

乾燥を受ける早強コンクリートのひび割れ抵抗性に影響を与える 配合要因に関する検討

Influence of Composition on Cracking Resistance of Early-Strength Concrete in Drying Condition

佐々木 亘 WATARU SASAKI
谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

PC 上部工で用いられる設計基準強度 40 N/mm² 程度の早強コンクリートのひび割れ抵抗性に影響を与える配合要因について検討するために、粗骨材量または細骨材量を変化させたコンクリートを用いて、水中および気中養生下における圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、鉄筋拘束による収縮応力、ならびに自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみを測定した。その結果、1) 圧縮強度およびひび割れ発生材齢には粗骨材量の影響が大きい。2) 静弾性係数、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみおよび鉄筋拘束試験におけるひび割れ発生応力には単位ペースト絶対容積の影響が大きい。3) 収縮によるひび割れに対する抵抗性を高めるためには単位ペースト絶対容積を小さくするのが効果的であることなどが分かった。

キーワード：ひび割れ抵抗性、収縮応力試験、単位粗骨材絶対容積、単位ペースト絶対容積

This paper is meant as study of the influence of composition on cracking resistance of early-strength concrete for PC members and describes the examination results of compressive strength, Young's modulus, split tensile strength, shrinkage stress, autogenous shrinkage and drying shrinkage of early-strength concrete, where varying quantity of unit coarse or fine aggregate as parameters. The design strength of this concrete was about 40 N/mm² for PC superstructures. As a result, the followings were obtained; 1) The content of coarse aggregate has significant influence on compressive strength and cracking age in restraint test with reinforcement. 2) The volume content of cement paste has significant influence on Young's modulus, autogenous shrinkage, drying shrinkage and cracking stress in restraint test with reinforcement. 3) It is effective to make the volume of cement paste small to improve the resistance for shrinkage crack.

Key Words: Cracking Resistance, Shrinkage Stress Test, Absolute Volume of Unit Coarse Aggregate, Absolute Volume of Unit Cement Paste

1. はじめに

コンクリート構造物を長期的に供用するためには、ひび割れの発生を抑制し、発生後にはその幅を制御することが重要である。最近では、天然骨材の品質低下に起因するコンクリートの収縮ひずみの増加とそれに伴うひび割れの発生が問題となり、学協会においてさまざまな議論がなされた¹⁾。一方、コンクリート構造物の高耐久化を目的として、材料としてのコンクリートにもさまざまな性能が要求され、例えば高流動コンクリートや短繊維補強コンクリートのように、多様な材料や配合のコンクリートが従来にも増して使用されるようになってきてい

る。したがって、このようなコンクリートの多様な配合変化に起因するひび割れ抵抗性の変動を把握することは、コンクリート構造物の高耐久化に資するものとして重要であると考えられる。

本稿では、基礎的な検討として、PC 上部工で用いられる設計基準強度 40 N/mm² 程度の早強コンクリートのひび割れ抵抗性に与える骨材量などの配合要因の影響について把握することを目的とし、水セメント比一定の条件で粗骨材量または細骨材量を変化させたコンクリートを作製し、鉄筋拘束による収縮応力、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度の測定を行った。

表-1 使用材料

材料	種類, 物性など	記号
水	水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm ³ , 比表面積 4610 cm ² /g)	C
細骨材	山砂 (表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.90%) と砕砂 (硬質砂岩, 表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 1.68%) を容積割合 4:6 で混合	S
粗骨材	砕石 2005 (硬質砂岩, 密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 0.96%)	G
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP
	AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)	AE

表-2 コンクリートの配合

記号	水セメント比 W/C (%)	モルタル 細骨材 容積比 s/mor	細骨材率 s/a (%)	単位 ペースト 絶対容積 (m ³ /m ³)	単位 粗骨材 絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
						W	C	S	G	
H40	40	0.453	43.0	0.297	0.375	165	413	740	990	0.7
G300	40	0.453	51.4	0.338	0.300	188	470	828	792	0.6
G200	40	0.454	64.5	0.392	0.200	218	545	949	528	0.6
G0	40	0.453	100	0.502	0.000	279	698	1185	0	0.6
G0-2	40	0.552	100	0.403	0.000	224	560	1443	0	0.6

