

論文 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの応力 - ひずみ曲線に関する一考察

大林 賢人^{*1}・中田 善久^{*2}・大塚 秀三^{*3}・春山 信人^{*4}

要旨:本研究は,水,セメントおよび細骨材の構成割合を一定として粗骨材の容積比を変えたコンクリートの応力 - ひずみ曲線を調べ,粗骨材と母材モルタルの応力 - ひずみ曲線との関係を明らかにするために行った。その結果,同一応力時における岩石とモルタルのひずみから算出したコンクリートのひずみの推定値は,実験値と概ね一致することを示した。このことから,粗骨材の容積比を変えたコンクリートとコンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルの応力 - ひずみ曲線から粗骨材の静弾性係数を推定できる可能性を見出した。

キーワード:コンクリート,粗骨材,モルタル,静弾性係数,圧縮強度,複合理論

1. はじめに

コンクリートの静弾性係数は,構造設計においてコンクリート建築物の使用限界を検討するため用いられる重要な因子となることはいうまでもない。このコンクリートの静弾性係数を評価する方法は,大きく分けて2つに大別される。その一つは,コンクリートの圧縮強度,単位容積質量,粗骨材および混和材の修正係数を用いた実験結果を統計的な解析によって得られた評価方法¹⁾である。他の一つは,骨材とこれを包む母材モルタルからなる二相複合材料と見なしたとき,それぞれの静弾性係数とコンクリート中の粗骨材の容積比から複合理論によって評価する方法である。この方法は,コンクリートの静弾性係数を表すいくつかの複合モデル式^{2),3),4)}が提案されており,これらの式は理論的に明確であり,コンクリートの静弾性係数を理論的に算出することができる。しかし,川上の研究⁵⁾によると,弾性係数の実験値は,複合理論による推定値より低下する場合があると報告されているように,複合理論によるコンクリートの弾性係数の推定は確立されていないのが現状である。また,コンクリートの静弾性係数の実験値は,最大荷重の1/3に相当する応力と縦ひずみが 50×10^{-6} のときの応力とを結ぶ線分の勾配として与えられる割線弾性係数のことをさすため,粗骨材と母材モルタルの応力 - ひずみ曲線とコンクリート中の粗骨材の容積比に密接な関係があると考えられる。しかしながら,コンクリート中の粗骨材の容積比を変えると,その他の水,セメントおよび細骨材の構成割合が変化してしまうため,静弾性係数に粗骨材の容積比が及ぼす影響について言及しきれない面が残る。さらに,複合理論による研究^{5),6)}は,骨材および母材モルタルの応力 - ひずみ曲線の傾きすなわち静弾性係数を用いているものの,同一応力時における各材

料のひずみについて検討したものは見当たらない。

そこで,本研究は,水,セメントおよび細骨材の構成割合を一定として粗骨材の容積比を変えたコンクリートの応力 - ひずみ曲線を調べ,粗骨材と母材モルタルの応力 - ひずみ曲線との関係を明らかにするために行ったものである。ここでは,これらの結果から,静弾性係数から推定した粗骨材の静弾性係数の検討,粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数の実験値との推定値の関係および同一応力時におけるコンクリートのひずみの実験値と推定値の関係について検討を行った。

2. 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの応力 - ひずみ曲線に関する実験概要

2.1 粗骨材の容積比を変えたコンクリートおよび母材モルタルの概要

粗骨材の容積比を変えたコンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの性状を表-1に示す。粗骨材の容積比を変えたコンクリートは,JASS 5に示されている水セメント比40 ~ 60%,スランプ21cmおよび碎石の単位粗骨材かさ容積の標準値である $0.58\text{m}^3/\text{m}^3$ のコンクリートを粗骨材の容積比0.35を中心値とした。その他に,粗骨材の容積比は,単位粗骨材かさ容積 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ である粗骨材の容積比0.24および単位粗骨材かさ容積 $0.68\text{m}^3/\text{m}^3$ である粗骨材の容積比0.41の3水準とした。本研究においてコンクリート中の粗骨材の容積比は,式(1)を用いて表す。

$$V_a = \frac{V_G}{V_w + V_C + V_S + V_G + V_{Ar}} \quad \dots \dots (1)$$

ここに V_a : 粗骨材の容積比

V_w : 水の単位容積 (l/m^3)

