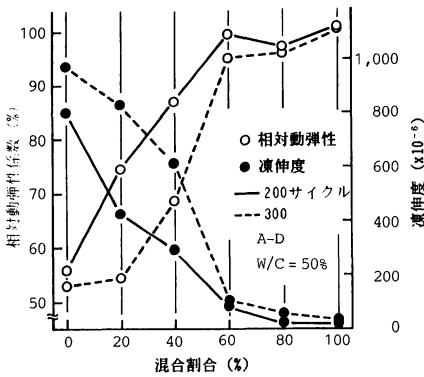


図-28 コンクリートの耐凍害性

いるから、乾燥収縮に対する混合の効果も、この複合則で表示できると考えられる。

(4) コンクリートの耐凍害性

水セメント比 50% の場合の凍結融解試験の結果を図-28 に示す。なお、砕石 A-D のみの結果を示しているが、砕石 B-C では、ほとんど劣化が生じなかった。

200 サイクル程度までの混合の効果は、図-20 の (a) のような望ましいタイプであるが、サイクルの進行に伴い (c) のタイプに移行する傾向を示しており、低品質骨材の存在によりコンクリートの耐凍害性が損なわれるおそれは強い。

水セメント比が 70% の場合には、良質骨材の多いほど劣化が少ない傾向はみられるものの、この配合では、総体的に混合の効果を期待できないような結果が得られており、混合使用による場合も、配合に対する配慮が不可欠であるのは疑いない。

5. あとがき

本研究では、低品質骨材有効利用の現実的に可能な対応として、配合の調節および良質骨材との混合使用の 2 点を検討してみた。総体的に、これらの方法によって、すべての問題が解決するとは考えがたい結果となっており、低品質骨材を使用する場合には、慎重な配慮が望まれる。本結果の範囲内では、次のような点が指摘されよう。

(1) コンクリートの強度特性については、低品質骨材を使用しても、配合の調節により、所要の値を確保できる可能性がある。また、良質骨材との混合使用によっても、コンクリートの強度をある程度改善できるが、骨材の組合せによっては、逆効果となる場合もあり、注意を要する。

(2) コンクリートの弾性的特性は骨材の性質によ

て大きな影響を受け、配合を調節しても、低品質骨材使用のコンクリートの弾性的性質を向上させるには、限界がある。これに対し、混合使用の場合は、混合に見合った効果が期待できる。

(3) コンクリートの乾燥収縮特性に関しても、弾性的特性と同様に、配合の調節よりは、混合使用の効果が高いと考えられる。

(4) コンクリートの耐凍害性は、強度特性と同様に、マトリックスと骨材との弱点となる材料によって支配されると推察され、配合の調節および混合使用のいずれによっても、根本的な解決は難しいと思われるが、極端な低品質骨材でない限り、両方法を適宜組み合わせることによって、ある程度の耐凍害性を確保できる余地はある。

終わりに、本研究遂行にご尽力いただいた帷子國成氏 (岩手大学)、工藤達哉氏 (宮城県)、葛西 敏氏 (日本鋼管工事)、氏家邦夫氏 (安藤建設)、遠藤 毅氏 (東急建設) に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林茂敏, ほか: 低品質骨材を用いたコンクリートの特性, セメント・コンクリート, No.440, pp.16~22, 1983.
- 2) 友澤史紀, ほか: 低品質骨材の適正利用に関する研究, セメント・コンクリート, No.440, pp.23~30, 1983.
- 3) 迫田恵三: 骨材の品質がコンクリートの性質に及ぼす影響, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.233~236, 1986.
- 4) 友澤史紀, ほか: 混合骨材を用いたコンクリートの長期性状, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.245~248, 1986.
- 5) セメント協会: 細骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響, コンクリート専門委員会報告 F32, 1981.
- 6) 藤原忠司: 低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質, セメント・コンクリート, No.481, pp.8~15, 1987.
- 7) Hansen, T. C. : Influence of Aggregate and Voids on the Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Jour. of ACI, Vol.62, pp.193~216, 1965.
- 8) Hansen, T. C. and Nielsen, K. E. C. : Influence of Aggregate Properties on Concrete Shrinkage, Jour. of ACI, Vol.62, No.7, pp.783~794, 1965.
- 9) 後藤幸正・藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, No.286, pp.125~137, 1979.
- 10) 三浦 忠・石垣 茂: 骨材の質によるコンクリートの耐久性に関する研究, セメント・コンクリート, No.317, pp.8~16, 1973.

(1988.10.17・受付)