

高強度コンクリートの強度安定化のための 粗骨材の破碎値による品質管理方法^{※)}

Quality Control Method for Coarse Aggregate to Stabilize the Strength of High-Strength Concrete

伊 藤 智 章^{※※)}
Tomoaki Ito

要 旨

設計基準強度で $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンクリートにおいて、使用する砕石などの粗骨材の品質、特に骨材自体の強度がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は大きいことが知られている。骨材の硬さの程度の評価方法として、BS812-110:1990の試験方法（以下、BS試験法）がある。

高強度コンクリートを出荷するレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）での粗骨材の受入検査として、BS試験法の迅速化・簡便化を図った改良方法の測定精度を確認し、生コン工場での品質管理への導入の可否を検討した。

キーワード

高強度コンクリート、圧縮強度、粗骨材、破碎値、品質管理

1. はじめに

近年、都市部における超高層建築物などの建設需要の増加に伴い、設計基準強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンクリートの適用事例が増加している。こうした高強度コンクリートは、圧縮強度に骨材の品質が大きな影響を及ぼすことが知られている¹⁾。また、骨材の中でも粗骨材の硬さの影響が大きく²⁾、想定した品質を満たさない粗骨材が使用された場合は、所要のコンクリート強度が得られない事態を招く。そのため、 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 超の高強度コンクリートを製造出荷する生コン工場では、高品質な骨材の事前選定と、入荷骨材に関してJIS規格項目だけでは得られない硬さの評価を

迅速簡便に行えることが望ましい。

これまでに、コンクリートやモルタルの圧縮強度から骨材の良否判定を行う方法³⁾や、骨材原石からコアを採取し骨材強度から判定する方法³⁾等が報告されている。しかし、労力と時間を要することや、生コン工場に入荷したロットと原石サンプルとが整合しないことなどの課題もあった。

粗骨材の硬さの程度を評価するための試験方法として、汎用性と原理の明確さからBS試験法が知られている。しかし、BS試験法は主に舗装及び軽量コンクリート用骨材を対象とするものであり、粒度調整した絶乾状態の多量の粗骨材を試料として要する。さらに検査機器は重く、耐圧試験機での载荷に時間が掛かるなど

※) 受付：2021年2月8日 受理：2021年2月22日

※※) 特別正会員 宇部興産株式会社 建設資材カンパニー技術開発研究所 グループリーダー

多くの労力と時間が必要である。

そこで、100N/mm²を超える高強度コンクリートを出荷する生コン工場での粗骨材の迅速簡便な受入検査として、BS試験法の省力化・簡便化を図った新たなBS破碎簡易法の測定精度を確認し、生コン工場での品質管理への導入の可否を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表1に示す。粗骨材は国内の生コン工場が高強度コンクリートに使用実績のあるものから、種類または産地の異なる11種類を選定した。使用粗骨材の外観を写真1に示す。

2.2 コンクリートの配合、試験項目および試験方法

コンクリートの配合を表2に示す。水結合材比(W/B)は25%、17%および13%とした。また、高性能減水剤量によりスランプフローを調整した。試験項目および試験方法を表3に示す。

2.3 BS試験法とBS破碎簡易法の試験方法

BS試験法は、10~15mmの粒度に調整した粗骨材試料(Ga)が3kg/回必要であり、試料を約25kgの専用容器に詰めて耐圧機に据えて、プランジャーを用いて速度40kN/minで最大荷重400kNまで10分間載荷する。載荷後に2.5mmふるいにとどまる試料(Gb)の質量を測定し、(A)式により破碎値を算出する。

$$\text{破碎値 (\%)} = \{(Ga - Gb) / Ga\} \times 100 \cdots \cdots (A)$$

Ga=載荷前の試料の質量 (g)

Gb=載荷後の2.5mmふるいにとどまる試料の質量 (g)

一方、BS破碎簡易法では、表4に示すように最大荷重までの載荷時間、試料の粒度調整の有無、試料の状態および試料量を変えた場合の破碎値と、従来のBS試験法の破碎値について比較検討した。試験精度の確認用に5回/水準の試験をした。なお、試料量が3kgの場合はBS試験法で用いる専用鋼製容器(直径154mm×高さ140mm 写真2)とし、試料量が1kg以下の場合は生コン工場で強度試験用型枠に用いる質量が約5kgの鋼製容器(直径100mm×高さ200mm 写真3)とした。いずれの試験容器を用いた場合においても最大応力を