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 フジミ工研(株) (正会員)

表 - 1 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	粗骨材の 容積比: V _a	絶対容積(l/m ³)				目標SL ^{*1} , SF ^{*2} (cm)	SL, SF(cm)			空気量(%)		
		V _w	V _c	V _s	V _G		石灰石	硬質砂岩	砂岩	石灰石	硬質砂岩	砂岩
30	0.41	157	166	220	412	-	56.0×55.0	59.5×58.0	44.0×44.0	4.1	5.1	4.1
	0.35	175	184	245	351	SF:60.0±5.0	60.0×57.0	63.0×61.5	60.5×58.0	3.4	4.4	4.5
	0.24	207	218	288	242	-	63.5×63.0	66.5×66.0	63.0×62.5	3.5	4.6	3.1
40	0.41	157	124	262	412	-	48.5×48.0	49.5×48.0	45.5×44.0	5.3	4.8	5.2
	0.35	175	139	290	351	SF:50.0±5.0	51.5×50.0	53.0×52.0	47.0×46.0	5.5	4.7	5.0
	0.24	207	164	342	242	-	55.0×54.0	57.0×56.5	52.0×50.0	4.0	4.1	4.9
50	0.41	157	99	287	412	-	16.0	19.5	17.0	4.0	4.0	4.3
	0.35	175	111	318	351	SL:21.0±1.5	22.0	21.0	21.0	4.9	4.2	4.7
	0.24	207	131	375	242	-	24.0	23.5	25.0	3.9	3.5	3.3

*1 SL:スランブ *2 SF:スランブロー

表 - 2 使用材料

種類	概要
セメント	普通ポルトランドセメント (比表面積: 3,290cm ² /g, 密度: 3.16g/cm ³)
水	上水道水
細骨材	陸砂(表乾密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 2.30%, 粗粒率: 2.75)
粗骨材	詳細を表 - 3 に示す
化学混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物)

表 - 3 使用した骨材の特性

試験方法		石灰石	硬質砂岩	砂岩
表乾密度(g/cm ³)	JIS A 1110	2.70	2.68	2.58
吸水率(%)	JIS A 1110	0.68	0.78	2.79
実積率(%)	JIS A 1104	60.9	60.8	62.7
粗粒率	JIS A 1102	6.60		
圧縮強度(N/mm ²)	JIS M 0302	103.5	148.2	77.3
静弾性係数(kN/mm ²)	JIS M 0302	70.5	55.2	46.1

V_C: セメントの絶対容積 (l/m³)V_S: 細骨材の絶対容積 (l/m³)V_G: 粗骨材の絶対容積 (l/m³)V_{Air}: 調合上の空気量の絶対容積 (l/m³)

本研究における母材モルタルは、粗骨材の容積比 0.35 のコンクリートを 5mm のふるいによりウエットスクリーニングを行ったもの(以降、W.S モルタルと称す)とした。粗骨材の種類は、産地および岩種の異なる石灰石、硬質砂岩および砂岩の 3 水準とし、水セメント比(以降、W/C と称す)は、30%, 40% および 50% の 3 水準とした。また、各単位水量におけるセメント量に対する化学混和剤の添加割合は、粗骨材の容積比 0.35 に用いたものと同一とした。粗骨材の容積比 0.35 における目標空気量は 4.5% とした。粗骨材の容積比を変えたコンクリートおよび W.S モルタルの供試体は、φ 100 × H200mm の寸法とし、養生方法は鋼製型枠にコンクリートの打込み後、急激な乾燥を防ぐため、鋼製型枠の上面をポリエチレンフィルムで封かんし、相対湿度 60 ± 5% および温度 20 ± 2 の一定条件となる恒温恒湿室に静置し、48 時間後に脱型した。型枠の脱型後、水中 20 で標準養生を行い、材齢 2 日、7 日および 28 日において JIS A 1108 に準拠し圧縮強度試験を行った。

