

早強コンクリートの力学的特性と体積変化の実態把握

三井住友建設(株)	正会員	博士 (工学)	○谷口	秀明
三井住友建設(株)		博士 (工学)	樋口	正典
三井住友建設(株)	正会員	博士 (工学)	藤田	学
三井住友建設(株)	正会員		岡	誠一

This paper describes the dynamic properties and the volume change of and high early strength concrete using the aggregates collected from ready mixed concrete plants. As a result of the experiment, followings were obtained; 1) The experimental value of Young's modulus has the range of $\pm 30\%$ for a standard value. 2) The shrinkage might be several times different depending on the kind of the aggregate. 3) There exists a correlation respectively of Young's modulus, autogenous shrinkage, and drying shrinkage.

Key words: aggregate, compressive strength, Young's modulus, shrinkage

1. はじめに

コンクリートを直接製造することなく、レディーミクストコンクリートの購入という形態が進むなかで、施工実務者のコンクリートに対する関心は薄れつつある。しかし、たとえば、筆者らの調査結果¹⁾では、PC橋梁上部構造の現場打ちコンクリートとして多用される、呼び強度40の早強コンクリートの標準配合には、水セメント比が30.0%程度まで小さく、単位水量が200kg/m³、単位セメント量が600kg/m³を超えるものも存在することが確認されている。このようなコンクリートを使用した場合には、ワーカビリティの低下、温度応力や体積変化に伴うひび割れ等、様々な不具合のリスクが高まるため、試験練りにより適正な配合に修正する等、コンクリート技術者による適切な判断と対策が必要である。また、施工計画後の試験練り段階では実施可能な対策が限定されるため、できるだけ早期の段階にレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）の実態を把握し、適切な対策を講じた設計・施工を行うことが重要である。筆者らは、橋梁の高品質化を目指す試みの一つとして、生コン工場の様々な情報を取り込んだデータベースの構築を進めている。

しかし、最近では、生コン工場から提示される配合や試験データ等の情報のみでは推測できない現象も見られる。その一つが、天然骨材の品質低下に起因するコンクリートの収縮量の増加であり、供用前から想定外のひび割れ・変形等が発生した事例²⁾が存在する。これを受け、学協会ではコンクリートの収縮問題に関する活動が活発しているが、コンクリート、特にPC部材に使用する早強コンクリートの収縮量の実態はまだ明らかになっていないのが現状である。おおよそであれば、収縮量の実態を把握しなければ、収縮量の増加に対する諸対策の必要性や効果等を明確に示すことができない。

そこで、筆者らは、各地の生コン工場で使用している骨材を収集し、PC部材への適用を対象とする早強コンクリート（以下、コンクリートと略す）の力学的特性と体積変化を確認した。

2. 試験内容

2.1 コンクリートの条件

本研究では、PC橋上部構造を施工対象とする設計基準強度40N/mm²程度の現場打ちコンクリートを想定した。使用したセメントは、任意の工場で製造された、製造ロットが同一の早強ポルトランドセメ

