

論文 副産物粗骨材の弾性係数がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響

麓 隆行*1・柏木 洸一*2

要旨: 低品質骨材や副産物骨材など多様な骨材をコンクリートに有効に利用するため、本研究では、5種類の粗骨材を用いたコンクリートの圧縮試験での応力-ひずみ関係の変化を調べ、骨材の弾性係数の影響を考察した。その結果、W/Cによらず、弾性領域ではモルタルと粗骨材は一体として挙動し、ペーストの弾性係数より粗骨材の見かけの弾性係数が大きいと、ペーストの臨界応力でコンクリートが破壊し始めること、また粗骨材の見かけの弾性係数が小さいと、ペーストの臨界応力より低い応力でひび割れが連続し、破壊することがわかった。また、粗骨材の絶乾密度により粗骨材の見かけの弾性係数を推定できる可能性を示した。

キーワード: 副産物粗骨材, 圧縮強度, 臨界応力, 弾性係数, コンクリート, モルタル, ペースト

1. はじめに

骨材はコンクリートの体積の約70%を占めている。そのため、骨材の品質は構造物を設計するために必要なコンクリートの強度や変形抵抗性と密接に関係する。

これまで、天然の川砂や岩石を砕いた砕石など良質な骨材が主流であった。しかし、良質な骨材が枯渇し始め、可能な範囲で低品質な骨材も利用していくことが望まれている¹⁾。一方、環境保全への注目が集まり、天然骨材の採取が難しくなるとともに、資源循環型社会を目指すにあたり、低品質な骨材だけでなく他産業から排出された廃棄物も含めて、多様な骨材をコンクリートへと有効に利用することが望まれるようになった²⁾。このような現状から、様々な副産物のコンクリートへの適用性を、硬化後の強度で検討した報告や考察が増加している。しかし、副産物骨材の適用による強度や耐久性の低下についての報告は多いが、その力学的挙動を詳細に検討し、その要因を解明した研究は少ない。

骨材に求められる品質の一つに、強度と変形抵抗性が挙げられる。これまで、これらの品質を密度と吸水率から判定し、適用できる骨材を区分してきた。しかし、低品質骨材や副産物骨材は、各種のスラグ骨材のように十分な強度や変形抵抗性を持つ骨材ばかりではない。低品質な砕石や再生骨材などは、これまでとは異なり、十分な強度や変形抵抗性を持っていない場合もある。そこで、改めて骨材の品質とコンクリートの破壊挙動を考察し、骨材の力学的性質にも配慮したコンクリート用骨材の品質評価を考える必要がある。そこで、本研究では、5種類の粗骨材を用いたコンクリートの圧縮試験を行い、応力-ひずみ関係の変化を調べた。その後、粗骨材の見かけの弾性係数を推定し、応力-ひずみ関係の変化に及ぼす粗骨材の強度や弾性係数の影響を考察した。

2. 実験概要

実験には、普通セメント（密度 3.15 g/cm³, ブレーン値 3420 cm²/g）、および表-1に示す5種類の粗骨材を用いた。副産物粗骨材として再生粗骨材、廃EPS粗骨材および廃タイヤ粗骨材を用いた。また、比較する粗骨材として、高規産砕石、および膨張頁岩系軽量粗骨材を用いた。再生粗骨材は、マンションの解体現場から採取したコンクリートがらをジョークラッシャ、およびコーンクラッシャで破砕し、5 mm以上をふるい分けて粗骨材としたものであり、再生粗骨材 Mクラスの粗骨材である。また、廃EPS粗骨材は、廃プラスチックを減容した後、破砕し、5 mm以上をふるい分けた粗骨材である。そして廃タイヤ粗骨材は、トラック用の廃ゴムタイヤを裁断し、市販されているチップを粗骨材の粒度と同程度となるように混合した粗骨材である。

砕石および川砂を用い、W/C = 35, 50 および 65%でス

表-1 使用した骨材とその品質

種類 (原料)	記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	実積率 (%)
砕石	NC	2.58	1.34	6.35	57.1
再生	RC	2.50	3.07	6.60	57.1
軽量	LC	1.67	31.4	6.06	61.5
廃EPS	EC	0.98	0.00	6.48	52.2
廃タイヤ	TC	1.04	0.00	6.69	49.5

