

論文 高強度コンクリートの静弾性係数に及ぼす粗骨材品質の影響

鶴田 浩章^{*1}・松下 博通^{*2}・鳥居 和史^{*3}

要旨：骨材の影響が大きくなる高強度コンクリートでは、粗骨材の品質からコンクリートの性質をある程度評価できれば、設計や維持管理において有益である。そこで、粗骨材のみを数種類に変化させた場合に、粗骨材品質とコンクリートの静弾性係数の関係にどのような影響が生じるのかを検討した。その結果、粗骨材の物理的性質の中では、吸水率、すりへり減量、400kN 破砕値がコンクリートの静弾性係数と一定の傾向を示す関係にあった。中でも、特に粗骨材のすりへり減量が大きい場合に、コンクリートの静弾性係数が低下する傾向があることが明らかとなった。

キーワード：粗骨材品質，静弾性係数，すりへり減量，400kN 破砕値，高強度コンクリート

1. はじめに

高強度コンクリートにおいては、骨材の影響がより大きくなり、特に品質によっては高強度コンクリート用骨材として適切ではない粗骨材もあるということは以前から指摘されている¹⁾。また、実際の現場ではコンクリートの圧縮強度や静弾性係数が予想を下回ったことへのクレームや不具合の発生により、その原因の追究を求められることもある。それらの原因の一つには、粗骨材品質によるものも考えられるが、粗骨材品質が及ぼす影響自体は粗骨材量や最大寸法の影響より小さいことから、あまり重要視されていない感がある。

粗骨材品質とコンクリートの力学的性質の関係が明らかになれば、そのような原因追求の糸口になるし、施工前に大まかにコンクリートの力学的性質の予測ができれば、トラブルも少なくなると考えられる。また、一般には粗骨材母岩の静弾性係数がコンクリートの静弾性係数に影響する要因とされているが、それを測定するには結構な手間が必要となる。そこで、粗骨材の品質から大まかにコンクリートの静弾性係数を予測することができれば、有益であると考えた。ただし、それらについては検討例がないわ

けではなく、2相モデルを使った検討をはじめとして、海外においてもコンクリートの静弾性係数が影響を受ける粗骨材物性について、いくつかの検討例がある。それらによると、骨材の剛性やペーストと骨材の相互作用の2つが大きな要因になっていることがわかる²⁾。

そこで、著者らはコンクリートの静弾性係数への影響について、粗骨材品質として物理的性質に着目し、それらと高強度コンクリートの静弾性係数の関係について、複数の粗骨材を使用することで調べることを試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験は、高強度コンクリートを想定したシリーズIと高流動コンクリートを想定したシリーズIIに分けて実施した。

(1) シリーズI（高強度コンクリート）

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ ）、細骨材は海砂（密度 2.56g/cm^3 、粗粒率2.74）、粗骨材は表-1に示すa~iの9種類（G.max=20mm）を使用した。なお、減水剤はポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を使用した。

*1 関西大学 工学部都市環境工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 関西大学 工学部都市環境工学科

表－1 使用した粗骨材の物理的性質

記号	岩種	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	400kN破砕値 (%)	粒形判定実績率 (%)	母岩圧縮強度 (N/mm ²)	母岩静弾性係数 (kN/mm ²)
a	安山岩	2.71	0.76	11.8	13	57.8	240	62.1
b	結晶片岩	2.80	0.62	17.6	19	55.4	—	—
c	閃緑岩	2.73	0.61	12.8	15	57.5	—	—
d	ひん岩	2.78	0.46	11.4	12	56.8	—	—
e	硬質砂岩	2.73	0.46	12.0	14	56.5	202	80.5
f	硬質砂岩	2.69	0.78	13.0	17	58.5	225	56.0
g	硬質砂岩	2.73	0.36	10.2	13	61.1	—	—
h	石英斑岩	2.72	0.50	11.6	14	58.2	247	72.6
i	硬質砂岩	2.73	0.56	10.7	17	58.8	—	—
j	安山岩	2.73	0.72	10.0	9	57.1	153	69.6
k	結晶片岩	2.81	0.52	15.7	13	59.4	201	72.5
l	角閃岩	2.73	1.00	21.6	17	59.0	—	—
m	軽量骨材	1.46	12.6	36.5	36	55.0	—	—
n	硬質砂岩	2.73	0.35	12.4	12	56.8	—	—