表-1 収集した骨材の種類, 産地, 表乾密度, 吸水率, 使用した混和剤の種類および単位水量

No.	区分	細骨材								粗骨材								混和剤の種類	単位水量					
		種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率							
0	基準	川砂	栃木県	2.57	2.93	砕砂	栃木県	2.64	1.48					砕石2005	栃木県	2.65	0.63			SP	160			
1	建築	砕砂	栃木県	2.67	1.67	陸砂	茨城県	2.61	1.03					砕石2005	茨城県	2.66	0.60	砕石2005	栃木県	2.68	1.04	SP	160	
2		砕砂	高知県	2.60	2.17	山砂	千葉県	2.61	1.99					砕石2005	高知県	2.70	0.43			SP	165			
3	土木	陸砂	青森県	2.58	3.73	陸砂	青森県	2.55	2.57					砕石2005	青森県	2.73	1.70			SP	165			
4		砕砂	岩手県	2.86	1.22	山砂	宮城県	2.56	2.01					砕石2505	岩手県	2.90	0.45			SP	165			
5		砕砂	新潟県	2.62	1.95									砕石2505	新潟県	2.66	1.20			SP	165			
6		陸砂	茨城県	2.66	0.94	砕砂	栃木県	2.73	1.07					砕石2005	栃木県	2.76	0.72			WAE	155			
7		山砂	千葉県	2.60	1.55									砕石2005	山口県	2.67	0.48	砕石2005	東京都	2.69	0.46	SP	160	
8		山砂	千葉県	2.56	3.09	砕砂	東京都	2.59	1.87					砕石2005	東京都	2.65	1.04			SP	175			
9		砕砂	東京都	2.64	1.72	砕砂	東京都	2.66	1.17	山砂	千葉県	2.61	2.40		砕石2005	東京都	2.66	0.71	砕石2005	神奈川県	2.66	1.03	SP	160
10		陸砂	神奈川県	2.64	2.27	山砂	千葉県	2.59	2.23					砕石2005	兵庫県	2.63	1.10	砕石2005	神奈川県	2.67	0.96	SP	170	
11		砕砂	山梨県	2.63	2.68	山砂	千葉県	2.57	2.67					砕石2005	山梨県	2.62	2.74			SP	165			
12		川砂	神奈川県	2.64	2.52	山砂	千葉県	2.60	2.47	山砂	神奈川県	2.62	3.43		砕石2005	神奈川県	2.81	1.25			SP	165		
13		川砂	静岡県	2.63	1.44									川砂利	静岡県	2.65	1.03			WAE	165			
14		陸砂	静岡県	2.63	1.29	山砂	静岡県	2.63	1.50					陸砂利	静岡県	2.66	1.12			WAE	165			
15		川砂	山梨県	2.65	1.54									川砂利	山梨県	2.68	1.16			SP	160			
16		山砂	愛知県	2.57	1.79	スラグ砂	愛知県	2.83	0.82					砕石2005	三重県	3.00	0.70	砕石2005	三重県	2.65	1.64	SP	170	
17		陸砂	富山県	2.54	1.66									陸砂利	富山県	2.62	1.37			WAE	165			
18		山砂	京都府	2.56	2.04	砕砂	大阪府	2.66	2.01					砕石2015	大阪府	2.71	0.63	砕石1505	大阪府	2.70	0.72	SP	170	
19		山砂	京都府	2.50	1.56									砕石2015	大阪府	2.71	0.70	砕石1505	大阪府	2.66	0.91	SP	170	
20		砕砂	山口県	2.55	1.34	海砂	山口県	2.47	1.90					砕石2015	愛媛県	2.75	0.48	砕石1505	愛媛県	2.72	0.76	SP	160	
21		砕砂	広島県	2.70	0.75	砕砂	大分県	2.53	1.02					砕石2015	広島県	2.63	1.46	砕石1505	広島県	2.62	1.67	SP	170	
22		加工砂	島根県	2.60	1.37									砕石2015	島根県	2.72	1.43	砕石1505	島根県	2.74	1.42	SP	175	
23		砕砂	福岡県	2.68	1.07	海砂	長崎県	2.61	1.52					砕石2015	山口県	2.74	0.44	砕石1505	山口県	2.72	0.57	SP	175	
24		砕砂	広島県	2.60	1.09									砕石2015	広島県	2.63	0.54	砕石1505	広島県	2.65	0.65	SP	165	
25		砕砂	愛媛県	2.55	3.02	海砂	大分県	2.62	1.49					砕石2005	愛媛県	2.56	2.04			SP	170			
26		砕砂	愛媛県	2.55	1.41									砕石2005	愛媛県	2.63	0.84			SP	165			
27	砕砂	広島県	2.61	0.72									砕石2015	広島県	2.63	0.44	砕石1505	広島県	2.63	0.57	SP	165		
28	陸砂	鹿児島県	2.53	2.38	陸砂	宮城県	2.57	2.50					砕石2505	鹿児島県	2.63	1.07			SP	175				
29	海砂	佐賀県	2.66	0.97	砕砂	大分県	2.59	1.33					砕石2005	大分県	2.71	0.27			SP	165				
30	海砂	福岡県	2.59	1.06	海砂	福岡県	2.57	2.00					砕石2005	大分県	2.71	0.27			SP	170				

骨材の密度は表乾密度で、その単位はg/cm³である。吸水率の単位は%である。混和剤の種類におけるSPは高性能AE減水剤、WAEはAE減水剤を指す。単位水量の単位はkg/m³である。

表-2 配合条件

	目標値	平均値	最大値	最小値
W/C(%)	40(一定)			
W(kg/m ³)	165	166	175	155
C(kg/m ³)	413	415	438	388
Vg(m ³ /m ³)	375	377	395	365