2. 実験概要

(1) コンクリートの条件

コンクリートの使用材料を表-1, 配合を表-2 に示す。

以下, 各配合については, 表-2 に記載した記号で呼ぶ。

また, 各材料の単位量を記号で表す場合は, 表-1 の記号を用いて質量を大文字, 容積を小文字で表す。

コンクリートの配合は設計基準強度 40 N/mm² 程度の PC 上部工で用いられるコンクリートを想定し, 水セメント比は 40% とした。使用したセメントは早強ポルトランドセメントである。細骨材には山砂と砕砂を容積比率 4:6 で混合したものを, 粗骨材には砕石 2005 を使用した。一般のコンクリートを想定した基本配合である H40 の単位水量は 165 kg/m³, 単位粗骨材絶対容積は 0.375 m³/m³ である。G300, G200 および G0 は, H40 に対してモルタル細骨材容積比 (s/mor, mor = w+c+s) を一定とし, 単位粗骨材絶対容積を変化させた。G300, G200 および G0 の単位粗骨材絶対容積は, それぞれ, 0.300 m³/m³, 0.200 m³/m³, 0.000 m³/m³ である。G300 は高流動コンクリート, G200 は短繊維補強コンクリートで想定される単位粗骨材絶対容積としている。G0-2 は G0 と同様に単位粗骨材絶対容積が 0.000 m³/m³ のモルタル配合であるが, 細骨材量の影響を検討するため s/mor を 0.1 程度増加させ, 単位ペ

ースト絶対容積を G200 と同程度としたものである。高性能 AE 減水剤の使用量は流動性に応じて調整などは行わずほぼ一定とし, AE 剤については空気量の目標値を 4.5±0.5% として, その使用量を調整した。

(2) 測定項目および方法

a) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度は φ100×200 mm の円柱供試体を使用し, JIS A 1108 「コンクリートの圧縮試験方法」に準じて測定を行った。養生方法は標準水中養生および後述する鉄筋拘束試験と同様の養生 (以下, 鉄筋拘束同一養生と呼ぶ) とした。鉄筋拘束同一養生は打込み直後から材齢 7 日まで封かん養生とし, 材齢 7 日以降は温度 20℃湿度 60% の恒温恒湿室に存置した。測定は材齢 7 日, 28 日, 91 日で行った。また, コンプレッソメータを用いて, 圧縮強度と同時に静弾性係数の測定も行った。静弾性係数の測定は JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて行った。

b) 割裂引張強度

割裂引張強度は φ100×200 mm の円柱供試体を使用し, JIS A 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて測定を行った。養生方法は標準水中養生および鉄筋拘束同一養生である。測定材齢は標準水中養生では 7 日, 28 日, 91 日, 鉄筋拘束同一養生では 7 日, 14 日, 28 日,

91日とした。

c) 鉄筋拘束試験による収縮応力

鉄筋拘束試験を実施し、収縮応力の測定を行った。鉄筋拘束試験は JCI「コンクリートの自己収縮応力測定方法」²⁾を参考に、打込み直後から材齢 7 日まではポリエステルフィルムにより封かん状態、材齢 7 日で脱型した後は温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置し、6 面乾燥状態で測定を行った。供試体は 100×100×1500 mm であり、断面中央に鉄筋の長さ方向の中心 300 mm の範囲で節を取り除きコンクリートとの付着を切った D32 鉄筋を設置し、鉄筋中央部のひずみからコンクリートに生じる応力を算定した。供試体数は 2 体とした。

d) 収縮ひずみ

収縮ひずみについては、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみおよび鉄筋拘束同一養生における自由収縮ひずみの測定を行った。

自己収縮ひずみの測定は、JCI「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」³⁾に準じて行った。100×100×400 mm の角柱供試体を使用し、供試体中央に設置した埋込みひずみ計により測定を行った。供試体は打込み直後よりポリエステルフィルムにより封かん状態とし、材齢 1 日で脱型した後はアルミ箔テープにより封かん状態とした。

