論文　粗骨材の静弾性係数が超高強度コンクリートに及ぼす影響に関する基礎的研究

高木　亮一[*1]・肥後　康秀[*2]・吉本　稔[*3]

要旨：粗骨材の静弾性係数が超高強度コンクリートに及ぼす影響を明らかにすることを目的に，これらに関する基礎的研究を行った。その結果，粗骨材の絶乾密度および細孔容積と静弾性係数の間に強い相関関係を確認し，絶乾密度と総細孔容積から間接的に骨材の静弾性係数が把握できると考えられた。超高強度コンクリートにおいて，静弾性係数が低い粗骨材を使用した場合，コンクリートの静弾性係数は低く，圧縮強度は高かった。また，圧縮強度試験時における破壊時の最終ひずみが大きく，高応力下での接線弾性係数の値は小さかったことから，粗骨材の静弾性係数は高応力下でのコンクリートの挙動に影響を及ぼすと考えられた。
キーワード：粗骨材，静弾性係数，超高強度コンクリート，圧縮強度，空隙構造，細孔容積

1. はじめに

近年，都市部を中心に RC 構造物の超高層化や長スパン化が進んできている。これに伴い超高強度コンクリートの実用化が進み，その需要は増してきている。このような超高強度コンクリートは，所要の圧縮強度を確保するために極めて低い水セメント比の調合で施工しなくてはならない。そこで最近では，シリカフューム等の微粉末混和材を使用したセメントの開発がなされ，極めて低い水セメント比で設計基準強度 100～120N/mm^2 を超えるコンクリートの製造が可能となってきている [1)]。この他に材料面では，粗骨材の品質が注目されてきている。骨材は一般的なコンクリートでは約 7～8 割程度の体積を占め，所用のスランプを得るための単位水量，単位容積質量，強度，耐久性などコンクリートの品質に及ぼす影響が大きい材料である。これまで骨材が超高強度コンクリートへ及ぼす影響についても数多くの研究がなされ，高強度コンクリートでは粗骨材以外の調合条件が同じ場合でも，粗骨材の違いがコンクリートの圧縮強度に大きく影響することや，粗骨材が硬化後の力学特性に及ぼす影響はセメントペーストの圧縮強度が高くなるほど顕著になること [2)] などが指摘されている。そのため、一般のコンクリートに使用されている粗骨材の規格値（JIS A 5005：コンクリート用砕石及び砕砂）を満足するだけでは超高強度コンクリート用骨材としての品質を確保することは困難であると考えられ，骨材に要求される性能は高まってきている。このような背景から，最近では超高強度コンクリートに適した粗骨材の選定方法の提案 [3)] もなされている。

超高強度コンクリート構造物の設計の際には，構造体の変形性能，剛性を評価する重要な因子である静弾性係数を把握することは必要不可欠である。この静弾性係数を把握するための推定式が高強度コンクリート施工指針（案）・同解説 [4)] で定められている。この推定式では，使用する粗骨材の岩種によって定数を定めているが，粗骨材の物性がコンクリートの静弾性係数に及ぼす影響については言及されていない。コンクリートの静弾性係数に影響を及ぼす骨材物性としては粗骨材の静弾性係数が考えられている [5)]。著者らはこの検討を，圧縮強度が 50N/mm^2 程度までの普通強度のコンクリートにおいて実施し，石灰石粗骨材を使用した場合，コンクリートの静弾性係数が高くなることを確認しており，これは石灰石骨材自体の静弾性係数が高いことが要因であるとの考察を示している [6)]。同様の傾向は超高強度コンクリートにおいても得られると考えられる。そこで本研究では，粗骨材の静弾性係数に着目し，その物性が超高強度コンクリートに及ぼす影響を明らかにすることを目的に，これらに関する基礎的研究を行った。