表-2 川砂と砕石を使用した基本配合

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	SP (C×%)	DF (C×%)
35	43.2	177	506	718	939	0.7	1
50	46.2	177	354	827	936	0.85	1
65	48.5	185	285	886	935	0.85	1

SP: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, DF: 消泡剤

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科講師 博(工) (正会員)

*2 近畿大学 大学院総合理工学研究科環境系工学専攻 (正会員)

ランプ 18cm となった表-2 の配合を基本配合とした。他の粗骨材を使用する場合は体積置換とし、細骨材には川砂を用いた。砕石、軽量粗骨材および再生粗骨材は表乾状態で使用したが、廃 EPS 粗骨材および廃タイヤ粗骨材は絶乾状態で使用した。

モルタル先練りとし、容量 10L のプラネタリー方式縦型ミキサでセメントと細骨材を 30 秒、水を加えて 2 分 30 秒練ませたモルタルを、練板上で粗骨材とスコップで混合し、コンクリートを作製した。また比較のため、W/C を 35, 50 および 65% としたペーストおよび W/C, S/C を表-3 と同じとしたモルタルも同ミキサを用いて作製した。なお、W/C = 50% の場合のみ、増粘剤を単位水量の 5% 混入した。

そして $\phi 75 \times 150\text{mm}$ の圧縮供試体を 3 本作製し、翌日脱型後 20 度の室内で水中養生した。材齢 26 日で水中から取り出し、ひずみゲージを貼付けた後、20 度の室内に静置し、材齢 28 日に圧縮試験を行った。0.1mm/min の速度とした変位制御で圧縮試験を行い、載荷時の応力と縦・横ひずみを計測した。

3. 圧縮強度試験に関する基礎考察

3.1 圧縮試験における力学的変形挙動の概要

応力-ひずみ曲線の一例を図-1 に示す。載荷による応力の増大とともに供試体内部の空隙が塞がり、微小ひび割れが発生しはじめ、体積ひずみが減少する。その後、臨界応力に達すると微小ひび割れが連続しはじめ、体積ひずみが増大し、膨張がはじまる。やがてひび割れが網目状に連続し、コンクリートが崩壊する。そのときの臨界応力は、材料の持続荷重に対する実質的な真の強度と考えられている³⁾。本研究では、コンクリートを等方弾性体と仮定し、式(1)から体積ひずみを求めた。その後、図-1 のように、体積ひずみの最大値となる応力値を臨界応力として求めた。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c - 2 \cdot \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 ε_v : 体積ひずみ(μ)、 ε_c : 縦ひずみ(μ)、 ε_t : 横ひずみ(μ)である。

3.2 各種粗骨材を用いたコンクリート性状の比較

図-2 にすべての粗骨材について C/W と圧縮強度との関係を示す。軽量粗骨材を除いて C/W の増加とともに線形的に圧縮強度が増加した。軽量粗骨材では粒子強度が低いため⁴⁾、C/W=2.8 において圧縮強度が頭打ちとなった。再生粗骨材を用いた場合も、同様の傾向が見られた。一方、廃 EPS 粗骨材や廃タイヤ粗骨材では、セメント硬化体より粒子強度が弱いと考えられるが、C/W の増加とともに圧縮強度は増加した。粗骨材の強度が低いことだけがコンクリートの破壊の要因ではないことがわかる。

次に、図-3 に圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。

同じ粗骨材であれば圧縮強度と弾性係数は線形関係にあった。しかし、同じ圧縮強度でも粗骨材の種類によって、静弾性係数の値は異なることがわかる。

また、図-4 に圧縮強度と臨界応力との関係を示す。砕石、再生粗骨材や軽量粗骨材を用いた場合、圧縮強度と臨界応力との比（臨界応力比）は 0.8~1.0 となった。一方、弾性係数が低いと考えられる廃 EPS 粗骨材では 0.46~0.53 と小さな値になった。すなわち、コンクリー