また、供試体は温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置し、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ として温度ひずみの補正を行った。

乾燥収縮ひずみの測定は 100×100×400 mm の角柱供試体を使用し、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第 2 部：コンタクトゲージ方法」および付属書 A「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ測定方法」に準じて行った。

鉄筋拘束同一養生における自由収縮ひずみの測定は、100×100×400 mm の角柱供試体を使用し、供試体中央に設置した埋込みひずみ計により行った。鉄筋拘束試験と同様に打込み直後よりポリエステルフィルムにより封かん状態とし、材齢 7 日で脱型した後は温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室内に存置し、6 面乾燥状態とした。

収縮ひずみの測定では、いずれの試験も供試体数は 2 体とした。

3. 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

図-1 に単位粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係を示す。図中のいずれの条件でも、単位粗骨材絶対容積が $0.300 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以下の範囲では単位粗骨材絶対容積が大きくなると圧縮強度は小さくなる傾向がみられた。しかし、単位

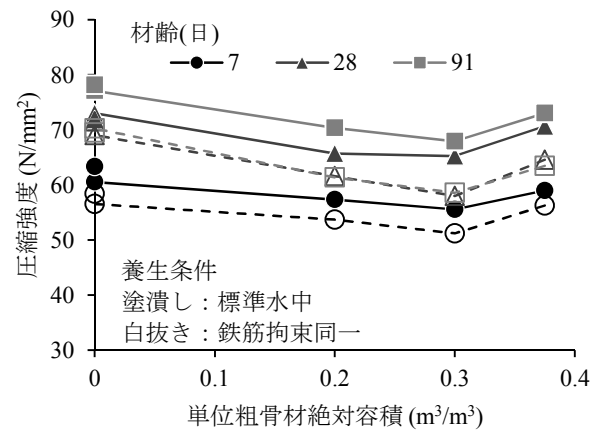


図-1 単位粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係

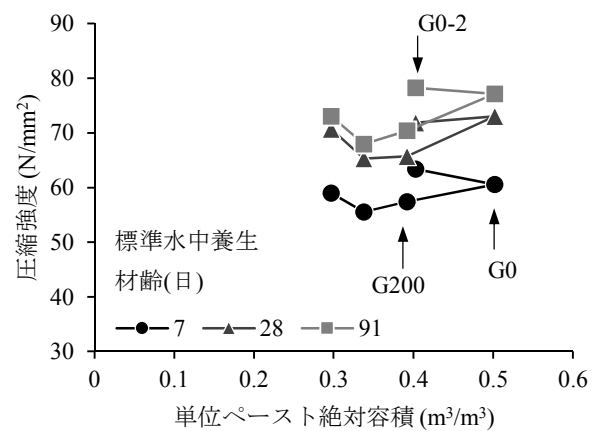


図-2 単位ペースト絶対容積と圧縮強度の関係

粗骨材絶対容積を $0.375 \text{ m}^3/\text{m}^3$ に増加させると、圧縮強度が増加に転じている。

圧縮強度が材齢 7 日まで封かん養生、材齢 7 日以降気中養生である鉄筋拘束同一養生での圧縮強度は、全体的な傾向は標準水中養生と同様であるが、いずれの材齢においても標準水中養生より小さく、特に、材齢 28 日以降の強度増進が認められない。

図-2 は単位ペースト絶対容積と圧縮強度の関係を示したものである。図中の各プロットを結ぶ線は、表-2 に示した配合順にプロットを結んだものである。養生方法によって傾向に差異は見られなかったため、この図では標準水中養生のみ示している。G0 に対して G0-2 の圧縮強度は低下しておらず、単位ペースト絶対容積が同程度である G200 と G0 の比較から、圧縮強度の低下は粗骨材量の増加によって生じていることが推察される。