2. 実験概要

本研究では二つのシリーズに分けて試験を行った。シリーズⅠでは，骨材としての物性を把握するために，原岩を用いた圧縮強度および静弾性係数試験，水銀圧入法による細孔径分布測定を行った。立松らは，骨材の水銀圧入法による細孔径分布測定を実施しており，岩種によって細孔容積に差が生じていたことを確認している [7)]。そのため，骨材の空隙構造が骨材の静弾性係数に大きく影響すると考え，それらの関係について検討した。シリーズⅡではシリーズⅠで測定を行った骨材を使用してコンクリートの各種物性試験を行い、骨材物性がコンクリートへ及ぼす影響について検討した。

*1 太平洋セメント㈱中央研究所技術企画部建設・資源材料チーム　工修　(正会員)
*2 太平洋セメント㈱中央研究所技術企画部建設・資源材料チーム
*3 太平洋セメント㈱中央研究所技術企画部建設・資源材料チームリーダー　工修　(正会員)

表－1　粗骨材の物理的性質および化学成分

記号	岩種	物理的性質						化学成分（%）			
		密度(g/cm^3)		吸水率（%）	粗粒率	実積率（%）	単位容積質量(kg/L)	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3
		表乾	絶乾								
A1	安山岩	2.62	2.56	2.67	6.70	60.6	1.55	17.8	53.5	8.67	8.38
A2		2.68	2.63	1.96	6.69	59.7	1.57	16.8	59.9	7.62	7.67
S1	硬質砂岩	2.65	2.63	0.96	6.50	61.3	1.61	12.9	63.9	3.10	3.57
S2		2.66	2.64	0.46	6.66	60.1	1.59	12.4	67.3	2.85	3.37
L	石灰石	2.69	2.68	0.54	6.70	60.6	1.63	0.20	1.00	53.0	0.20

表－2　コンクリートの調合およびフレッシュ性状試験結果

粗骨材種類	W/C (%)	S/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	スランプ（cm）		空気量（%）		単位量(kg/m^3)				
				目標	結果	目標	結果	W	SFPC	S	G	SP
A1	13	29.3	0.53	70±7.5	72.5×71.5	2.0以下	1.6	150	1154	368	822	20.8
A2		29.3			75.5×72.0		2.0			348	864	
S1		28.6			73.0×71.0		1.8			340	853	
S2		28.8			73.0×73.0		1.3			343	853	
L		30.0			74.5×73.0		1.5			357	843	

2.1 シリーズⅠ（骨材）

（1）使用材料

表－1 に使用した粗骨材の物理的性質および化学成分を示す。使用した粗骨材は，安山岩 2 種（記号：A1，A2，構成鉱物：輝石，長石，石英），硬質砂岩 2 種（記号：S1，S2，構成鉱物：長石，雲母，石英，粘土鉱物），石灰石 1 種（記号：L，構成鉱物：方解石）を用いた。

（2）圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験は岩の試験・調査方法の基準 [8]「岩石の一軸圧縮試験方法」 に準拠して行い，既往の文献 [6] での静弾性係数の評価を参考にし，骨材の静弾性係数は最大荷重の 1/3 と原点を結んだ直線の傾きより求めた。供試体は一種類の原石からコアを採取し，ダイヤモンドカッターで切断し成形した。供試体寸法はφ32×64mm とし，供試体寸法の影響を少なくするために，高さ直径比を 2.00±0.05 とした。供試体数は 3～6 体とし，A2 については採取場所の異なる原石を二種類用いて試験を行った。L の原石は圧縮強度に及ぼす影響が顕著である層が存在していたため，圧縮強度が本来より小さな値の評価となってしまったと考えられる。この層の影響については考察にて詳細を述べる。

（3）水銀圧入法による細孔径分布測定

細孔径分布の測定試料は、骨材を数ｍｍ角にしたものを用いており，乾燥機および D-dry にて十分に水分を除去した後に試験を行った。空隙径の測定範囲は，0.003～30μm とした。