2.2 使用材料

使用材料を表 - 2 に示し、使用した骨材の特性を表 - 3 に示す。骨材の物性は、それぞれ表 - 3 中に示す試験方法に準拠して試験を行った。また、粗骨材の粒度による影響をできるだけ除外するため、各粗骨材を JASS 5 の最大寸法が 20mm におけるふるいの呼び寸法である 2.5, 5,

10, 20 および 25mm にふるい分けを行い粗粒率を JASS 5 砂利の標準粒度の中心値となるように、一定とした。

2.3 応力 - ひずみ曲線の測定方法

(1) 粗骨材の容積比を変えたコンクリートおよび W.S モルタル

静弾性係数は、JIS A 1149 に準拠し、ひずみの測定はコンプレッソメーターを用いて行い、管理用供試体 3 本の平均とした。

(2) 岩石

岩石の圧縮強度試験は、各種粗骨材の原石からコアボーリングにより採取した φ 50 × 100mm の供試体を用いて、JIS M 0302「岩石の圧縮強さ試験方法」に準拠して行った。岩石の静弾性係数は、圧縮試験に用いた供試体にひずみゲージ(検長 30mm)を貼り付け、静弾性係数を求めた。ここで表 - 3 に示した静弾性係数とは、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づいて求めたものであり、供試体の載荷時における応力 - ひずみ曲線において、最大荷重の 1/3 に相当する応力と縦ひずみが 50 × 10⁶ のときの応力とを結ぶ線分の勾配として与えられる割線弾性係数とした。

3. 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの力学的性質

(1) 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの圧縮強度

粗骨材の容積比を変えたコンクリートの粗骨材の容積比と圧縮強度の関係を図 - 1 に示す。圧縮強度は、粗骨材の容積比が大きくなるほど小さくなる傾向を示した。これは、各 W/C において水、セメントおよび細骨材の構成割合を一定としているため、粗骨材の容積比が大きくなることにより、コンクリート中の強度発現において大