(2) 静弾性係数

単位粗骨材絶対容積と静弾性係数の関係を図-3、単位ペースト絶対容積と静弾性係数の関係を図-4 に示す。図-3 より、単位粗骨材絶対容積が大きいほど静弾性係数も

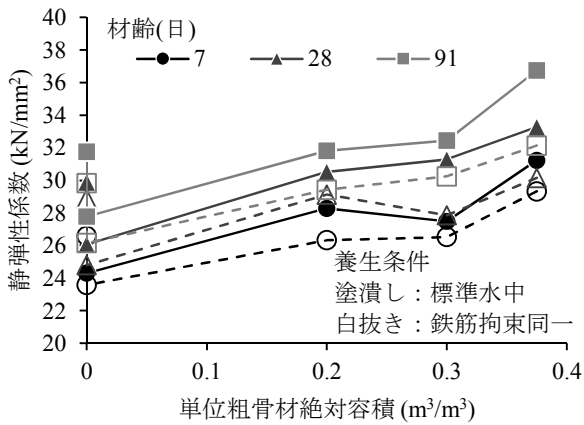


図-3 単位粗骨材絶対容積と静弾性係数の関係

大きくなっているが、単位粗骨材絶対容積 $0.000 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の2つのモルタル配合に着目すると、これらの静弾性係数の差異は比較的大きい。図-4によれば、条件によっては単位ペースト絶対容積が $0.338 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (配合 G300) で極小値をとる場合も見られるが、全体的な傾向としては、単位ペースト絶対容積が小さくなるほど静弾性係数は大きくなる傾向にある。単位ペースト絶対容積 $0.400 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 付近にプロットされる G200 と G0-2 の結果に大差がなく、静弾性係数に影響を与える要因としては単位ペースト絶対容積が支配的であった。すなわち、本実験で用いた骨材では、粒径の違いが静弾性係数に与える影響の度合いに、差異はほとんど見られなかった。

(3) 割裂引張強度

単位粗骨材絶対容積と割裂引張強度の関係を図-5、単位ペースト絶対容積と割裂引張強度の関係を図-6に示す。圧縮強度や静弾性係数の場合と異なり、単位粗骨材絶対容積や単位ペースト絶対容積が割裂引張強度に与える影響について、明確な傾向は見出せなかった。標準水中養生と鉄筋拘束同一養生の比較についても、鉄筋拘束同一養生は標準水中養生に比べて割裂引張強度が小さい傾向はみられるものの、圧縮強度や静弾性係数のように明確な低下傾向は見られなかった。さらに、割裂引張強度は、鉄筋拘束同一養生だけでなく、標準水中養生であっても、必ずしも材齢の経過に伴って強度の増進がみられないことが分かる。

(4) 収縮ひずみ

単位粗骨材絶対容積と各種収縮ひずみの関係を図-7、単位ペースト絶対容積と各種収縮ひずみまたは乾燥収縮ひずみの関係を図-8に示す。図-7よりいずれの収縮ひずみも単位粗骨材絶対容積が大きくなるほど小さくなる事が分かる。しかし、図-8では、単位ペースト絶対容積