21.4N/mm²とした。なお、最大応力を一定としたので、所定の載荷時間となるように載荷速度を調整した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度

コンクリートのスランプフローおよび空気量は、いずれの場合も表3に示す許容範囲の性状が得られ、圧縮強度試験用供試体の成型を行った。結合材水比(W/W)とコンクリートの圧縮強度との関係を図1に示す。W/Bが25%では圧縮強度は120N/mm²程度であり、粗骨材の違いが圧縮強度に与える影響は小さかった。一方、W/Bが17%およびW/Bが13%では圧縮強度が140N/mm²程度を超え、骨材の違いによる圧縮強度の差が大きくなり、特にW/Bが13%では、その差が40N/mm²程度となった。以上より、W/Bが小さくコンクリートの圧縮強度が高くなるほど、粗骨材の品質の違いによる強度差が大きくなる傾向が確認できた。

3.2 粗骨材の密度および吸水率と圧縮強度との関係

粗骨材の表乾密度および吸水率とコンクリート強度の関係を図2および図3に示す。JIS規格の項目の一つである粗骨材の表乾密度および吸水率とコンクリートの圧縮強度の間の相関係数(R²)はすべて0.12以下と小さく相関関係は認められなかった。つまり、JIS規格項目の管理のみで高強度コンクリートの強度の管理は難しいと考える。

3.3 BS試験法とBS破碎簡易法の測定結果

(1) BS試験法とBS破碎簡易法の破碎値

BS破碎簡易法の測定結果について載荷時間3分の場合を一例としてBS法(10分)と併せて図4に示す。なお、試験は絶乾状態の試料で試験し、破碎値は5回の測定結果の平均値で示している。載荷時間、試料質量および試料の調整の有無による明確な傾向の差は認められないが、破碎値は最大と最小でおおよそ10%程度の違いが生じ、コンクリートの強度が最も高くなったG9の場合には他と比べて破碎値が小さくなった。この結果から、BS法の簡易化と、BS破碎簡易法を用いた骨材の破碎値によりコンクリートの品質管理ができる可能性があることの見えが得られた。

表1 使用材料

材料	記号	種類	生産者・産地	物性値他
セメント	B	シリカフェーム セメント	宇部三菱 セメント社	ρ :3.08
細骨材	S1	硬質砂岩砕砂	茨城県産	ρ :2.62、Q:1.59
粗骨材	G1	硬質砂岩碎石 2005	東京都産	ρ :2.67、Q:0.81
	G2	硬質砂岩碎石 2005	東京都産	ρ :2.65、Q:0.97
	G3	硬質砂岩碎石 2005	東京都産	ρ :2.67、Q:0.64
	G4	硬質砂岩碎石 2005	東京都産	ρ :2.65、Q:0.74
	G5	硬質砂岩碎石 2005	茨城県産	ρ :2.64、Q:0.66
	G6	石英安山岩碎石 2005	兵庫県産	ρ :2.62、Q:0.92
	G7	粘板岩碎石 2005	広島県産	ρ :2.75、Q:0.39
	G8	硬質砂岩碎石 2005	福岡県産	ρ :2.68、Q:0.53
	G9	硬質砂岩碎石 2005	栃木県産	ρ :2.64、Q:0.51
	G10	石英安山岩碎石 2005	兵庫県産	ρ :2.62、Q:0.95
	G11	安山岩碎石 2005	山梨県産	ρ :2.63、Q:2.38
水	W	上水道水	東京都	—
混和剤	SP	高性能減水剤	日本シーカ社	—
	DF	消泡剤	日本シーカ社	—

注) 密度又は表乾密度： ρ (g/cm³)、吸水率：Q(%)