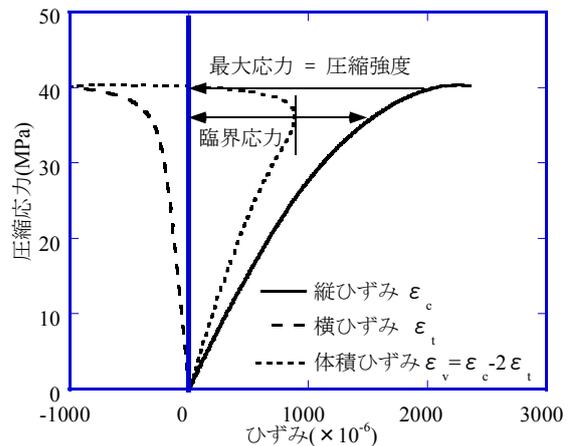


図-1 圧縮試験での応力-ひずみ曲線の一例

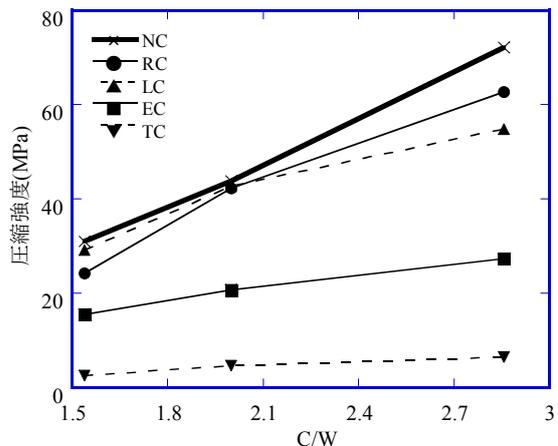


図-2 C/W と圧縮強度との関係

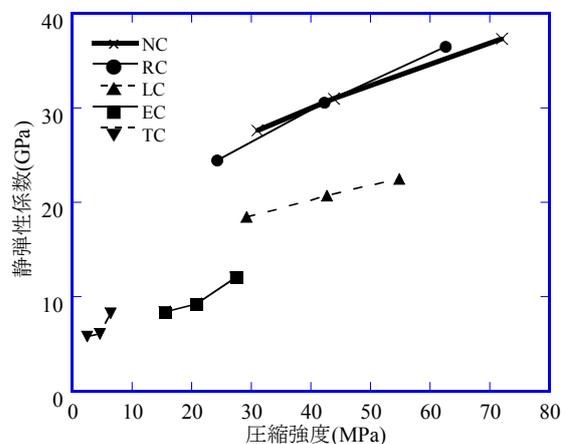


図-3 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係

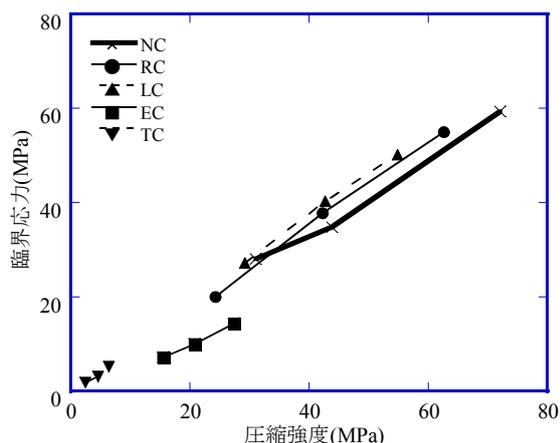


図-4 コンクリートの圧縮強度と臨界応力との関係

ト内のひび割れが連続し始める臨界応力には、粗骨材の強度だけでなく粗骨材の変形抵抗性も影響することが考えられる。

そこで、既往の研究を参考に、粗骨材の見かけの弾性係数を推定し、それがコンクリートの性状に及ぼす影響を4章で検討することとした。

4. 粗骨材の見かけの弾性係数がコンクリート性状に及ぼす影響

4.1 粗骨材の見かけの弾性係数算出方法

一般的にコンクリートは均質な等方性のマトリックス相とその中に分散している粒子相とからなる2相材料と考えられる。その弾性係数は構成相の弾性係数と体積比とで推定できる。Hashin は、図-5のように1つの粒子とその周囲の複合材料との力学的な相互作用として複合モデルを考案し、全体系の性質を算出する式を提案し、それをHansenがコンクリートに適用できるように改良、提案している⁵⁾。このモデルは、圧力を受けている同心球をペーストおよび骨材からなる複合材として考え、その中心に1個の骨材を想定した球を在置し、それと球殻である複合材との力の相互作用を考えるものである。このモデルから算出された式(2)⁵⁾は、コンクリートの弾性係数の予測式として広範囲の物質・配合に精度よく適用できること言われている。本研究ではこのHashin-Hansenの提案した式(2)を用いて骨材の見かけの弾性係数を算出した。

$$E_c = E_m \frac{(1 - V_a)E_m + (1 + V_a)E_a}{(1 + V_a)E_m + (1 - V_a)E_a} \quad (2)$$