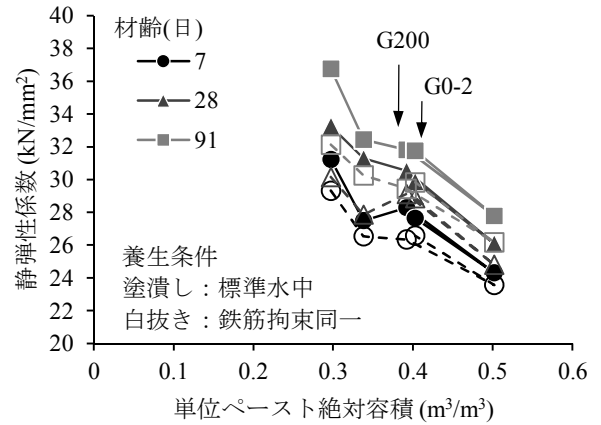


図-4 単位ペースト絶対容積と静弾性係数の関係

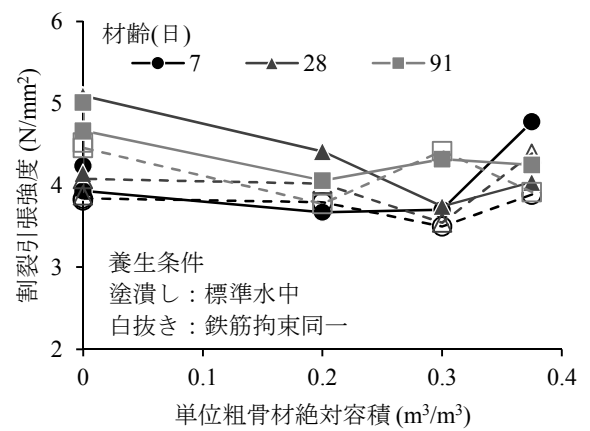


図-5 単位粗骨材絶対容積と割裂引張強度の関係

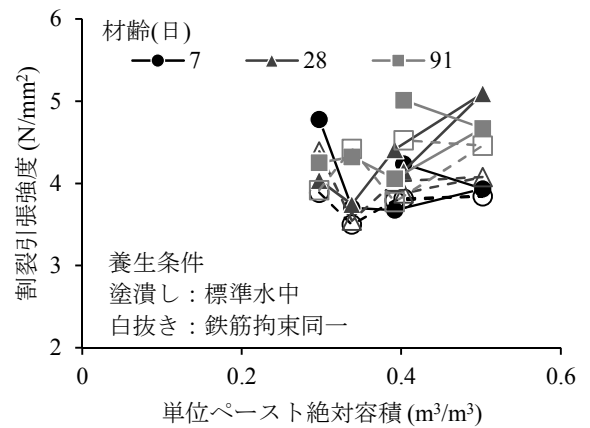


図-6 単位ペースト絶対容積と割裂引張強度の関係

が小さくなるほど収縮ひずみも小さくなっており、単位ペースト絶対容積 $0.400 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 付近にプロットされる G200 と G0-2 の結果に大差がないことから、収縮ひずみに対しては静弾性係数の場合と同様に単位ペースト絶対容積の影響が支配的であり、細骨材と粗骨材の違いが収縮ひずみに与える影響の度合いに差異はほとんど見られないことが分かった。

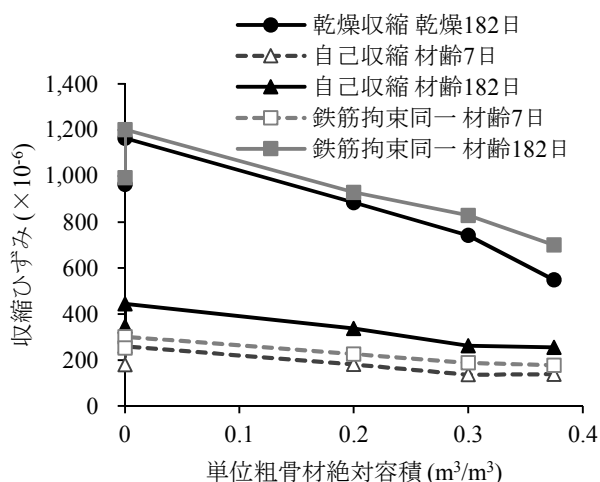


図-7 単位粗骨材絶対容積と収縮ひずみの関係

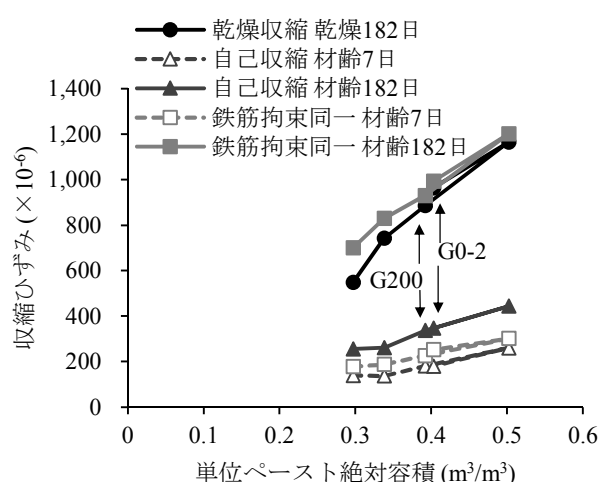


図-8 単位ペースト絶対容積と収縮ひずみの関係

表-3 鉄筋拘束試験におけるひび割れ発生材齢およびひび割れ発生応力

配合	ひび割れ発生材齢 (日)	ひび割れ発生応力 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	応力強度比
H40	18.7	3.51	3.98	0.88
G300	16.2	2.59	4.13	0.63
G200	13.0	2.43	4.12	0.59
G0	8.3	1.98	3.84	0.52
G0-2	8.5	2.21	3.82	0.58