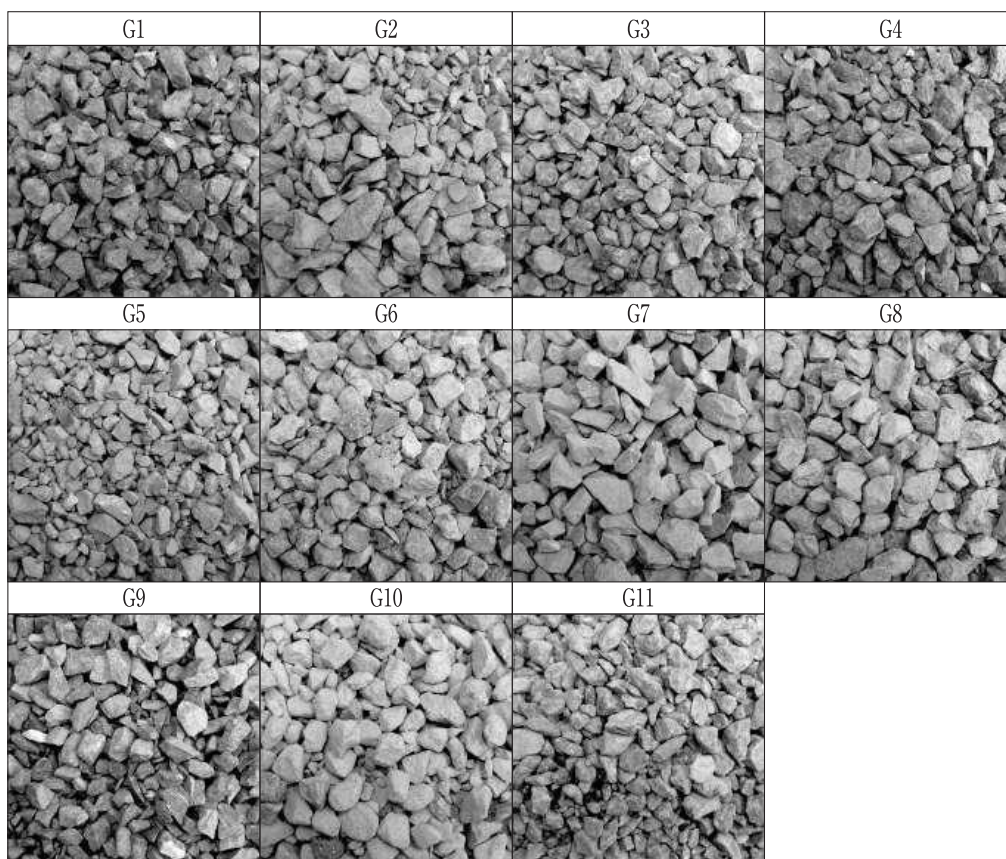


写真1 使用粗骨材の外観

表2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)					
					C	W	S	G	SP	DF
G1 ~ G11	25	65	2.0	0.520	640	160	776 ~ 793	817 ~ 858	5.44	0.064
	17				942	160	517 ~ 534	817 ~ 858	9.89	0.094
	13				1231	160	272 ~ 286	817 ~ 858	16.0	0.123

表3 試験項目および試験方法

試験項目	許容範囲	試験方法
スランプフロー	65 ± 0cm	JIS A 1150
空気量	2.0%以下	JIS A 1128
コンクリート温度	20 ± 2℃	JIS A 1156
圧縮強度 (標準水中養生)	-	JIS A 1132, JIS A 1108 供試体寸法: φ10×20cm 試験材齢: 28日

表4 破碎試験条件

最大荷重までの 荷重時間(分)	2		3			5		10	
	有	無	有	無	無	有	無	有	無
試料の粒度調整	有	無	有	無	無	有	無	有	無
試料の状態	絶乾		絶乾		表乾	絶乾		絶乾	
試料量	0.5kg	○	○	○	○	○	○	○	○
	1.0kg	○	-	○	-	-	○	-	○
	3.0kg	○	-	○	-	-	○	-	○BS法