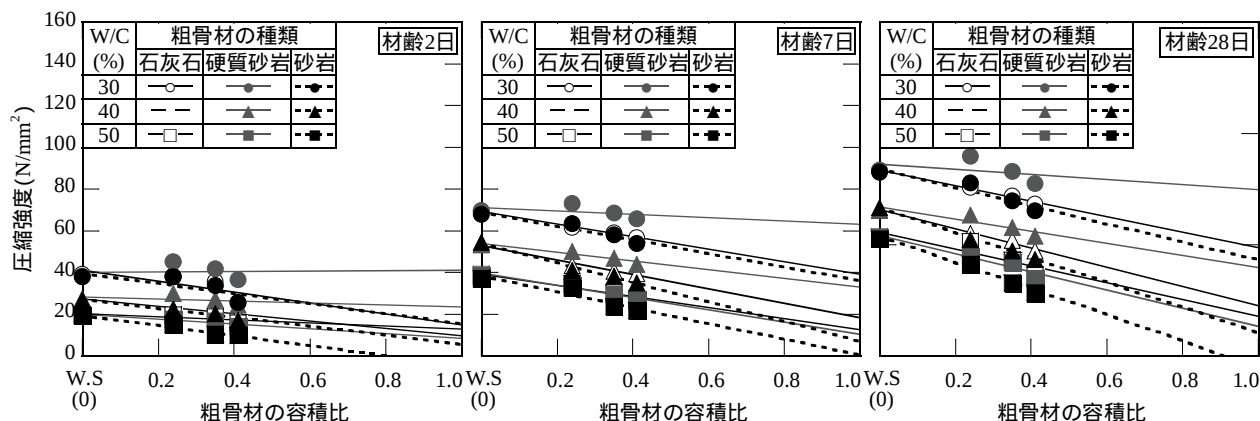


図 - 1 粗骨材の容積比と圧縮強度の関係

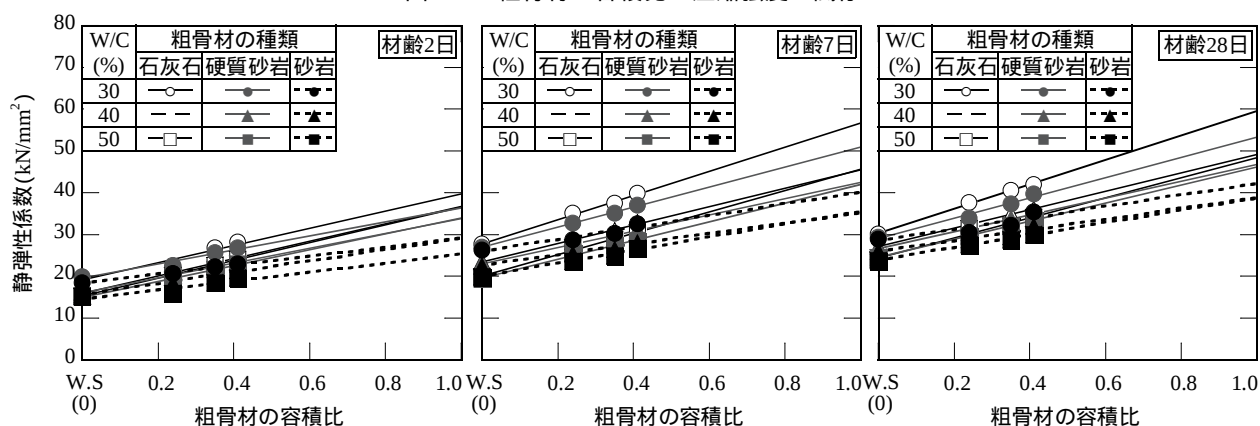


図 - 2 粗骨材の容積比と静弾性係数の関係

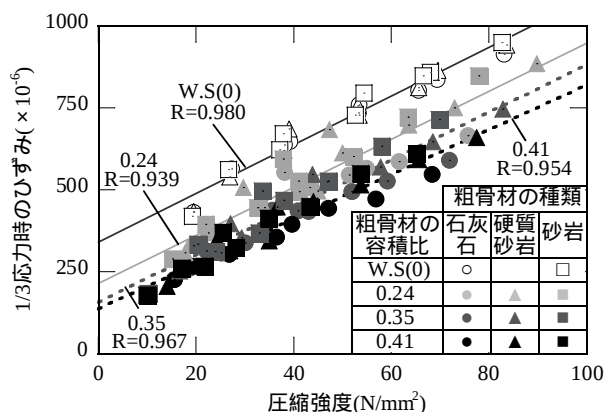


図 - 3 圧縮強度と1/3応力時のひずみの関係

大きな因子となるモルタル量の減少および骨材下面の脆弱部分の増加が起因していると考えられる。また、この関係は、粗骨材の種類、W/Cおよび材齢に関わらず硬質砂岩、石灰石、砂岩の順に小さくなる傾向を示した。これは、本実験において粗骨材の容積比を同一としているため、この差が粗骨材自体の静弾性係数および粗骨材下面の脆弱な部分の量の影響と考えられる。材齢ごとの粗骨材の容積比を変えたコンクリートの圧縮強度は、材齢が初期になるほど、粗骨材の容積比が大きくなるほど小さくなる傾向を示し、その傾きはW/Cが小さくなるほど小さくなる傾向を示した。これは、前述と同様に各W/C

において水、セメントおよび細骨材の構成割合を一定としているため、粗骨材の容積比が大きくなることにより、コンクリート中の強度発現において大きな因子となるモルタル量の減少および骨材下面の脆弱部分の増加が起因していると考えられる。また、W/Cが小さくなるほどW.Sモルタルの圧縮強度が岩石の強度に近づいたことや、材齢が進むほどW.Sモルタルの強度が増進するため、傾きが小さくなったと考えられる。