2.2. シリーズⅡ（コンクリート）

（1）使用材料

試験に使用した材料は，シリカフューム混合セメント（記号：SFPC），細骨材（砕砂，表乾密度：2.62g/cm^3，吸水率：3.02%，粗粒率：2.58，記号：S），粗骨材（A1，A2，S1，S2，L），高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系，記号：SP），空気量調整剤（消泡剤）である。

表－3　骨材の圧縮強度および静弾性係数試験結果

記号	供試体数	圧縮強度 (N/mm^2)	変動係数 Cv(%)	静弾性係数 (kN/mm^2)	変動係数 Cv(%)
A1	6	189	11.6	42.7	5.0
A2①	6	196	10.3	56.7	7.2
A2②	6	130	13.6	54.3	5.9
S1	6	196	16.4	68.6	3.2
S2	6	237	14.2	71.0	2.2
L	3	19.5	4.7	78.1	7.0

（2）コンクリート調合

表－2 にコンクリートの調合およびフレッシュ性状試験結果を示す。コンクリートの調合は W/C＝13%とし，単位粗骨材かさ容積および高性能 AE 減水剤添加量を一定とし，目標スランプフロー70±7.5cm，目標空気量 2.0%以下となるように設定し，これらの試験結果はすべて目標の範囲内に収まった。練混ぜは水平二軸形強制練りミキサを使用し，セメント，細骨材を投入し 30 秒，水および混和剤を投入し 240 秒，その後粗骨材を投入し 90 秒間行った。養生は標準水中養生とした。

（3）試験方法：圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度試験は JIS A 1108 に，静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠して行った。圧縮強度試験の試験材齢は 7 および 28 日，静弾性係数試験は 28 日とした。