(2) シリーズⅡ (高流動コンクリート)

セメントは、普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³, 比表面積 3,300cm²/g), 細骨材は海砂 (密度 2.58g/cm³, 粗粒率 3.08), 粗骨材は表－1 に示す i～n の 6 種類 (G_{max}=20mm) を使用した。なお、混和材として高炉スラグ微粉末 (密度 2.90g/cm³, 比表面積 6,070cm²/g) をセメント量に対して置換率 50% で使用し、減水剤は減水剤 1 (ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤) あるいは減水剤 2 (リグニンスルホン酸系 AE 減水剤) を使用した。

なお、表－1 の物理的性質は JIS や BS 812 に準拠して測定されたもので、表中の “m” 軽量骨材は、膨張頁岩を原料とした人工軽量骨材であり、400kN 破砕値等が大きいことから強固でない砕石の代替として検討するために使用した。シリーズによって使用する粗骨材が異なるのは、実験の実施時期が異なり、骨材の入手条件により入手の可否が異なったためである。また、砕

石の母岩圧縮強度及び静弾性係数は、破砕前の岩石から φ2.5×5cm のコアを複数本採取して、測定した値である。

2.2 コンクリートの配合及び供試体作製方法

(1) シリーズⅠ (高強度コンクリート)

コンクリートの基本となる配合は表－2 に示すように、W/C=28%, 目標スランプは 8cm, 目標空気量は 4% とし、混和剤の使用量はセメント質量の 1.5% とした。各配合とも粗骨材種類による違いを明確にするため、粗骨材以外の単位量は一定としモルタルの配合を一定とした。

コンクリートの練混ぜは、強制練りミキサを使用し 3 分間行った。練り上がり後、スランプ、空気量を測定し型枠内に打設し、突き棒で締め固めた。静弾性係数測定用供試体は φ10×20cm の円柱とし粗骨材種類ごとに 3 体ずつ作製した。

(2) シリーズⅡ (高流動コンクリート)

普通強度コンクリートとの比較も考慮して、表－2 に示す W/B=28% と 50% の 2 種類の配合

表－2 各シリーズにおける基本となるコンクリートの配合

シリーズ	W/B (%)	s/a (%)	単位粗骨材容積 (l/m ³)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材	混和剤
I	28.0	38.0	384	160	571	—	602	1040	8.56
II	28.0	45.8	330	170	304	304	720	900	6.08
	50.0	50.6		170	170	170	871	900	850ml

で供試体を作製した。各配合ともシリーズ I と同様にモルタルの配合を一定とした。また、目標スランプフローあるいはスランプ及び空気量は W/B=28% の場合で 650mm 及び 2%, W/B=50% の場合で 8cm 及び 5% とした。なお、混和剤は W/B=28% の場合、減水剤 1 を結合材質量の 1%, W/B=50% については減水剤 2 を結合材質量 100kg あたり 250ml とした。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを使用し 3 分間行った。練り上がり後、スランプフローまたはスランプ、空気量を測定し円柱供試体用型枠内へ打設し突き棒で締め固めた。静弾性係数測定用供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱とし粗骨材種類ごとに 3 体ずつ作製した。

供試体の養生は、いずれのシリーズについても脱型までは湿潤養生とし、材齢 1 日で脱型した後は試験材齢まで水温 20°C の水中養生を行った。なお、供試体端面を平滑にするために、試験直前に研磨機により研磨仕上げを行った。

2.3 静弾性係数の測定

材齢 7, 28 日時点で JIS A 1149 にしたがって耐圧試験機を使用して、同条件の供試体 3 本に対して耐破壊型コンプレッソメータ（検長：100mm）を用いて供試体の縦ひずみを測定し、その結果より静弾性係数を求めた。なお、シリーズ II においてはモルタルの静弾性係数を測定するために、コンクリートをウェットスクリーニングして作製した $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体