(2)粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数
粗骨材の容積比と静弾性係数の関係を図 - 2 に示す。粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数は、粗骨材の容積比が大きくなるほど大きくなる傾向を示した。これは、粗骨材とW.Sモルタルの割合と各材料の静弾性係数が大きく影響していると考えられる。また、粗骨材の静弾性係数が大きいほど大きくなる傾向を示した。これは、骨材の静弾性係数がコンクリートの静弾性係数を決める大きな要因になることを示している。W/Cごとの粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数は、粗骨材の容積比が大きくなるほど大きくなる傾向を示した。これは前述と同様に、粗骨材とW.Sモルタルの割合と各材料の静弾性係数が大きく影響していると考えられる。また、静弾性係数は、W/Cが小さくなるほど大きくなる傾向を示した。これは、W/Cが小さくなるほどコンク

リート中のモルタルの静弾性係数が大きくなったためと考えられる。材齢ごとの粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数は、粗骨材の容積比が大きくなるほど大きくなる傾向を示した。これは前述と同様に、粗骨材とW.Sモルタルの割合と各材料の静弾性係数が大きく影響していると考えられる。また、静弾性係数は、材齢が経過すると大きくなる傾向を示した。これは、材齢が経過するとコンクリート中のW.Sモルタルの静弾性係数が大きくなったためと考えられる。

(3)粗骨材の容積比を変えたコンクリートおよびW.Sモルタルにおける圧縮強度と1/3応力時のひずみ

ここでは、最大荷重に相当する応力を圧縮強度とし、その圧縮強度の1/3のひずみを1/3応力時ひずみとし、両者関係について検討する。

圧縮強度と1/3応力時のひずみの関係を図-3に示す。粗骨材の容積比を変えたコンクリートおよびW.Sモルタルにおける1/3応力時のひずみは、圧縮強度が大きくなると比例的に大きくなる傾向を示した。これは、圧縮強度が大きくなると静弾性係数が大きくなることを示しており、両者に高い相関性が見られている。また、両者の関係は、粗骨材の種類、W/Cおよび材齢にかかわらず粗骨材

の容積比が小さくなるとその切片となるひずみが大きくなる傾向を示した。これは、粗骨材の容積比が1/3応力時のひずみに大きく影響していること示しており、粗骨材下面の脆弱な部分の量が寄与していると考えられる。

4. 粗骨材の容積比を変えたコンクリートの各複合モデル式の検討

(1)静弾性係数から推定した粗骨材の静弾性係数の検討

本実験における粗骨材の容積比と静弾性係数の概念図を図-4に示す。本研究において、コンクリートを粗骨材と母材モルタルからなる二相複合材料と考え、2つ相が並列に相をなしていると仮定する。そのときの、コンクリートの静弾性係数の推定値は、式(2)²⁾の並列式によって表せる。

$$E_c = (1 - V_a) \cdot E_m + V_a \cdot E_a \quad \dots \dots (2)$$

ここに E_c : コンクリートの静弾性係数の推定値 (kN/mm²)

E_a : 粗骨材の静弾性係数の実験値 (kN/mm²)

E_m : モルタルの静弾性係数の実験値 (kN/mm²)

V_a : 粗骨材の容積比

この式(2)に、本実験のW.Sモルタルおよびコンクリート

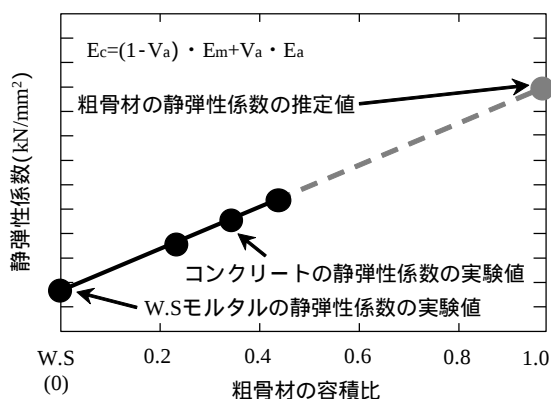


図-4 本実験における粗骨材の容積比と静弾性係数の概念図

表-4 各材齢における粗骨材の静弾性係数の推定値と実験値

粗骨材 の種類	W/C (%)	粗骨材の静弾性係数 の推定値(kN/mm ²)			粗骨材の静弾性 係数の実験値 (kN/mm ²)
		材齢(日)			
		2	7	28	
石灰石	30	39.7	56.7	59.5	70.5
	40	36.6	45.5	49.2	
	50	36.5	45.7	48.4	
硬質砂岩	30	36.3	51.0	53.4	55.2
	40	33.8	42.4	46.7	
	50	33.9	41.9	46.1	
砂岩	30	29.1	40.1	42.1	46.1
	40	29.0	35.0	38.7	
	50	25.3	35.4	38.5	