3. 試験結果および考察

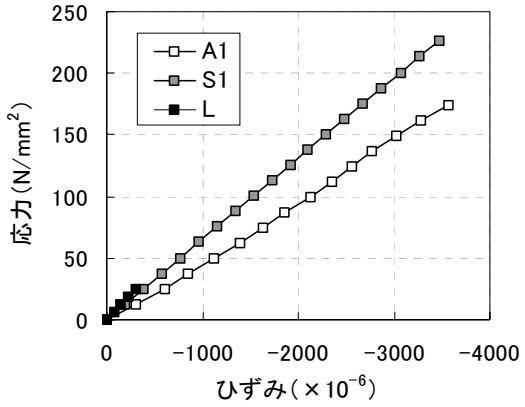
3.1 シリーズⅠ（骨材）

本稿では，骨材の岩種による考察を示しているが，これは岩種全体の傾向を示したものではなく，今回使用した骨材に限定したものである。

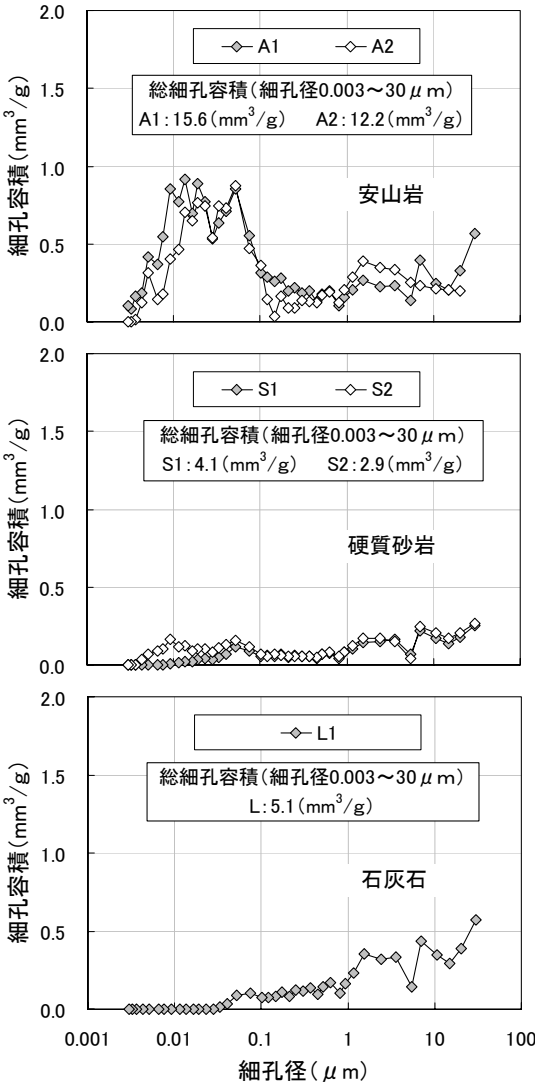
(1) 圧縮強度および静弾性係数試験

表－3 に骨材の圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。圧縮強度は，A1 が 189N/mm^2，A2①が 196N/mm^2，A2②が 130N/mm^2，S1 が 196N/mm^2，S2 が 237N/mm^2，L が 19.5N/mm^2 であった。変動係数は最大で 15%程度に達した。これは岩石中には様々な大きさのクラックが存在し，その中の最も弱い部分によって供試体の強度が決定することが指摘されており [9]，この偏在するクラックが原因となり圧縮強度にバラつきが生じ，変動係数が若干大きくなったためと考えられる。A2①と A2②は産地，採取時期が同じにもかかわらず，原石の採取場所によって圧縮強度が異なった。これは，前述したクラックや砕石場で発破時に衝撃が加わりクラックが進展した影響が圧縮強度の差として表れたといった可能性も考えられる。L に関しては，他の骨材と比較して圧縮強度が非常に小さな値となった。これは，石灰石の主な構成鉱物である方解石の大きな結晶が介在し，方解石の有する劈開性が表れたためであると考えられる。また著者らは，堆積岩である石灰石の層の堆積している方向がコア供試体の圧縮強度に影響を及ぼすとの考察を示しており [6]，今回の試験ではこの層の影響による圧縮強度が低下する傾向が顕著に表れたこともその要因であると考えられる。この石灰石の破壊形状を観察すると斜めに存在する層に沿って破壊していることが確認でるが，同じ堆積岩である硬質砂岩の破壊形状は層に沿った破壊でなく，円錐状の断片が周辺の破片とともに残る楔形の破断面であった。このことから，層の堆積している方向が圧縮強度へ影響を及ぼす傾向は石灰石に表れやすいと考えられる。この層の影響が粗骨材レベルでも強度特性に影響を及ぼすことが懸念される。しかし，粗骨材はコア供試体に比べて寸法が小さいことや製造過程で原石を破砕および整粒粉砕する際には，層から破壊されていき粗骨材中には層が存在することは少なく，粗骨材レベルでは層の影響が現れにくいと考えられる。以上のことから，コア供試体での圧縮強度の評価は，層の影響を大きく受けてしまうことや同一産地であっても採取する原石によって差が生じる可能性があり，必ずしも正確な評価が得られない可能性があると考えられる。

図－1 に骨材の圧縮強度試験時の応力－ひずみの関係を示す。応力－ひずみの関係はほぼ直線の関係であり，この傾向は破壊荷重に達するまで保たれており，弾性的な挙動を示していた。骨材の静弾性係数は A1 が 42.7kN/mm^2，A2①が 56.7kN/mm^2，A2②が 54.3kN/mm^2，S1 が 68.6kN/mm^2，S2 が 71.0kN/mm^2，L が 78.1kN/mm^2 であった。変動係数はすべて 10%以下であり，圧縮強度よりもばらつきは小さい結果であった。同じ産地である A2①と A2②では原石の違いによる静弾性係数への影響