ここで、 E_c ：複合体の弾性係数(GPa)、 E_m ：母材の弾性係数(GPa)、 E_a ：骨材の弾性係数(GPa)、 V_a ：骨材の含有率である。

4.2 コンクリート中の粗骨材の見かけの弾性係数

Hashin-Hansen の提案した式(2)に、コンクリートの弾

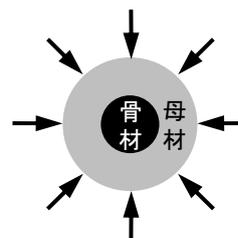


図-5 Hashin-Hansen の複合材料のモデル⁵⁾

表-4 粗骨材の見かけの弾性係数の算定値とモルタル、ペーストの弾性係数の測定結果

		弾性係数(GPa)			
		35	50	65	平均
砕石	NC	55.09	44.45	41.68	47.07
再生骨材	RC	51.59	42.70	27.00	40.43
軽量骨材	LC	13.38	14.79	12.33	13.50
廃 EPS	EC	-2.02	-2.73	-2.66	-2.47
廃タイヤ	TC	-6.15	-6.00	-5.38	-5.85
モルタル		27.30	25.19	23.10	—
ペースト		19.91	10.63	8.05	—

*モルタル、ペーストは円柱供試体を用いた測定値

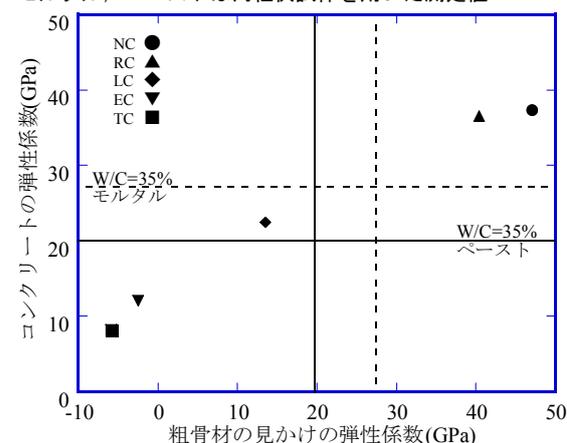


図-6 粗骨材の見かけの弾性係数と W/C = 35%でのコンクリートの弾性係数との関係

性係数と W/C、S/C が同じモルタルの弾性係数の測定結果を代入して、粗骨材の見かけの弾性係数を算出した結果を表-4に示す。

各粗骨材の見かけの弾性係数は、W/C が変化しても、再生粗骨材を除き、ばらつきはあるもののほぼ同じ値を示した。再生粗骨材の場合、W/C = 65%での見かけの弾性係数の算定値が小さい。W/C = 65%の配合は、単位水量が 185kg/m^3 と多い。再生粗骨材を用いた場合、他の骨材に比べて表面が粗いため、ブリーディングが少なくなり、骨材下面で脆弱な層ができたため、コンクリートの圧縮強度や弾性係数が小さいことが原因と考えられる。

また、廃 EPS 粗骨材や廃タイヤ粗骨材を用いた場合、粗骨材の見かけの弾性係数が負の値となった。これは、

モルタルの弾性係数のばらつきも考えられるが、W/Cの影響が見られないことから、粗骨材界面の遷移帯の影響が含まれていないなど、式(2)の算出時の仮定条件からくるズレではないかと考えられる⁹⁾。以上のことから、今回の算定では骨材界面領域での状態から補正をするべきであるが、明確な補正方法がないこと、また同じ骨材を使用すれば、見かけの弾性係数は同じと考えられることから、平均値を同種の骨材の見かけの弾性係数の代表値として以降の考察で用いることとした。