鉄筋拘束同一養生の収縮ひずみに関して、材齢7日まででは封かん状態としているため、自己収縮ひずみを測定していることになるが、図-7 および図-8 より、材齢7日の自己収縮ひずみと鉄筋拘束同一養生の収縮ひずみを比較すると、鉄筋拘束同一養生の収縮ひずみのほうが 50×10^{-6} 程度大きい。自己収縮試験では材齢1日で脱型し、アルミ箔テープによる封かん養生を実施しているが、鉄筋拘束同一養生では材齢7日まで脱型をせず、ポリエステルフィルムによる封かん養生としており、このような封かん養生の違いが、計測された収縮ひずみの差異を生じさせたものと考えられる。

一方、鉄筋拘束同一養生における材齢7日以降は乾燥収縮ひずみの測定と同条件である。したがって、材齢7日以降の鉄筋拘束同一養生による収縮ひずみは、材齢7日までの自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを足し合わせたものになると考えられる。すなわち、乾燥期間が同程度である乾燥収縮ひずみと鉄筋拘束同一養生による収縮ひずみを比較すると、材齢7日までの自己収縮ひずみの分だけ、鉄筋拘束同一養生による収縮ひずみが大きくなると考えられる。しかし、図-7 および図-8 より、乾燥182日の乾燥収縮ひずみと材齢182日の鉄筋拘束同一養生の収縮ひずみを比較すると、材齢7日までの自己収縮

ひずみである、 200×10^{-6} 程度の差は生じていない。材齢7日での乾燥開始までの養生が、乾燥収縮試験では標準水中養生であるのに対して鉄筋同一養生では封かん養生であるため、乾燥収縮試験の供試体のほうが乾燥開始時に湿潤状態にあるものと考えられる。したがって、乾燥収縮試験の供試体のほうが、乾燥環境に置かれてから逸散しうる水の量が多く、材齢7日以降では、乾燥収縮試験での収縮ひずみのほうが大きくなったため、乾燥182日の乾燥収縮ひずみと材齢182日の鉄筋拘束同一養生の収縮ひずみの差が小さくなったものと推察される。また、乾燥収縮試験ではコンタクトゲージ法によって表面のひずみを測定しているが、鉄筋拘束同一養生による収縮ひずみは埋め込みゲージで測定している。乾燥は供試体表面から進行するため、このような測定方法の違いが収縮ひずみの測定値に影響している可能性も考えられる。

(5) 鉄筋拘束試験による収縮応力

鉄筋拘束試験では、材齢7日で脱型し乾燥環境下に置いた後、すべての供試体でひび割れが発生した。表-3 にひび割れ発生時の材齢とそのときの鉄筋ひずみから算出したコンクリートに生じた引張応力（ひび割れ発生応力と称す）を示す。また、表-3 には、各配合におけるひび

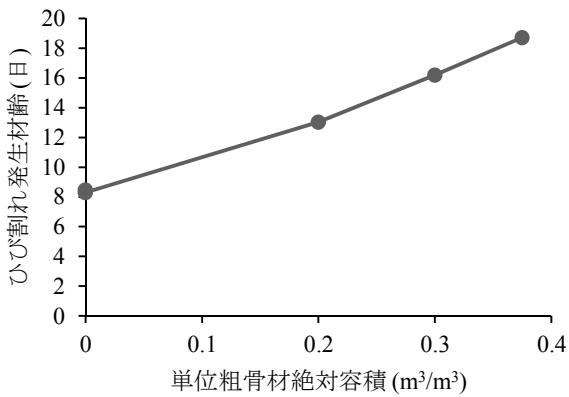


図-9 単位粗骨材絶対容積とひび割れ発生材齢の関係

割れ発生材齢に近い材齢で測定された、鉄筋拘束同一養生での割裂引張強度、ならびに、ひび割れ発生応力と割裂引張強度の比（応力強度比と称す）も併せて示している。なお、表-3に併記した鉄筋拘束同一養生での割裂引張強度の測定材齢は、H40、G300およびG200が14日、G0およびG0-2は7日である。