W/C: 水セメント比, W: 単位水量, C: 単位セメント量(計算値), Vg: 単位粗骨材絶対容積

ント(密度3.13g/cm³)である。収集した骨材は、表-1に示すとおりである。この表は工場ごとの骨材の組合せを示しており、この組合せでコンクリートを製造した。表乾密度および吸水率は筆者らが測定した実測値である。粗骨材の最大寸法は20mmもしくは25mmである。各地で土木工事をやっている周辺工場に常備している骨材を収集した(表中の区分

「土木」)。比較として、筆者らが試験研究用に使用している骨材(「基準」)、首都圏の建築工事で高強度コンクリートの製造実績がある2工場の骨材(「建築」)も使用した。なお、本論文では、便宜上、「土木」および「建築」と表記しているが、土木工事で使用されるコンクリートを比較・評価しようとするものではない。単位水量およびスランプの調整には高性能AE減水剤(標準形、ポリカルボン酸エーテル系の化合物)またはAE減水剤(標準形、リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体)を、空気量の調整にはAE剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)を使用した。

配合条件を、表-2に示す。表中の目標値とは、配合を定めるうえで目安とした値である。水セメント比は40%(一定)とした。単位水量および単位粗骨材絶対容積の目標値は、それぞれ、165kg/m³、0.375m³/m³とし、練上りのスランプが12~15cm程度で良好なフレッシュ性状が得られるよう、試験練りにより決定した。それらの決定にあたっては、高性能AE減水剤の使用量が過多あるいは過少にならない範囲で、かつ全配合の値が目標値から大きく異ならないようにした。高性能AE減水剤を標準使用量程度で使用すると単位水量がかなり少なくなり、スランプが所定の範囲であっても粗骨材が目立ち、粘性のかなり高い状態になるものについてはAE減水剤に変更した。使用した混和剤の種類および最終的に決定した単位水量は表-1に示すとおりである。空気量は4.5±0.5%の範囲に調整した。なお、スランプおよび空気量の試験は、それぞれ、JIS A 1101, JIS A 1128に準じて実施した。

2.2 硬化コンクリートの品質に関する試験方法

本論文では、コンクリートの力学的特性は、圧縮強度と静弾性係数の試験値で評価することとし、試験方法は、それぞれ、JIS A 1108, JIS A 1149に準じた。供試体の養生は標準水中養生、試験材齢は3, 7, 28日である。

コンクリートの体積変化の評価は、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを対象とする。自己収縮試験は、(社)日本コンクリート工学協会における埋込み型ひずみ計を用いた試験方法に準じて実施し、データロガーを用いて材齢56日(凝結の始発を起点)まで継続的にひずみと温度(ひずみ補正用)の測定を行った。乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2に基づき、コンタクトゲージ法で実施し、ゲージプラグには埋込み用ゲージプラグを使用した。供試体は、材齢7日間の水中養生を行った後、乾燥を開始した。供試体の乾燥は、恒温恒湿室(温度20℃, 湿度60%)内で行った。乾燥開始後の測定材齢(以下、単に材齢と呼ぶ)は、7日, 28日, 56日, 91日および182日とし、乾燥開始後の長さ変化率を乾燥収縮ひずみとした。

3. 力学的特性

圧縮強度試験の結果を、表-3, 図-2に示す。表-3に示すとおり、「基準」骨材(No. 0)と「建築」骨材(No. 1, No. 2)を使用した場合の圧縮強度は、いずれの材齢もほぼ同値となった。しかし、「土木」骨材(No. 3~30)を使用した場合には、セメントおよび水セメント比が同一であっても、圧縮強度は相当に異なることがわかる。また、比較的低い強度域である材齢3日の圧縮強度においても、「土木」骨材を使用したものには、「基準」・「建築」骨材に比べてかなり低いものが存在する。一般に、砂利は形状が丸いため、水セメント比を同一にした場合、これを使用したコンクリートの圧縮強度は碎石に比べて低くなると言われており、その傾向は今回の試験結果においても平均値より把握できる。しかし、その差はわずかであり、それと反対に碎石の中には砂利よりもコンクリート強度が低くなるものが存在する。

図-3は材齢3, 7, 28日の圧縮強度と静弾性係数の関係、図-4は静弾性係数の試験値と計算値の比の分布である。ここで、静弾性係数の計算値とは、図-3に示す構造計算に用いる標準値に対して累乗式で回帰し、圧縮強度の試験値を代入して求めたものである。試験値が存在する範囲では標準値を結んだ線と累乗式の線はほぼ一致する。「基準」骨材(No. 0)と「建築」骨材(No. 1, No. 2)