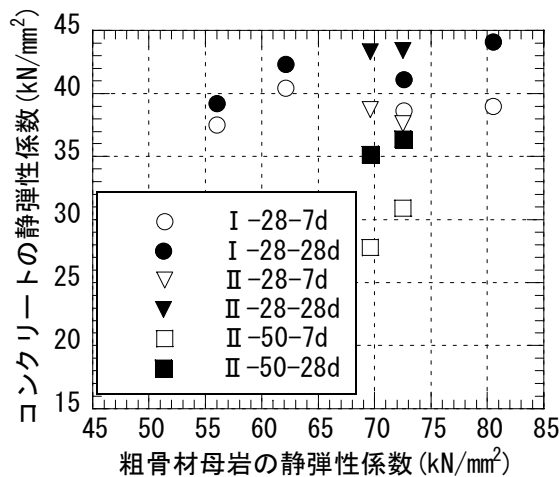


図-1 粗骨材母岩の静弾性係数とコンクリートの静弾性係数の関係

にひずみゲージを貼付して、コンクリート供試体と同様の方法で測定を行った。

3. 実験結果及び考察

作製したコンクリート供試体の圧縮強度は、シリーズ I の 28 日で 75~90N/mm² 程度、シリーズ II の W/B=28% の 28 日で 62~86 N/mm² 程度、W/B=50% で 41~48 N/mm² 程度であった。

3.1 粗骨材母岩の静弾性係数の影響

図-1 は実験に使用した粗骨材の母岩の静弾性係数とそれを用いて作製したコンクリートの静弾性係数の関係を示すものである。凡例中の記号は、シリーズ-W/B(%)-材齢を示すものであり、本実験に使用したわずかな数の粗骨材に関するデータではあるが、シリーズあるいは配合ごとに傾向を見ていくと、28 日材齢においては一般的に言われているように粗骨材母岩の静弾性係数が大きくなるにつれて、コンクリートの静弾性係数も大きくなっていることがわかる。

3.2 粗骨材の物理的性質とコンクリートの静弾性係数との関係

表-1 に示した粗骨材の物理的性質とコンクリートの静弾性係数との関係を調べた結果、粗骨材の吸水率やすりへり減量、400kN 破砕値とコンクリートの静弾性係数との間に、ある一定の傾向が見られた。そのうち、特に顕著であったコンクリートの静弾性係数と吸水率との関係を図-2 及び 3 に、すりへり減量との関係を図

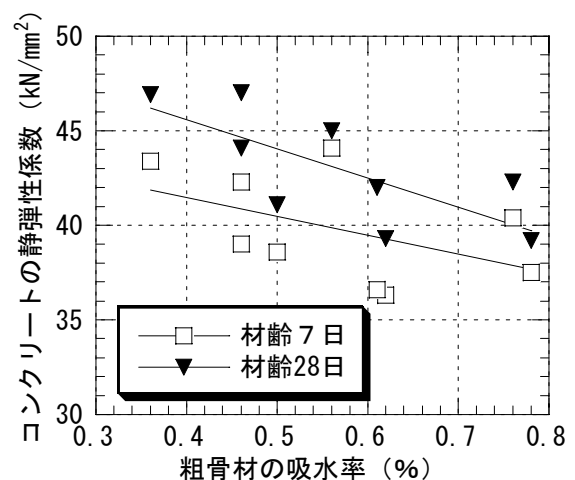


図-2 粗骨材の吸水率とコンクリートの静弾性係数との関係 (シリーズ I)

ー4及び5, 6に示す。図中では, シリーズ I は各骨材 3 本ずつの平均値を, シリーズ II は各骨材 3 本ずつの値をプロットし, 図中の線は, 各々の関係を線形回帰した場合の回帰線を示す。

(1) 吸水率との関係

いずれの材齢においても概ね粗骨材の吸水率が大きくなるにつれて, コンクリートの静弾性係数は小さくなる傾向が見える。また, 図-3より高強度領域と普通強度領域との違いは, 普通強度領域の若材齢で若干コンクリートの静弾性係数の低下率が大きい程度で, 粗骨材の吸水率との関係はほぼ同等である。ただし, シリーズ I で使用した軽量骨材の場合, 吸水率が砕石と比較して 10 倍以上であるので, 図-3には示していないが, その値は回帰線を吸水率の大きい領域まで延長して推測した値よりも, かなり大きいものとなった。

(2) すりへり減量との関係

図-4及び5, 6に示すように, 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの静弾性係数との関係についても, 吸水率の場合と同様にすりへり減量が大きくなると, コンクリートの静弾性係数が低下していく傾向がわかる。

また, 図-5及び6においては, ウェットスクリーニングして作製したモルタル供試体から測定したモルタルの静弾性係数を点線で示した。このように, コンクリートの静弾性係数がモル