図－1　骨材の応力－ひずみの関係



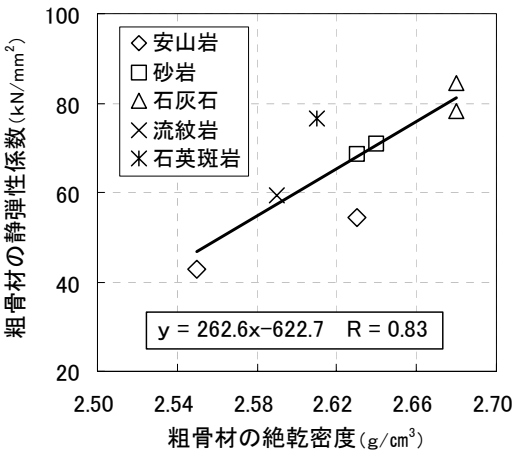
図－2　粗骨材の総細孔径分布

は少なく，ほぼ同等の値であったことから，骨材の静弾性係数に対してはクラックが及ぼす影響は少ないと考えられる。L に関しては，圧縮強度が非常に小さかったが，他の岩種と同様に応力－ひずみの関係は破壊に至るまでほぼ直線の関係であったことや，既往の研究とほぼ同等の値であったことから，L の静弾性係数は正確な評価ができたと考えられる。骨材の静弾性係数を岩種ごとに比較すると，石灰石が最も高く，次いで硬質砂岩，安山岩の順であった。A1 と A2①では圧縮強度がほぼ同等であったが，A2 の方が静弾性係数は 10kN/mm^2 程度高い値であった。一般的に，圧縮強度が高くなれば静弾性係数も高くなることが知られているが，今回使用した試料ではこのような関係が認められなかった。

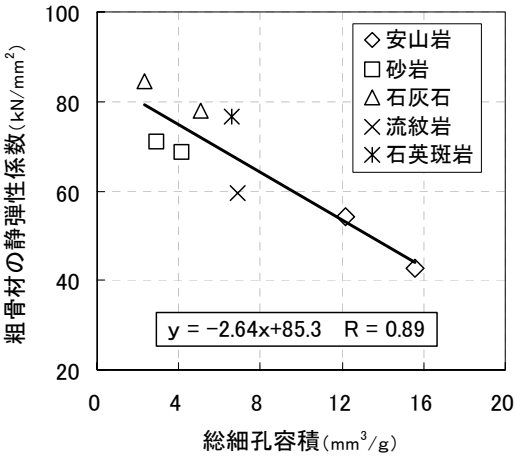
（2）水銀圧入法による細孔径分布測定

図－２に粗骨材の細孔径分布を示す。総細孔容積（0.003～30μm の範囲）は，A1 が 15. 6mm^3/g，A2 が 12. 2mm^3/g，S1 が 4.1mm^3/g，S2 が 2.9mm^3/g， L が 5. 1mm^3/g であり，A1，A2 が S1，S2，L に比べ 4 倍程度多かった。A1, A2 は径の範囲が 0.01～0.1μm における頻度が高く，S1，S2，L は全体的に頻度の高い径の範囲は無かった。このように安山岩は他の骨材と比較して細孔容積が多くポーラスな構造であることが確認され，このことは A1, A2 の吸水率が高いことや密度が比較的低いことと関係していると考えられる。細孔径分布を岩種ごとに比較すると，その分布傾向は岩種ごとに同様であった。これは，岩石の成因に起因していると考えられる。安山岩は岩石学的には火成岩の中の火山岩に分類され，地球内部のマグマ（溶融した岩石）が地表近くで急激に冷却固結して生成されたものであり [10]，その過程において水蒸気や空気が巻き込まれやすく細孔容積が他の骨材と比較すると多くなったと考えられる。一方，硬質砂岩や石灰石は堆積岩に分類され，堆積初期には未固結である堆積物が続成作用により生成されたものである [10]。この続成作用とは堆積物が圧密され，鉱物同士が膠着し密な状態が形成されることであり，この作用により空隙が減少し，安山岩と比較すると細孔容積が少なくなったと考えられる。