表-3 圧縮強度試験の結果

材齢(日)		3	7	28	
「基準」骨材		No.0	50.2	57.4	67.7
「建築」骨材		No.1	53.9	59.5	69.9
		No.2	50.6	58.6	67.9
「土木」骨材 (No.3 ~30)	全データ	平均	47.5	55.1	63.7
		最小	39.7	46.6	54.2
		最大	53.7	62.1	72.5
	砂利	平均	44.7	54.4	61.7
		最小	42.1	52.8	60.6
		最大	47.7	57.2	63.9
	碎石	平均	48.0	55.2	64.1
		最小	39.7	46.6	54.2
		最大	53.7	62.1	72.5

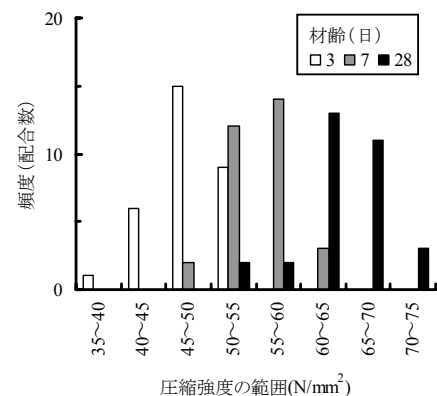


図-2 圧縮強度の分布

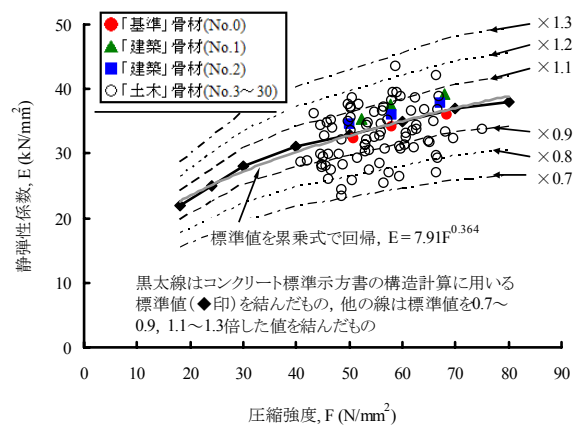


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

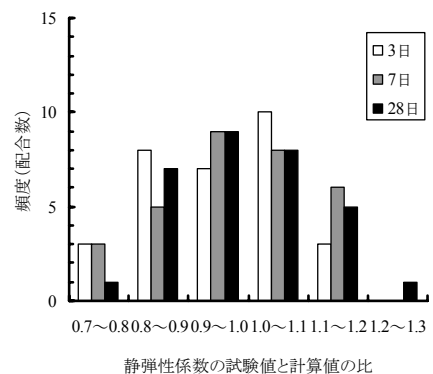


図-4 静弾性係数の試験値と計算値の比の分布

を使用した場合の圧縮強度と静弾性係数の関係は、構造計算に用いる標準値とおおむね一致する。しかし、「土木」骨材 (No. 3~30) を使用した場合には、その標準値に対して±30%程度異なる結果も存在することがわかった。プロットしたデータは実強度であるので、静弾性係数が若干低いものに関しては、割増しが行われた配合強度では標準値に近くなるが、標準値と大きく異なるものについては実測値に基づく構造計算が必要であり、設計段階より周辺地域の生コン工場の情報は重要であると考えられる。

4. 体積変化

自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの測定結果 (代表的な3材齢) を、表-4に示す。乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129の試験による長さ変化率であり、材齢7日以降の乾燥環境下における自己収縮ひずみを含む。なお、文章中では、収縮を正として大小関係を表現する。

まず、自己収縮ひずみに着目する。図-5は自己収縮ひずみの分布、図-6は単位セメント量と自己収縮ひずみの関係である。表-4に示すとおり、「基準」骨材 (No. 0) と「建築」骨材 (No. 1, No. 2) を使用した場合の自己収縮ひずみは、前述の圧縮強度、静弾性係数と同様にほとんど差異が認められない。しかし、「土木」骨材 (No. 3~No. 30) を用いた場合の自己収縮ひずみは、表-4における全データの最小値と最大値で見ると、材齢7日で5倍程度、材齢56日で3倍程度異なる。なお、砂利と碎石の平均値を比較すると、ほとんど違いがない。