タルの静弾性係数より大きくなるかどうかの境界領域がいずれの W/B, 材齢においてもすりへり減量が 20~25% 辺りになっているが, この領域

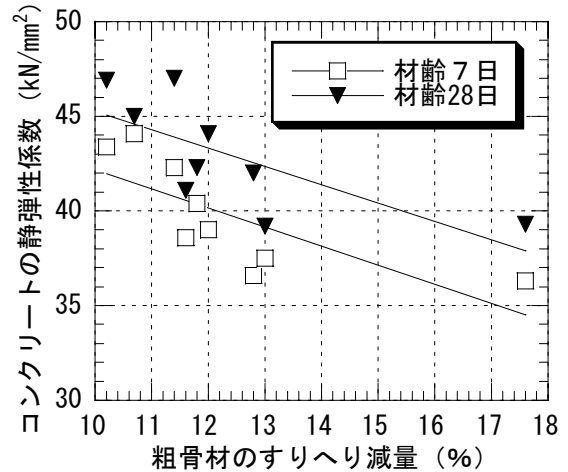


図-4 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの静弾性係数との関係(シリーズ I)

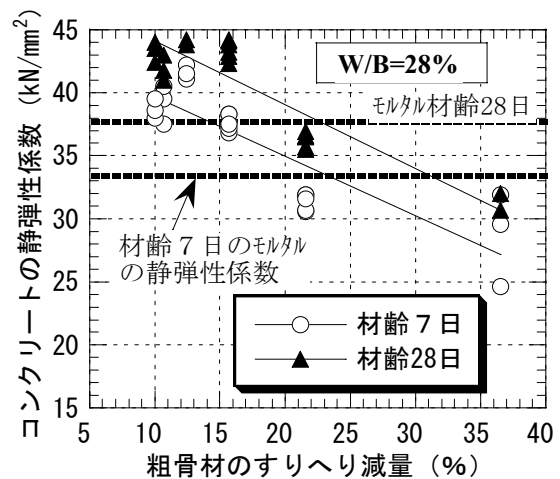


図-5 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの静弾性係数との関係(シリーズ II)

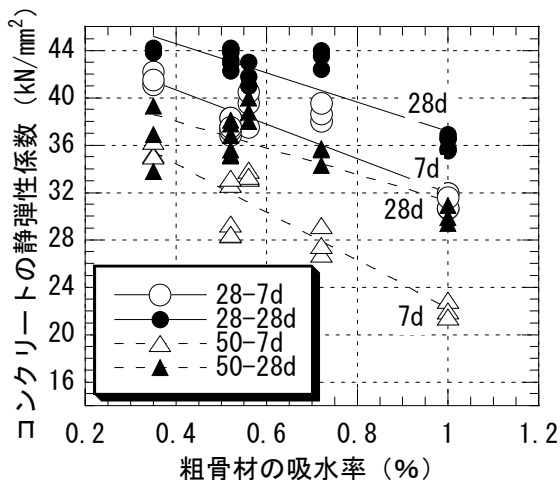


図-3 粗骨材の吸水率とコンクリートの静弾性係数(シリーズ II)

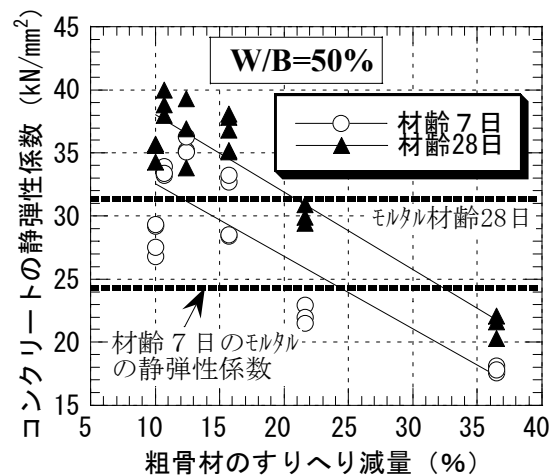


図-6 粗骨材のすりへり減量とコンクリートの静弾性係数との関係(シリーズ II)