写真2 BS試験法容器



写真3 BS破碎簡易法容器

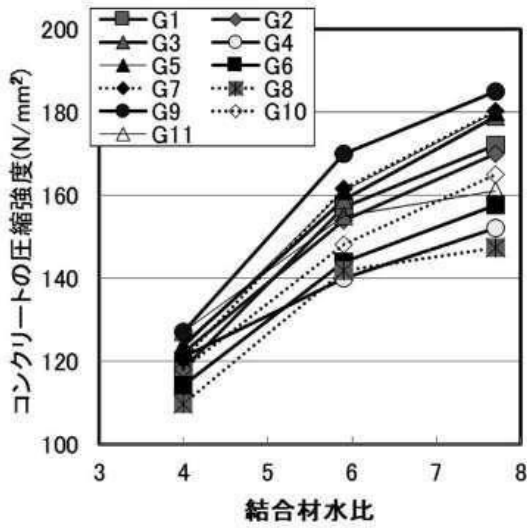


図1 B/Wとコンクリートの圧縮強度との関係

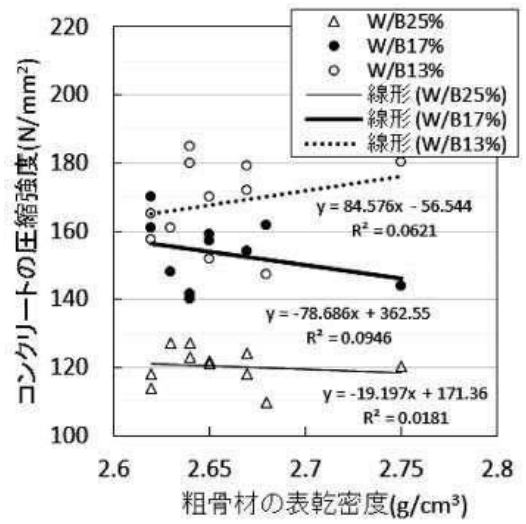


図2 粗骨材の表乾密度とコンクリート強度の関係

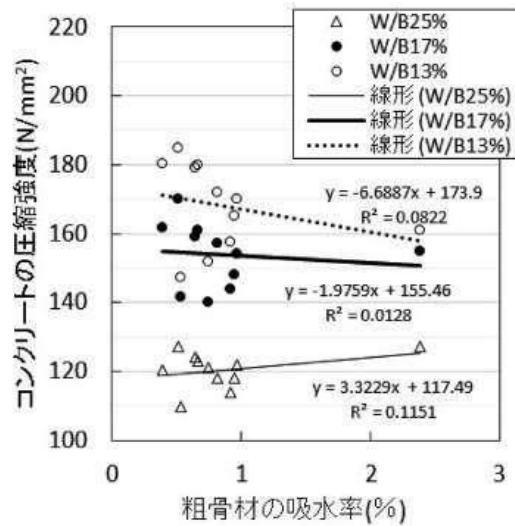


図3 粗骨材の吸水率とコンクリート強度の関係

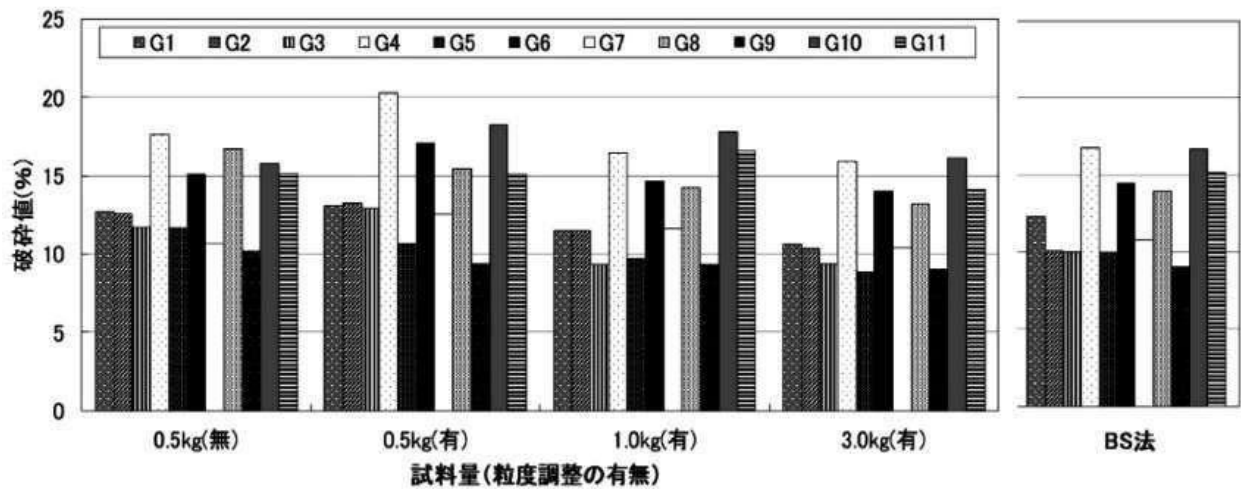


図4 破砕試験結果

(2) BS試験法とBS破碎簡易法との試験精度の確認

各試験条件における破碎値の変動係数を図5に示す。載荷時間および試料量の違いによる変動係数は、載荷時間が長くなる程、また試料量が大きくなる程小さな値を示し、粒度調整の有無で明確な傾向の差は認められなかった。いずれの試験条件も変動係数は5%程度以下であり、大差は無かった。