自己収縮ひずみは、一般に水セメント比が一定の場合には単位セメント量の大小との関係がある。今回の試験では、水セメント比を40%とし、フレッシュコンクリートの性状に応じて単位水量を調整しているため、単位セメント量は、表-4に示すように骨材の種類によって多少異なる。しかし、図-6に示すとおり、本試験の単位セメント量の範囲では、単位セメント量と自己収縮ひずみの関係は成立していない。したがって、図-5に示す自己収縮ひずみの相違は、おおむね、骨材の品質に起因すると理解して良いものと考えられる。既往の研究報告 (例えば、3) では、人工軽量骨材や再生骨材のように特殊な骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみに関する報告は多いが、生コン工場で使用されている天然骨材の種類 (品質) に着目して自己収縮ひずみを確認したものは見られない。今回の試験結果によれば、設計基準強度40N/mm²程度のコンクリートであっても、骨材や構造物等の条件によっては自己収縮ひずみを確認し、対策を講じる必要がある場合も存在すると考えられる。

次に、乾燥収縮ひずみに着目する。図-7は乾燥収縮ひずみの分布、図-8は単位水量と乾燥収縮ひず

表-4 収縮試験の結果

収縮ひずみの種類	自己収縮ひずみ	乾燥収縮ひずみ						
材齢(日)	7	28	56	28	91	182		
「基準」骨材	No.0	108	176	208	290	488	577	
「建築」骨材	No.1	111	178	210	271	430	486	
	No.2	107	175	208	265	386	442	
	平均	98	163	194	372	543	581	
全データ	最小	35	74	100	204	333	392	
	最大	150	241	282	560	748	798	
	平均	86	148	181	412	578	606	
「土木」骨材 (No.3~30)	砂利	最小	35	74	100	301	453	477
	最大	115	191	230	560	727	734	
	平均	99	164	194	359	530	571	
碎石	最小	37	97	119	204	333	392	
	最大	150	241	282	541	748	798	

(×10⁻⁶, 収縮を正で表した値)

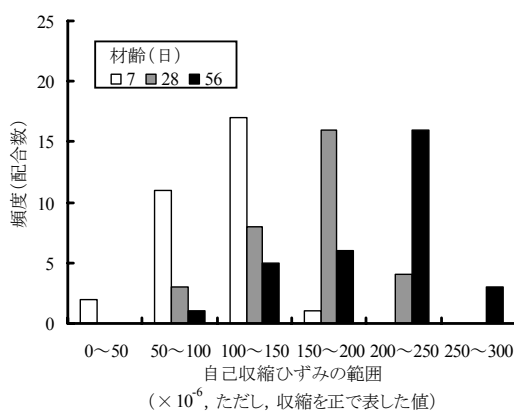


図-5 自己収縮ひずみの分布

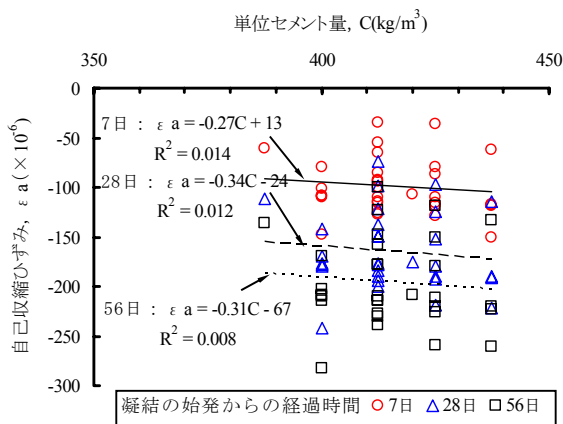


図-6 単位セメント量と自己収縮ひずみの関係

みの関係である。「基準」骨材(No. 0)と「建築」骨材(No. 1, No. 2)を使用した場合、自己収縮ひずみとは異なり、両者の乾燥収縮ひずみは若干の相違が認められる。しかし、「土木」骨材(No. 3~No. 30)を用いた場合の乾燥収縮ひずみは、それらよりも大幅に大きいものあるいは小さいものが存在する。表-4に示すとおり、同一のセメントを使用し、水セメント比を一定にしても、それらの全データの最大値と最小値は材齢182日では2倍程度異なり、図-7に示すように骨材の種類によって乾燥収縮ひずみにはばらつきがある。材齢182日の分布によれば、乾燥収縮ひずみは450~500×10⁻⁶と600~650×10⁻⁶の2箇所ピークが認められる。