4.3 コンクリート性状と粗骨材の見かけの弾性係数との関係

図-6~8に粗骨材の見かけの弾性係数とW/C=35%のコンクリートの弾性係数、臨界応力および圧縮強度の関係を示す。

コンクリートの弾性係数は、母材となった同じW/Cのモルタルとペーストの弾性係数と比較すると、モルタルやペーストの値に関係なく、粗骨材の見かけの弾性係数が大きいほど、大きくなった。

一方、コンクリートの臨界応力では、いずれも粗骨材

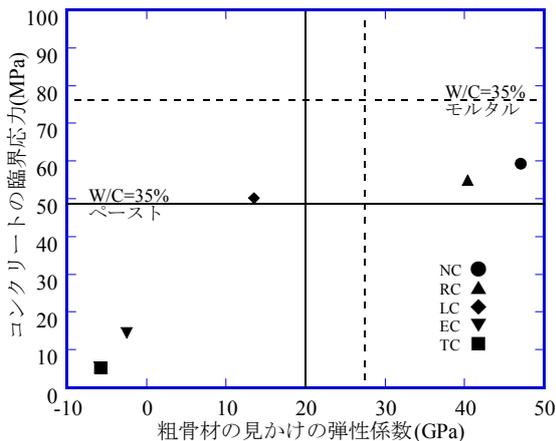


図-7 粗骨材の見かけの弾性係数とW/C = 35%でのコンクリートの臨界応力との関係

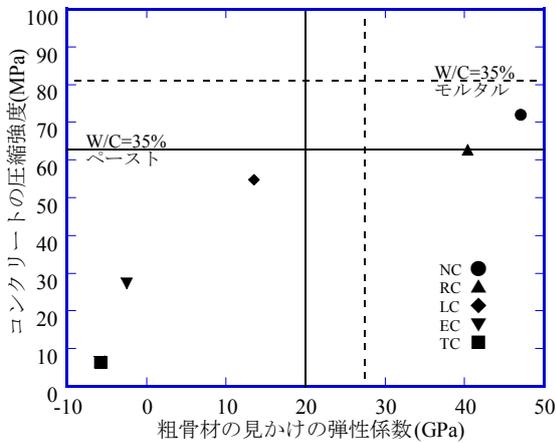


図-8 粗骨材の見かけの弾性係数とW/C = 35%でのコンクリートの圧縮強度との関係

の見かけの弾性係数が大きくなると直線的にコンクリートの臨界応力が増加した。ただし、粗骨材の見かけの弾性係数が15GPa以上となると臨界応力の増加は緩やかとなり、川砂、碎石の組み合わせで最大値となった。そこに、母材となった同じW/Cのモルタルおよびペーストの弾性係数と臨界応力をプロットした。その結果、モルタルの弾性係数は28GPa程度となり、臨界応力はコンクリートの臨界応力よりも大きかった。これに対し、ペーストの弾性係数は約20MPaで、ペーストの臨界応力も48MPaと、コンクリートの臨界応力の増加が緩やかになったポイントとほぼ等しくなった。コンクリートが臨界応力に到達したとき、微小ひび割れがつながり始めるのはペースト部分であることから、ペースト単体での臨界応力と同じ値となったと推察される。

コンクリートの圧縮強度でも同様の傾向が見られた。すなわち、ペーストの弾性係数よりも高い弾性係数を持つ粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、ペーストの圧縮強度とほぼ同じ値となった。また、ペーストの弾性係数より低い粗骨材を用いた場合、粗骨材の見かけの弾性係数とコンクリートの圧縮強度との関係は線形関係となった。ここで、3章で述べたようにW/C = 35%の場合、軽量粗骨材の粒子が破砕してコンクリートが破壊している。本研究で用いた軽量粗骨材の場合、ペーストの臨界応力よりは強いが、ペーストの圧縮強度よりも弱かったと推測される。粗骨材の見かけの弾性係数が低いことは、粗骨材の緻密さ、すなわち粒子強度とも関係しており、W/C = 35%のペーストと軽量粗骨材の粒子強度はほぼ等しかったのではないかと考えられる。

以上から、弾性領域では、複合材料としてペースト、細骨材および粗骨材は一体として挙動している。しかし、粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数より大きいと、ペーストが臨界応力を迎えたときに、コンクリートも臨界応力を迎え、破壊に至ると考えられる。一方、