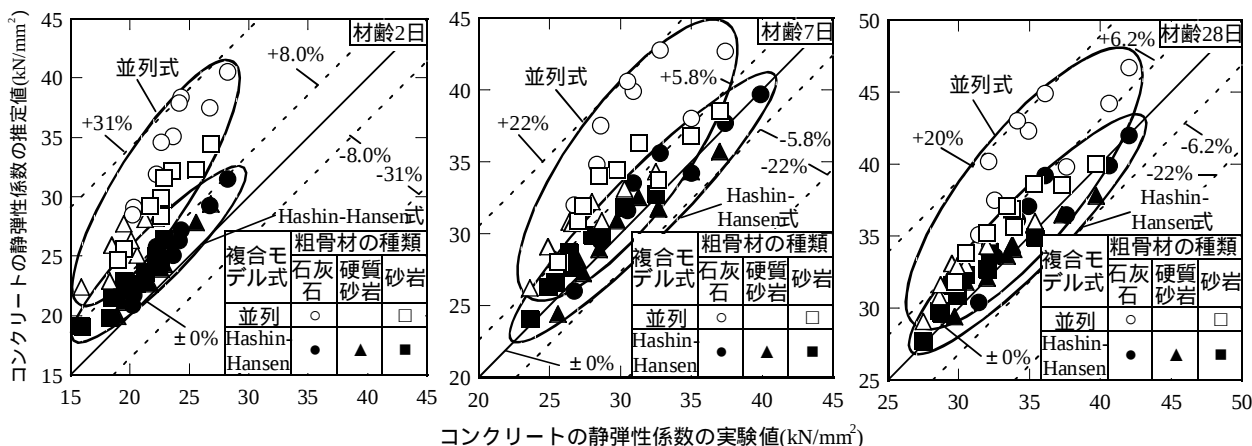
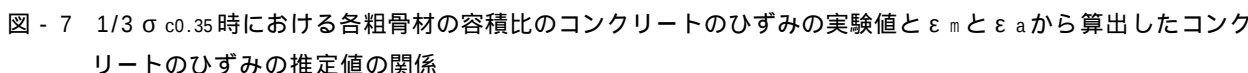
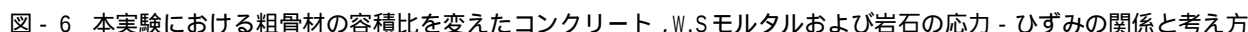


図-5 コンクリートの静弾性係数の実験値とコンクリートの静弾性係数の推定値の関係

(2)粗骨材の容積比を変えたコンクリートの静弾性係数

コンクリートの静弾性係数の実験値とコンクリートの静弾性係数の推定値の関係を図 - 5 に示す。コンクリートの



静弾性係数の実験値は、材齢2日、7日および28日においていずれの骨材ともに並列式により求めた推定値の方が大きくなる傾向を示し、それぞれ最大で+31%、+22%および+20%大きくなった。また、材齢が経過するほどその傾向は小さくなった。骨材の種類ごとに並列式により求めたコンクリートの静弾性係数の推定値を比較すると、石灰石で平均+25%、硬質砂岩で平均+16%、砂岩で平均+14%であった。これは、岩石すなわち粗骨材の静弾性係数の実験値が大きく影響したためと考えられ、前項4.(1)で考察した個々の骨材単体の静弾性係数の差異が影響していると考えられる。