一般に単位水量が大きいほど、乾燥収縮ひずみが大きくなると言われるが、図-8に示すとおり、様々な骨材を使用したコンクリートを対象とし、かつ単位水量が165±10kg/m³の範囲では、単位水量と乾燥収縮ひずみの関係は明確ではない。単位水量を155kg/m³とした場合の乾燥収縮ひずみが他と比べて若干小さいため、単位水量の影響も含まれないわけではないが、使用した砕石が石灰岩砕石であるため、この影響である可能性が高い。また、表-4に示す両者の乾燥収縮ひずみの平均値によれば、砂利と砕石の乾燥収縮ひずみには顕著な違いは認められない。筆者らの研究¹⁾では、使用骨材および水セメント比を一定とし、単位水量を150kg/m³と200kg/m³とした場合の収縮ひずみ(自己収縮ひずみを含む)には明確な違いがあるが、その間で単位水量を15kg/m³程度の間隔で変化させても単位水量と収縮ひずみには明確な関係がなく、両者の関係が逆転する結果も確認されている。単位水量はなるべく少なくなるよう決定することが配合設計の基本原則であるが、所定のワーカビリティを確保できる単位水量の調整幅は限られる。このため、対策の必要性の判断やその選定を早期に行うためには、まずは任意の配合であっても工場で使用される骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを把握しておくことが重要であると考えられる。

なお、コンクリート標準示方書〔施工編：検査標準〕の解説⁴⁾によれば、試験方法はJIS A 1129に準拠し、収縮量(水中養生7日後6ヶ月の乾燥)が1000×10⁻⁶を超えないことを標準としてもよいとしている。今回の試験結果では、1000×10⁻⁶に達するものは存在しないが、PC部材を対象とするコンクリートの場合には前述の自己収縮ひずみも考慮して判断する必要がある。

5. 力学的特性と体積変化に関する各試験値間の関係

前述のとおり、乾燥収縮ひずみは材齢6ヶ月の値によって判定するため、設計あるいは施工段階において事前に確認することが難しいことがある。このため、何らかの他の指標あるいは短期材齢の収縮ひずみによって、材齢6ヶ月の乾燥収縮ひずみを推定できることは、実務上有効である。図-9は、試験値間の関係を調べた結果の一例である。前述の静弾性係数の試験値と計算値の比を指標とし、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみとの関係を調べると、静弾性係数の大小がいずれの収縮ひずみとの関連性があり、セメントおよび水セメント比を同一とした条件で静弾性係数は小さいほど、収縮ひずみ