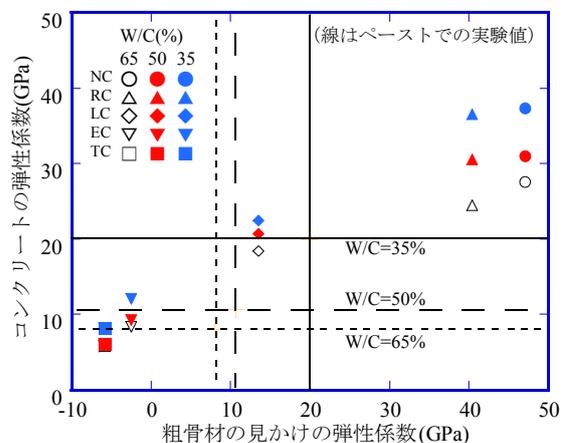


図-9 粗骨材の見かけの弾性係数とW/C = 35, 50 および 65%でのコンクリートの弾性係数との関係

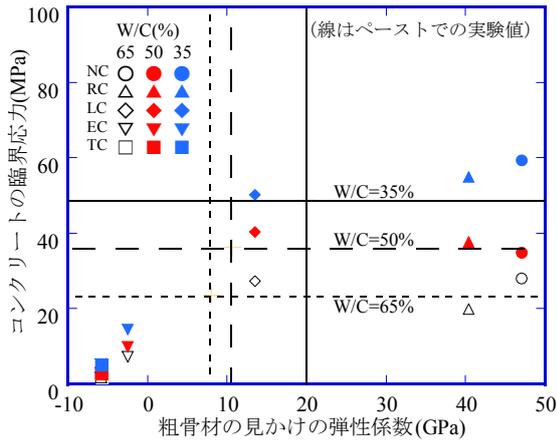


図-10 粗骨材の見かけの弾性係数と W/C = 35, 50 および 65%でのコンクリートの臨界応力との関係

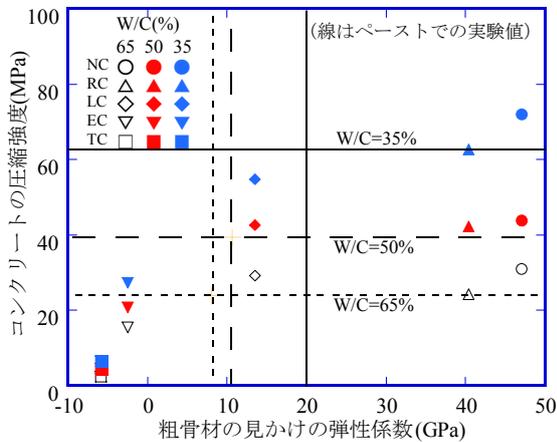


図-11 粗骨材の見かけの弾性係数と W/C = 35, 50 および 65%でのコンクリートの圧縮強度との関係

粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数より小さいと、ペーストの変形が大きくなり、ペーストの臨界応力を迎える前にひび割れが連続し始め、破壊に至ると考えられる。

4.4 W/C がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響

図-9~11 に粗骨材を置換した場合の、粗骨材の見かけの弾性係数とコンクリートの弾性係数、臨界応力および圧縮強度との関係を示す。図中に示した線は、それぞれの W/C におけるペーストの弾性係数、臨界応力および圧縮強度の値である。

コンクリートの弾性係数は、W/C が変化しても、ペーストの弾性係数と粗骨材の見かけの弾性係数との関係に影響は受けていない。また、臨界応力や圧縮強度では、ばらつきはあるものの、4.3 節と同様に、W/C に関係なく、粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数以上であれば、ペーストの臨界応力または圧縮強度で、コンクリートがおよそ最大応力を迎えた。しかし、粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数以下であれば、