(3) 破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係

破碎値とコンクリートの圧縮強度の関係について、載荷時間3分の場合を一例として図6に示す。W/Bが25%の相関係数は0.274~0.538となり、高い相関が得ら

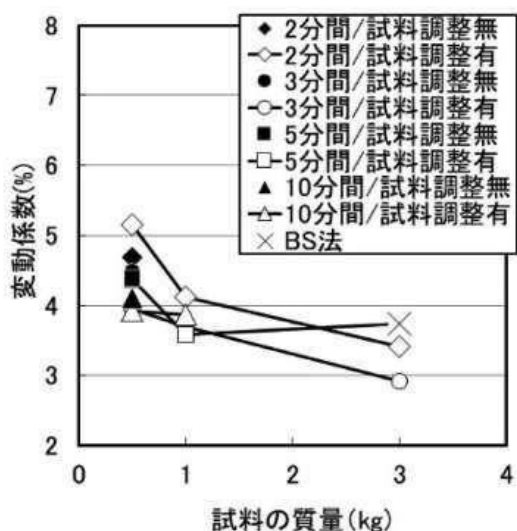


図5 各試験条件における破碎値の変動係数

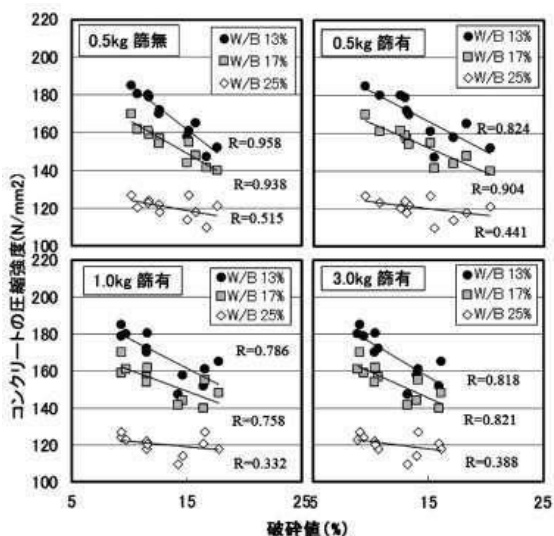


図6 破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係

れなかった。しかし、W/Bが17%以下、コンクリートの圧縮強度として140N/mm²程度を上回る強度域では粗骨材の破碎値とコンクリートの圧縮強度の間に非常に高い相関 (R = 758~958) が認められた。

(4) 試験条件と試験測定精度

破碎値の変動係数と、破碎値の平均値とW/Bが13%のコンクリートの圧縮強度の相関係数の関係を図7に示す。いずれの試験条件も破碎値とコンクリートの圧縮強度の相関係数は0.7以上と高いが、載荷時間を2分に短縮した場合には相関が若干低下した。また、試料調整の有無の影響は明確でなかった。しかし、いずれの試験条件も破碎値の変動係数は5%程度以下、相関係数は0.7以上であり良好な結果が得られた。

以上より、生コン工場の受入れ検査として活用する方法について、試験精度はBS試験法と同等以上で、かつ試験方法を可能な限り簡便化した最適な試験条件は、必要試料量を3kgから0.5kgに減じ、載荷時間を10分から3分に短縮、粒度調整をしない条件であることが分かった。