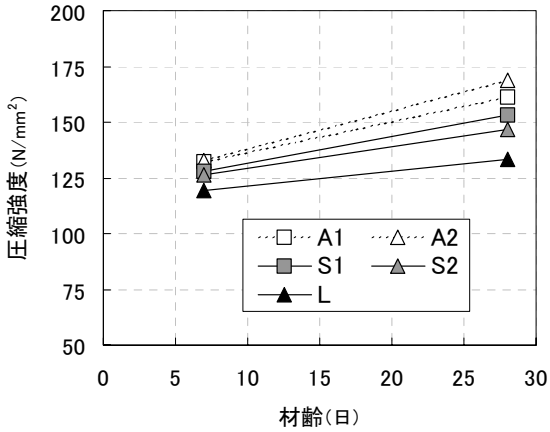
図－３に粗骨材の絶乾密度と静弾性係数の関係を，**図－４**に粗骨材の細孔容積と静弾性係数の関係を示す。これらの図には本実験のコンクリート試験で用いた 5 種類の骨材に加えて石灰石，流紋岩，石英斑岩の 3 種類についても併せてプロットした。なお，A2 の静弾性係数は A①と A②の平均値を用いた。渡邉らは，骨材の静弾性係数と粗骨材の各物性の相関関係を模索した結果，粗骨材の絶乾密度のみ比較的高い相関があることを確認している [11]。本実験で試験を行った粗骨材においても，両者には正の相関関係（相関係数：0.83）が確認できた。



図－3　粗骨材の絶乾密度と静弾性係数の関係



図－4　粗骨材の細孔容積と静弾性係数の関係



図－5　コンクリートの圧縮強度

同様に，細孔容積と静弾性係数の関係についても検討を行った結果，負の相関関係（相関係数：0.89）が確認できた。粗骨材の静弾性係数と細孔容積の関係は，絶乾密度よりも強い相関関係を示していた。細孔容積が静弾性係数に影響を及ぼす要因としては，骨材を構成している鉱物と鉱物の間に空隙が，その変形性能に影響し，静弾性係数が変化すると考えられる。以上の試験結果から，

絶乾密度および細孔容積と静弾性係数の間に強い相関関係を確認した。したがって，絶乾密度と総細孔容積から間接的に骨材の静弾性係数が把握できると考えられる。

3.2 シリーズⅡ（コンクリート）

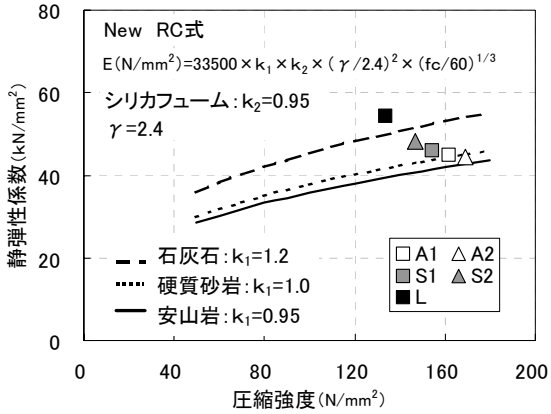
（1）圧縮強度

図－5 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。材齢 7 日では粗骨材の違いによる圧縮強度の差は 10N/mm^2 程度であるが，材齢 28 日ではその差が最大で約 30N/mm^2 程度に達しており，粗骨材の違いによる圧縮強度への影響が顕著に表れた。これは，セメントペーストの圧縮強度が高くなるほど粗骨材が力学特性に及ぼす影響が顕著になる [2] とした真野らの指摘と同様の傾向であった。岩種別に比較すると，安山岩が最も高く，次いで硬質砂岩，石灰石の順であった。圧縮強度の最も高かった安山岩は，A1，A2 ともに他の骨材と比較して吸水率が高く，A1 は密度が低い骨材であった。このような低密度，高吸水率の骨材は堅硬で無い場合があり，骨材として用いた場合コンクリートの圧縮強度が低くなる傾向にあるとされている [12] が，本実験ではこのような結果にはならなかった。これは，A1，A2 ともに低密度，高吸水率であるが，**表－3** に示したように骨材自体が十分堅硬であったためであると考えられる。