表－3 粗骨材の吸水率、すりへり減量及び400kN 破砕値とコンクリートの静弾性係数との関係に関する回帰式及び相関係数一覧

シリーズ	指標となる物性値(x)	粗骨材	材齢	W/B=28%		W/B=50%	
				回帰式	相関係数	回帰式	相関係数
I	吸水率	碎石のみ	7日	$E_c=45.5-9.99x$	0.48	—	—
			28日	$E_c=51.7-15.4x$	0.73*	—	—
	すりへり減量		7日	$E_c=52.2-1.01x$	0.75*	—	—
			28日	$E_c=55.0-0.97x$	0.71*	—	—
	400kN破砕値		7日	$E_c=52.4-0.90x$	0.81*	—	—
			28日	$E_c=55.5-0.84x$	0.66	—	—
II	吸水率	碎石のみ	7日	$E_c=46.4-14.4x$	0.91*	$E_c=42.5-20.3x$	0.92*
			28日	$E_c=49.5-12.3x$	0.89*	$E_c=42.5-11.2x$	0.76*
	すりへり減量	碎石のみ	7日	$E_c=48.1-0.74x$	0.88*	$E_c=39.8-0.69x$	0.62*
			28日	$E_c=50.3-0.58x$	0.80*	$E_c=42.9-0.52x$	0.69*
		全骨材	7日	$E_c=44.4-0.47x$	0.86*	$E_c=38.3-0.57x$	0.83*
			28日	$E_c=49.2-0.51x$	0.90*	$E_c=44.2-0.61x$	0.93*
	400kN破砕値	碎石のみ	7日	$E_c=47.3-0.74x$	0.59*	$E_c=34.3-0.31x$	0.19
			28日	$E_c=52.3-0.78x$	0.71*	$E_c=38.0-0.18x$	0.16
		全骨材	7日	$E_c=42.9-0.42x$	0.73*	$E_c=37.1-0.52x$	0.72*
			28日	$E_c=48.6-0.51x$	0.84*	$E_c=43.4-0.59x$	0.85*

(注1)

「粗骨材」欄の「全骨材」は、軽量骨材も含めた全粗骨材を対象とした場合を示す。

(注2)

「相関係数」に添えられている“*”は相関係数の有意性の検定を行った結果であり、有意水準5%で有意(相関がないとは言えない)であることを示す。

が境界領域となる原因の解明は現時点できていない。一般に使用されている碎石では、この領域のすりへり減量というのは、かなり大きい値に相当し、使用される割合としては少ないものと思われるが、このような原因が解明されれば、すりへり減量とコンクリートの静弾性係数との間にある種の傾向が生ずるメカニズムの解明にもつながるものと考えられるので、今後の課題としたい。

(3) 相関について

粗骨材の物理的性質とコンクリートの静弾性係数との関係について、どの物理的性質がどの程度の明確な関係を持つのかを調べるために、図－2～6に示した回帰式とその相関係数について表－3に一覧にして示す。ここに示した指標は、吸水率、すりへり減量、400kN 破砕値であり、これらが粗骨材の物理的性質のうちで、コンクリートの静弾性係数となんらかの傾向が認められたものである。

まずW/B=28%において碎石だけを使用した場合に注目すると、シリーズIでは400kN 破砕値が、シリーズIIでは吸水率が最も高い相関を示し、次いですりへり減量が高かった。しかし、軽量骨材の場合を含めた全骨材に着目すると、すりへり減量が最も高い相関を示した。吸水率

については軽量骨材を含めた場合、線形回帰することが妥当ではないと考えたため、この表には記載していない。このように、吸水率が碎石のみの場合と軽量骨材を含めた全骨材の場合で相関の高さに大きな違いがある理由は、吸水率は軽量骨材と碎石の違いにより著しい影響を受ける指標であるのに対し、すりへり減量及び400kN 破砕値はそれ程までに影響を受ける指標ではないことによるものであると考えられる。

次にW/B=50%で碎石を使用した場合に注目すると、吸水率が最も高い相関を示し、すりへり減量及び400kN 破砕値は相関が低かった。しかし、軽量骨材も含めた全骨材で考えると、すりへり減量の相関が最も高くなった。特にW/B=28%の高強度領域の場合と異なる点は、すりへり減量や400kN 破砕値の碎石のみの場合の相関が著しく低下していることである。このことより、まず軽量骨材を使用した場合については、W/B=28%、50%のいずれの場合でも軽量骨材の吸水率自体の特殊性が大きな影響を及ぼしており、相関がわかりづらくなっていると思われる。