図-9は単位粗骨材絶対容積とひび割れ発生材齢の関係を示している。単位粗骨材絶対容積を減じるとひび割れ発生材齢は直線的に小さくなった。単位粗骨材絶対容積0.000 m³/m³にプロットされているG0およびG0-2のひび割れ発生材齢にほとんど差異がないことから、ひび割れ発生材齢に与える単位ペースト絶対容積の影響は小さく、単位粗骨材絶対容積の影響が支配的であることが分かった。

図-10は単位ペースト絶対容積とひび割れ発生応力および応力強度比との関係を示したものである。ひび割れ発生材齢の場合と異なり、単位ペースト絶対容積0.400 m³/m³付近にプロットされているG200およびG0-2のひび割れ発生応力ならびに応力強度比の差異が小さく、単位ペースト絶対容積が小さくなるに従って、ひび割れ発生応力および応力強度比は増加している。したがって、ひび割れ発生応力および応力強度比に対しては細骨材と粗骨材の違いが与える影響は小さく、単位ペースト絶対容積の影響が支配的であるといえる。

また、ひび割れ発生応力と応力強度比が単位ペースト容積の変化に対して同様の挙動を示しているが、これは表-3に示した通り、ひび割れ発生時の割裂引張強度は配合による差異が小さいためである。したがって、単位ペースト絶対容積を小さくすることで、割裂引張強度は大きく変化はしないがひび割れ抵抗性を高めることができる。水セメント比が一定の条件下で単位ペースト絶対容積を小さくすることは、すなわち単位水量を小さくすることを意味する。

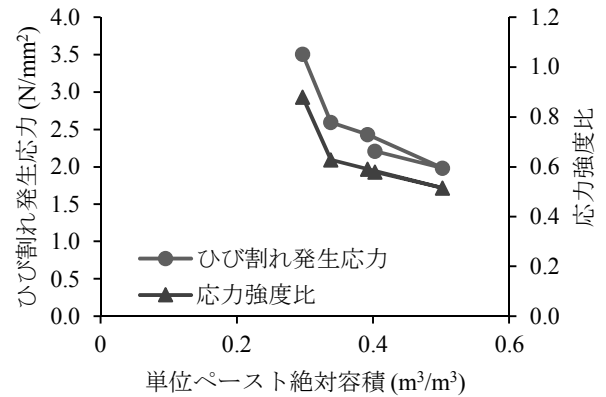


図-10 単位ペースト絶対容積とひび割れ発生応力および応力強度比との関係

4. まとめ

水セメント比40%一定の条件で粗骨材量または細骨材量を変化させたコンクリートを作製し、鉄筋拘束による収縮応力、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度の測定を行った結果、以下の知見を得た。

- ① 圧縮強度および鉄筋拘束試験におけるひび割れ発生材齢は粗骨材量の影響が支配的であり、単位粗骨材絶対容積が0~0.300 m³/m³の範囲では粗骨材量を増加させると圧縮強度は低下する傾向にあるが、粗骨材量が大きくなるとひび割れ発生材齢も大きくなる。
- ② 静弾性係数、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみおよび鉄筋拘束試験におけるひび割れ発生応力は単位ペースト絶対容積の影響が支配的であり、細骨材と粗骨材の違いが与える影響は小さい。単位ペースト絶対容積を減じると自己収縮および乾燥収縮ひずみは小さくなり、静弾性係数およびひび割れ発生応力ならびに応力強度比は大きくなる。
- ③ 収縮によるひび割れに対する抵抗性を高めるためには、単位ペースト絶対容積を小さくすることが効果的であり、粗骨材量を多くするとひび割れ発生材齢が大きくなる。

参考文献

- 1) 例えば、日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題とその対応—委員会報告，2010.3
- 2) 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
- 3) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），1994.5