(5) 試料の湿潤状態 (絶乾・表乾) の比較検討

(1) ~ (4) の破碎値は、絶乾状態の粗骨材で実施した試験結果である。通常、生コン工場に入荷される粗骨材は、水を含んだ湿潤状態にある。そのため入荷さ

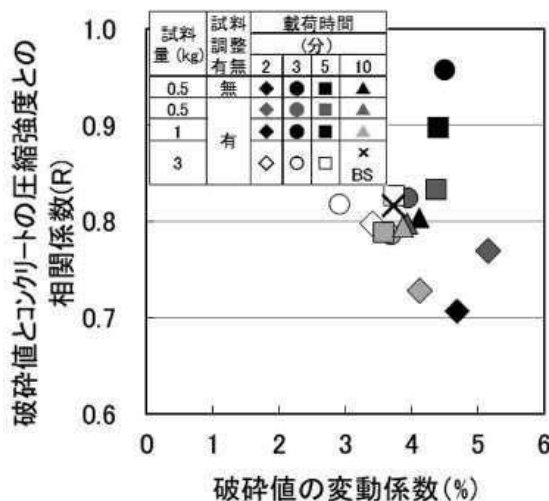


図7 破碎値の変動係数と破碎値とコンクリートの圧縮強度の相関係数との関係

れた骨材の受入可否判断をより迅速、簡便に行うためには、湿潤状態（表乾）の粗骨材を用いた破碎試験での検証も必要である。そこで試料の含水状態が、破碎値に与える影響を確認した。なお、試験条件は、(3)で良好な試験結果が得られた試料量0.5kg、载荷時間3分、粒度調整無しとした。破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係を図8、破碎値の変動係数と相関係数との関係を図9にそれぞれ示す。破碎値とコンクリートの圧縮強度の相関および破碎値の変動係数は、いずれも絶乾および表乾状態による大きな差は見られなかった。これより、試料の含水状態が測定精度に与え

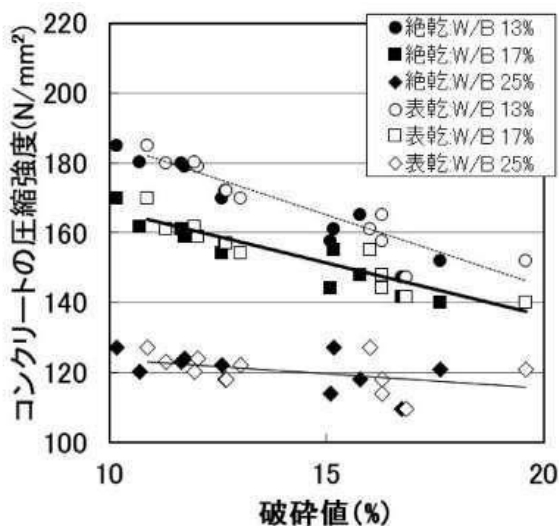


図8 破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係

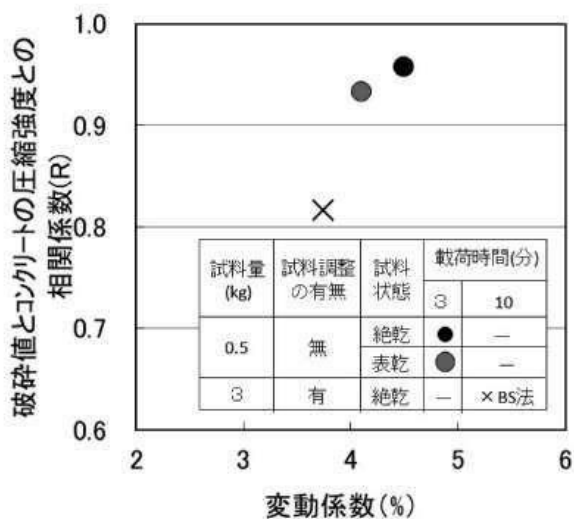


図9 破碎値の変動係数と破碎値とコンクリートの圧縮強度の相関係数との関係

る影響は小さいと考える。

(6) 生コン工場での受入れた粗骨材の破碎値の管理基準の検討

a) 予測式の算出（破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係）

BS破碎簡易法を生コン工場で活用するために、(5)の表乾状態の粗骨材で実施した破碎値W/Bおよびコンクリートの圧縮強度試験の結果に基づき、コンクリート強度を被説明変数とし、破碎値とW/Bを説明変数とした重回帰分析を実施し、コンクリートの圧縮強度予測式（①式）を導出した。予測式と実測値の比較を図10に示す。なお、各生コン工場独自の管理基準値を定めるにあたっては、事前に粗骨材の破碎値と所定の材齢におけるコンクリートの圧縮強度を把握する必要がある。