また、碎石を使用した場合については、W/B=28%と50%ではすりへり減量と400kN 破砕値の相関係数が大きく変化していることから、

粗骨材とモルタルの境界部の影響が反映されていると考えることができる。この影響は骨材自体や骨材表面の強固さを示す、すりへり減量や400kN 破砕値が小さい粗骨材の場合、粗骨材とモルタルの境界部が強固となり、境界部にボンドクラックが発生するのを抑制することに起因するのではないかと考えられる。これについては、吸水率も何らかの影響を及ぼしていることが相関に表れていると考えることができる。W/B=50%では粗骨材の影響が顕著にならないために、粗骨材とモルタルの境界部の影響も大きくないが、高強度領域になると粗骨材の影響が顕著になり、それらの境界部への影響が大きくなった結果、すりへり減量や400kN 破砕値の相関が高くなったと考えられる。この件に関しては、Nevilleもコンクリートの弾性特性に対する、骨材とその周りのセメントペースト間の付着の重要性を示している³⁾。

3.3 母岩の静弾性係数と粗骨材の物理的性質

コンクリートの静弾性係数と相関の高い粗骨材の物理的性質が存在することが明らかになったことから、図-1のように従来からコンクリートの静弾性係数と相関が高いと言われている粗骨材母岩の静弾性係数と密接な関係にある粗骨材の物理的性質があるのではないかと考えた。そこで、粗骨材の物理的性質と母岩の静弾性係数との関係を調べてみた。その結果の一例として、図-7に粗骨材のすりへり減量及び400kN

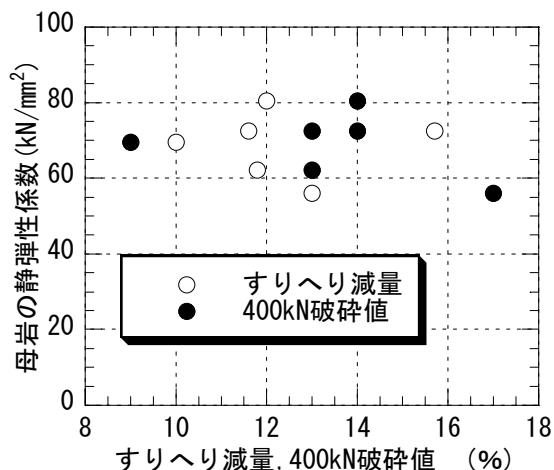


図-7 粗骨材のすりへり減量及び400kN 破砕値と母岩の静弾性係数との関係

破砕値と母岩の静弾性係数との関係を示す。特に相関が高い物理的性質はなく、すりへり減量や400kN 破砕値でもデータが少ないこともあるが、図のように明確な傾向は得られなかった。したがって、すりへり減量が母岩の静弾性係数と密接な関係を持つわけではなく、モルタルとの境界面の性状に影響を及ぼすことが高強度コンクリートの静弾性係数への影響として表れることが推測される。

4. 結論

粗骨材の物理的性質のうち吸水率やすりへり減量、400kN 破砕値が高強度コンクリートの静弾性係数と相関の高い関係にあることがわかった。それは、すりへり減量が母岩の静弾性係数と同様の特性を示す物理的性質であるわけではなく、モルタルと粗骨材の境界面に影響を及ぼすことから、コンクリートの静弾性係数との間に相関性を表したものと考えられる。ただし、影響の程度は粗骨材母岩の静弾性係数がコンクリートの静弾性係数に及ぼす影響ほどではないと考えられ、その程度やメカニズムについては今後の検討が必要である。

本検討の範囲ではすりへり減量の大きい粗骨材を使用するほどコンクリートの静弾性係数は低下し、すりへり減量が1%増大すれば材齢28日時点のコンクリートの静弾性係数の低下は1kN/mm²程度であった。特にすりへり減量は高強度領域では粗骨材種類によらず、高い相関を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 例えば、飛坂基夫：高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響、セメント・コンクリート, No.394, pp.30-33, 1979
- 2) 鶴田浩章：高強度コンクリートの圧縮強度・静弾性係数に及ぼす粗骨材物性の影響に関する最近の研究、コンクリート工学, Vol.43, No.2, pp.76-83, 2005.2
- 3) Adam M. Neville: Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete, ACI Materials Journal, V.94, No.1, pp.71-74, 1997.1