Hashin-Hansen式により求めたコンクリートの静弾性係数は、材齢2日においてコンクリートの静弾性係数の実験値より若干大きく推定され、材齢7日および材齢28日においてほぼ同等となった。また、並列式より求めたコンクリートの静弾性係数のように粗骨材の種類による影響は見られなかった。これは、Hashin-Hansen式は、W.Sモルタルの静弾性係数に対して岩石すなわち粗骨材の静弾性係数の影響する割合が小さいためと考えられる。

(3) $1/3 \sigma_{c0.35}$ 時における各粗骨材の容積比のコンクリートのひずみの実験値と ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値の関係

本実験における粗骨材の容積比を変えたコンクリート、W.Sモルタルおよび岩石の応力 - ひずみの関係と考え方を図 - 6 に示す。ここでは、図 - 6 の式(4)に示したように ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値と $1/3 \sigma_{c0.35}$ 時における各粗骨材の容積比のコンクリートのひずみの実験値の関係を検討した。

$1/3 \sigma_{c0.35}$ 時における各粗骨材の容積比のコンクリートのひずみの実験値と ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値の関係を図 - 7 に示す。 $1/3 \sigma_{c0.35}$ 時における各粗骨材の容積比のコンクリートのひずみの実験値と ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値の関係は、粗骨材の種類に関わらず、材齢2日、7日および28日においてそれぞれ $\pm 6.9\%$ 、 $\pm 4.6\%$ および $\pm 4.4\%$ の範囲となり、ほぼ同一な傾向であることを示した。また、材齢が経過するとその値は小さくなった。これより、図 - 6 で示した、 ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値は、実験値と概ね一致することを示した。すなわち、粗骨材の粒度分布を一定とした粗骨材の容積比を変えたコンクリートとコンクリートとウエットスクリーニングしたモルタルの応力とひずみの関係において一定応力時における各ひずみと容積比から粗骨材の静弾性係数を推定できる可能性を見出した。

5. まとめ

得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮強度は、粗骨材の容積比が大きくなるほど小さくなる傾向を示し、静弾性係数は、粗骨材の容積比が大きくなると大きくなる傾向を示した。
 - (2) $1/3$ 応力時のひずみは、圧縮強度が大きくなると大きくなる傾向を示し、粗骨材の種類、W/Cおよび材齢にかかわらず粗骨材の容積比が小さくなると比例的に大きくなる傾向を示した。
 - (3) ε_m と ε_a から算出したコンクリートのひずみの推定値は、実験値と概ね一致することを示した。このことから、粗骨材の粒度分布を一定とした粗骨材の容積比を変えたコンクリートとコンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルの応力 - ひずみ曲線から粗骨材の静弾性係数を推定できる可能性を見出した。
- 本実験は、水、セメントおよび細骨材の構成割合を一定として粗骨材の容積比を変えたコンクリートとコンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルの応力 - ひずみ曲線から粗骨材の静弾性係数を推定できる可能性を見出した。今後は、本実験で得られた結果から、粗骨材の容積比を変えたコンクリートから粗骨材の静弾性係数の推定をすると共に高強度コンクリートなどに用いられる粗骨材の骨材選定の判断基準の確立を目的とし更なる検討を行っていく予定である。

謝辞

本実験を行うにあたり、日本大学理工学部中田研究室およびものづくり大学技能工芸学部大塚研究室の学生の皆様より多大なるご協力を頂きました。深い感謝の念を表して謝辞と致します。

参考文献

- 1) 野口貴文、友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係、日本建築学会構造系論文集、No.474、pp.1-10、1995.8
- 2) Mehta, P. K., P. J. Monteiro: Concrete, 2nd Ed., Prentice Hall, pp. 548, 1993
- 3) Zvi Hashin: The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials, J. Appl. Mech. 29(1), pp.143-150, 1962
- 4) Torben C. Hansen: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of the American Concrete Institute, Vol.62, No.2, pp.193-216, 1965.2.
- 5) 川上英男：近似複合理論の多段階適用とコンクリートの弾性係数評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, Vol.1, pp.511-516, 1997.6
- 6) 川上英男：コンクリートの弾性係数と粗骨材の見かけの弾性係数、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.31, Vol.1, pp.493-498, 2009