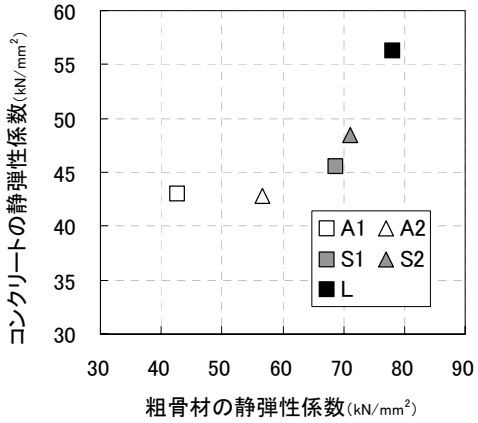
（2）静弾性係数

図－6 にコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお，材齢 28 日の試験結果と併せて，高強度コンクリートの静弾性係数の予測式である New RC 式 [4] を図中に記載した。この式には，使用骨材により定まる定数（k_1）と混和材料により定まる定数（k_2）があり，それらの値（k_1：安山岩=0.95，硬質砂岩=1.0，石灰石=1.2，k_2：シリカフューム=0.95）を代入し求めた。本実験で得られたコンクリートの静弾性係数は，New RC 式より若干高い値を示し，岩種別に考えると安山岩が最も小さく，次いで硬質砂岩，石灰石の順であった。また，コンクリートの静弾性係数が小さいほど圧縮強度は高くなる傾向にあった。

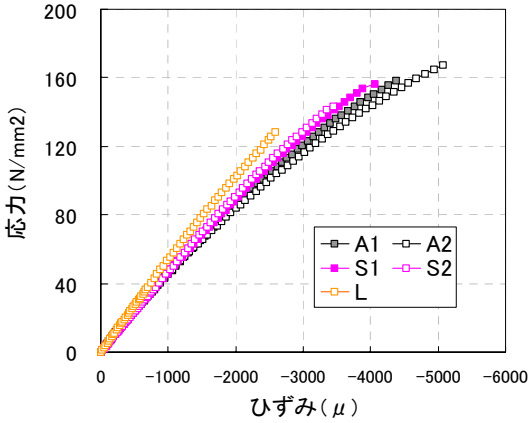
図－7 に粗骨材の静弾性係数とコンクリートの静弾性係数の関係を示す。なお，コンクリートの静弾性係数は同じ強度レベルでの評価が必要であると考え， New RC 式中の fc に実測値と 150N/mm^2 を代入し Ec を求め，その差を実測した静弾性係数に加える補正を行った。この図より，骨材の静弾性係数が低くなるほど，コンクリートの静弾性係数は低くなり，粗骨材の静弾性係数がコンクリートの静弾性係数に影響を及ぼしていたことがわかる。コンクリートの静弾性係数に及ぼす要因としては，骨材自体の静弾性係数および骨材とペーストとの付着性状が挙げられている [5]。後者の要因に関して，著者ら



図－6　コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係



図－7　粗骨材の静弾性係数とコンクリートの静弾性係数の関係



図－8　コンクリートの応力－ひずみの関係

は既報において，Hashin-Hansen モデルを用い，石灰石粗骨材を用いたコンクリートでは安山岩に比べ骨材とペーストとの付着性状が良いとの考察を示しているが，更なる検討が必要と考えている。そこで，コンクリートの静弾性係数に及ぼす骨材とペーストとの付着性状について，圧縮試験時におけるコンクリートの応力－ひずみに着目し検討を行った。