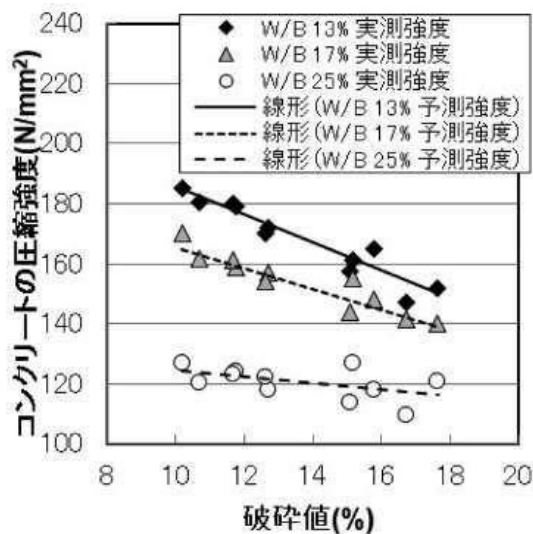


図10 予測式と実測値の比較：破碎値とコンクリートの圧縮強度との関係

$$F_e = (30.4 / A - 8.66) \times H_1 - 815.6 / A + 339.0 \dots \textcircled{1}$$

ここに、

F_e = コンクリートの予測圧縮強度

A = 工場の任意のB/W（又はC/W）

H_1 = 工場で求めた粗骨材の破碎値（%）

b) 管理破碎値の設定

破碎値とコンクリートの圧縮強度の関係が①式のよ

うに示されるので、生コン工場ではコンクリートの管理強度を下回らないように破砕値を管理する。破砕値とコンクリートの予測圧縮強度との関係を図11に示す。変動係数 (V) とコンクリートの予測強度から求めた管理強度破砕値 (H₂) を②式⁴⁾に代入し、不良率0.13%で管理強度を満足する管理破砕値 (H₃) を算出する。なお、日常管理では2回の破砕値の平均値を用いる。

$$H_2 = \text{①式の予測強度から求めた管理強度破砕値 (\%)}$$

4. まとめ

既存のBS破砕試験の試料量、載荷時間および試料調整を省力化・簡略化した方法により破砕値を測定することで、圧縮強度が140N/mm²程度以上の高強度コンクリートの強度が概ね推定できることが分かった。この知見の活用により、所要のコンクリートの圧縮強度を得るための粗骨材の受入時の判定が迅速、簡便になされ、高強度コンクリートの品質安定化に貢献可能と考える。

今後、骨材の静弾性係数やセメントペーストとの付着力等の影響も考慮した更なる推定精度の向上を検討したい。

参考文献

- 1) 柿崎正義他：粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学論文集、第4巻.第2号.pp9-21、1993.7
- 2) 伊藤智章他：東京近郊の硬質砂岩系骨材を用いた高強度コンクリートの物性、第57回セメント技術大会講演要旨、pp.234-235、2003.4
- 3) 渡邊悟士他：高品質粗骨材選定技術による超高強度コンクリートの品質の安定化、コンクリート工学、vol.45、No2、pp.32-40、2007.2
- 4) 三宅淳一他：コンクリートの配合設計と品質管理「性能」「品質」「経済性」を決定する配合の論理、コンクリート新聞社、pp.69-74、2013.2

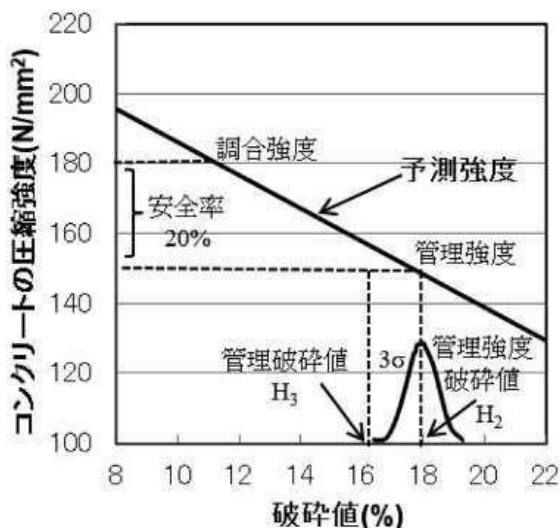


図11 破砕値とコンクリートの予測圧縮強度との関係

$$H_3 = \left(1 - \frac{3V}{\sqrt{2}}\right) H_2 \dots \dots \dots \text{②}$$

ここに、

H₃ = 管理破砕値 (%)

V = 変動係数