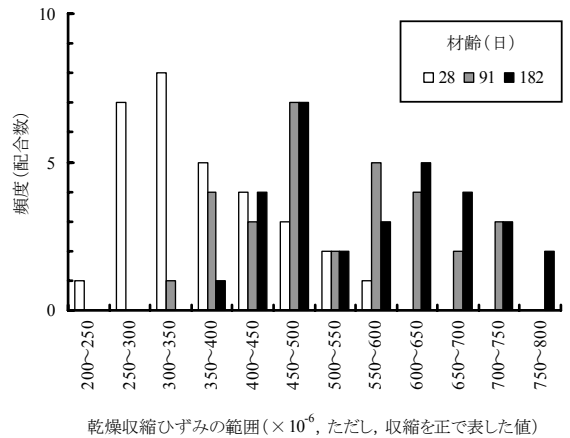


図-7 乾燥収縮ひずみの分布

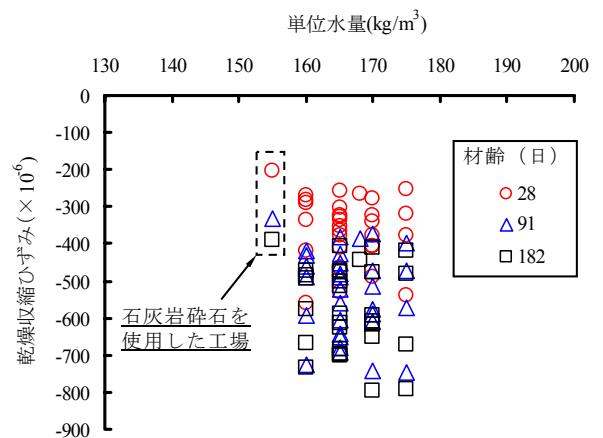


図-8 単位水量と乾燥収縮ひずみの関係

が大きくなる傾向がある。自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの関係においても、おおよそ、自己収縮ひずみが大きいものほど、乾燥収縮ひずみも大きくなるものが多いようである。前述のとおり、いずれの収縮ひずみも静弾性係数と関係していること、材齢7日以降の乾燥収縮ひずみには乾燥環境下での自己収縮ひずみが含まれること等が、両ひずみの間にも関連が見い出せる理由であると考えられる。また、材齢28日または91日の乾燥収縮ひずみと材齢182日の乾燥収縮ひずみとの相関もあり、おおよそ、短期材齢の乾燥収縮ひずみが大きいものは、長期材齢の値も大きい場合が多いようである。いずれの関係にもばらつきがあり、精度良く推定するための工夫が必要であるが、実務上は過大な収縮ひずみを生じるものか、おおよその判定ができるだけでも、予期しない不具合を未然に防ぐことができると考えられる。

6. まとめ

生コン工場の骨材を使用し、骨材の違いが早強コンクリートの力学的特性および体積変化に及ぼす影響を確認した結果、試験の範囲では、以下のことが明らかになった。

- (1) セメントと水セメント比が同一であっても、コンクリートの圧縮強度は、使用する骨材によって大きく異なる。
- (2) コンクリートの静弾性係数は、構造計算に用いる標準値に対して±30%程度の範囲を有する。
- (3) 骨材の品質は、コンクリートの自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみのいずれにも影響を及ぼし、それぞれの最大値と最小値は数倍異なる。
- (4) 限定した試験条件下では、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみは、いずれも静弾性係数との相関がある。また、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみ、ならびに短期材齢と長期材齢の収縮ひずみは、おおむね、大小関係が成立する。

参考文献

- 1) 谷口秀明, 樋口正典, 藤田学: PC橋を対象とした高強度コンクリートの配合, 強度および収縮に関する一考察, 第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 193-198, 2006. 10
- 2) 土木学会: 垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書, 2005. 9
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 2002. 9
- 4) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】, p. 204, 2008. 3

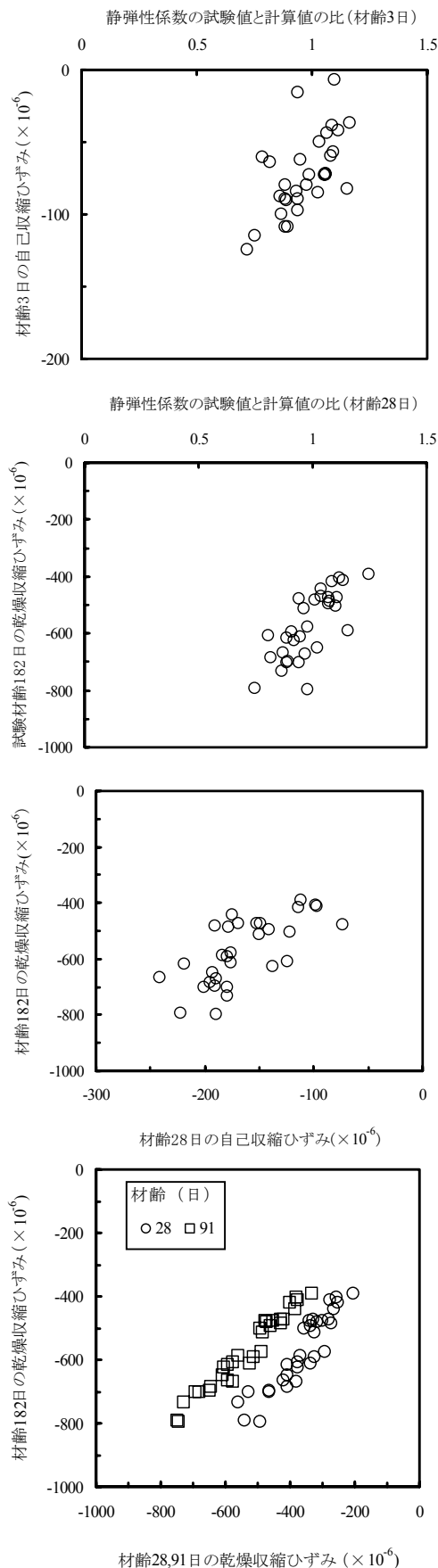


図-9 各試験値間の関係