図－8 に圧縮強度試験時におけるコンクリートの応力

ーひずみの関係を示す。圧縮試験の破壊時に得られる最終ひずみは，A2 が最も大きく，次いで A1，S1，S2，L の順であった。このひずみは，使用した粗骨材の静弾性係数が低いほど大きかった。また，高応力下での接線弾性係数の値は小さく，塑性域が長かった。以上のことから，粗骨材の静弾性係数は高応力下でのコンクリートの挙動に影響を及ぼすと考えられる。L は他の水準と比較して，破壊時のひずみは 1000μ以上小さく，塑性ひずみも小さな状態，ほぼ弾性領域で破壊した。また，圧縮強度が最も高く破壊時のひずみも大きかった A2 と比較すると，L の破壊時のひずみは約 1/2 程度であった。一般的にコンクリートを構成している骨材とセメントペーストの応力ーひずみ関係はそれぞれがほぼ直線，弾性体であるのに対し，コンクリートでは曲線的な関係を示す。一般的にこれは，骨材界面の存在とその界面に発生するマイクロクラックが原因であると考えられている。石灰石を使用した場合，このマイクロクラックが発生する前に脆性的な破壊に至ったと考えられる。この要因としては，石灰石を使用したコンクリートは，骨材界面で石灰石とセメントペーストとの化学反応によりカルシウムカーボアルミネート水和物が生成し，高密度な界面域が形成されるためである [13] と考えられる。このように石灰石を使用した場合，骨材の静弾性係数が高いことに加え，骨材とセメントペーストとの付着性状が良好であるため，コンクリートの静弾性係数が高くなると考えられる。このように石灰石骨材を使用すると静弾性係数が高く，圧縮強度が 150N/mm^2 近くに達する場合，圧縮強度が低くなることから，超高強度コンクリートの適用範囲が狭いと考えられる。

4. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

(1) 粗骨材の絶乾密度および細孔容積と静弾性係数の間に強い相関関係を確認した。したがって，絶乾密度と総細孔容積から間接的に骨材の静弾性係数が把握できると考えられた。

(2) 比較的吸水率が高く，密度の低い粗骨材を使用した場合でも，骨材が十分堅硬であれば超高強度コンクリートの圧縮強度は低くならないと考えられた。

(3) 超高強度コンクリートにおいて，静弾性係数が低い粗骨材を使用した場合，コンクリートの静弾性係数は低く，圧縮強度は高かった。

(4) 使用した粗骨材の静弾性係数が低いほど圧縮試験の破壊時に得られる最終ひずみが大きく，高応力下での接線弾性係数の値は小さかったことから，粗骨材の静弾性係数は高応力下でのコンクリートの挙動に影響を及ぼすと考えられた。

(5) 石灰石粗骨材を使用した場合，他の粗骨材に比べ骨材自体の静弾性係数が高いことや，セメントペーストとの付着性状が良好になることで，コンクリートの静弾性係数が高くなると考えられた。また，圧縮強度が低くなったことから，他の骨材と比較すると超高強度コンクリートの適用範囲が狭いと考えられた。

参考文献

1) 橋本真幸・谷村充・松本健一：シリカヒュームプレミックスセメントを用いた超高強度コンクリートの基本特性，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.49-50，2006.9

2) 真野孝次・飛坂基夫・川崎三十四・中川雄二：高強度コンクリート用骨材の選定方法に関する一実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.769-770，1991.9

3) 陣内浩ほか：設計基準強度 150N/mm^2 の高強度コンクリートの強度管理手法の検討と品質管理結果，日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.25, pp.7-12, 2007.6

4) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005

5) 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

6) 高木亮一・長塩靖祐・吉本稔・伊與田紀夫：石灰石粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1，pp.81-86，2008

7) 立松和彦ほか：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.1 -6，2001.11

8) 社団法人地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書，2003

9) 疋田貞良・菊地昌博：点載荷試験の実用性に関する一考察，開発土木研究所月報，No.423，pp.30-41，1988

10) 千木良雅弘著：災害地質学入門，近未来社

11) 渡邉悟士・黒岩秀介・陣内浩・並木哲：高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.588，pp.21-27，2005.2

12) 社団法人日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，2007.7

13) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート，2005