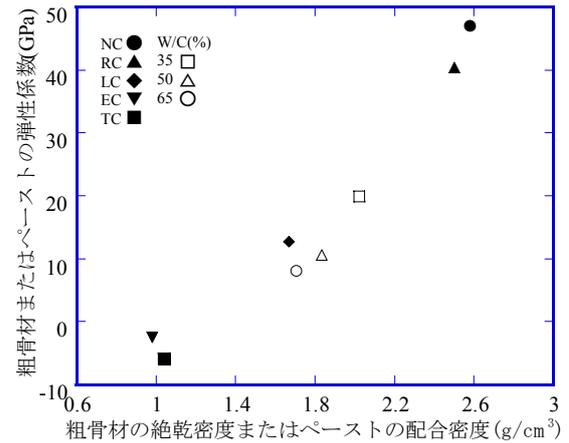


図-12 粗骨材やペーストの密度と見かけの弾性係数との関係

コンクリートの臨界応力や圧縮強度は、ペーストのそれよりも小さくなり、粗骨材の変形によりペーストのひび割れが早期に連続し始めることがわかる。

以上から、粗骨材の見かけの弾性係数がコンクリートの破壊挙動に及ぼす影響は、W/C が異なっても同様の傾向があることがわかった。

5. 粗骨材の見かけの弾性係数と絶対乾密度の関係

粗骨材の見かけの弾性係数が、コンクリートの圧縮変形挙動や破壊挙動に及ぼす影響がわかった。ここで、粗骨材の緻密さを知る方法として、密度や吸水率が考えられる。また、コンクリートの弾性係数が、コンクリートの密度と相関が高いことが一般に知られている²⁾。そこで、粗骨材の見かけの弾性係数と絶対乾密度との関係を調べることにした。また、比較として、W/C = 35, 50 および 65%としたペーストの密度が必要となる。しかし、同配合のセメントペーストのみの試験体を作製してもブリーディングなどの影響から供試体内のセメントペーストの密度を正確に計測できない可能性があることから、配合から算出してプロットすることとした。

図-12 に示すように、材質の異なる粗骨材であるが、絶対乾状態の密度と粗骨材の見かけの弾性係数との関係は相関が高く、直線関係となった。また、ペーストの配合から求めた密度（以下、配合密度）と弾性係数の関係もほぼ同じ直線上にプロットされている。軽量粗骨材の絶対乾密度は W/C = 50%のペーストの密度と同程度となっている。図-11 に示すように、軽量粗骨材を用いたコンクリートの場合、W/C = 50%までは、ペーストの強度と同程度の圧縮強度を示していた。すなわち、ペーストの配合密度と粗骨材の密度が同程度であれば、ペーストの強度を十分に発揮することができ、ペーストの強度と同程度のコンクリート強度が得られることが考えられる。

以上より、粗骨材の絶対乾密度から粗骨材の見かけの弾

性係数が推定でき、目的とする W/C のペーストの配合密度との比較からコンクリートの破壊挙動ならびに圧縮強度を推定できる可能性があるとわかる。これにより、ペースト強度を有効に引き出せる粗骨材の一つの目安になると考えられる。ただし、粗骨材の種類が少ないため、今後、粗骨材の種類を増やし、実験を続ける必要がある。

6. まとめ

- 1) W/C によらず、弾性領域では、複合材料としてペースト、細骨材および粗骨材は一体として挙動している。
- 2) W/C によらず、粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数より大きいと、ペーストが臨界応力を迎えたときに、コンクリートも臨界応力を迎え、破壊に至る。
- 3) W/C によらず、粗骨材の見かけの弾性係数がペーストの弾性係数より小さいと、ペーストの変形が大きくなり、ペーストの臨界応力を迎える前にひび割れが連続し始め、破壊に至る。
- 4) 粗骨材の見かけの弾性係数を推定する指標として粗骨材の絶乾密度が考えられ、目的とする W/C のペーストの配合密度との比較により、コンクリートの破壊挙動ならびに圧縮強度を推定できる可能性がある。

謝辞

実験を行うにあたり、近畿大学理工学部社会環境工学科の奥田敏史君、伊原聡君、片山直紀君、五藤隆君には、多大な尽力をいただいたので、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書，コンクリート工学協会，2007.
- 2) コンクリート用骨材の現状と有効活用技術，コンクリート工学，Vol.46, No.5, 2008.
- 3) 加藤清志:コンクリートの真の強度に関する研究，防衛大学校理工学研究所報告，Vol.15,No.1,pp.29-57,1977.
- 4) 笠井芳夫編:軽量コンクリート,技術書院, pp.73-75, 2002.
- 5) T. C. Hansen: Influence of Aggregate and Void on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 62, No. 2, 1965.
- 6) 川上英男:コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と境界層の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 2, 2000.