

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

三井住友建設(株) 正会員 修士(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

1. はじめに

PC橋の建設には, 設計基準強度が 40N/mm²程度で, 早強ポルトランドセメントを使用した硬練り(スランブが 8~12cm程度)のコンクリート(以下, PC用コンクリートと称す)が多用される。PC分野の研究開発の主体は, グラウトを除けば, その特徴であるPC構造にある場合が多く, コンクリート標準示方書¹⁾においてもPC用コンクリートの材料・施工に関する記載は少ない。最近, 建築分野では, 設計基準強度 100N/mm²以上の高強度コンクリートの施工実績も見られるようになり, 設計基準強度 40N/mm²は一般的なものと見なされがちである。しかし, 1997年以前までJASS 5²⁾で扱っていた高強度コンクリートの設計基準強度は約 27N/mm²(270kgf/cm²)以上約 36N/mm²(360kgf/cm²)以下で, 現在でも設計基準強度 36N/mm²を超えるものから高強度コンクリートの対象とし, 材料・施工に対する様々な検討が行われている。さらに, 建築分野での高強度コンクリートの発展は, 都市部での超高層建築物の柱部材への適用によるものである。これに比べ, PC橋の建設では, 都市部から離れ, 製造実績が少ないレディーミクストコンクリート工場(以下, 生コン工場と称す)を使用する機会が多いこと, 施工時から供用後に至るまで, 通風, 日射等により乾燥の影響を受けやすい環境・部材であることなど, 建築工事に比べて厳しい条件である。早強ポルトランドセメントの生産量はセメント全体の数%に過ぎないことも踏まえれば, 他工種ではほとんど使用されない特殊な配慮を必要とするコンクリートと言える。そのため, 施工の計画・作業段階における十分な検討が重要であり, 筆者らが行ってきたPC用コンクリートの仕上げや養生の検討^{3, 4)}もその一つである。

本論文では, PC用コンクリートの配合に着目し, まず, 生コン工場の配合の実態を把握し, これを踏まえた上で, 配合条件と圧縮強度および収縮の関係に着目した実験的検討を行った。

2. 生コン工場における PC 用コンクリートの配合の実態

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会が, PC用コンクリートの配合の調査結果をすでに報告している⁵⁾。しかし, 同報告により全般的な傾向は把握できるものの, 個別の単位水量や水セメント比等を直接確認できないので, ここでは, 筆者らが調査した生コン工場の標準配合(2005年3~5月, 全国の72工場データ)をもとに, PC用コンクリートの配合の実態に対する考察を行った。ここで, 標準配合とは各工場がJIS A 5308に対応する配合として用意したもので, 施工者が単位水量等の変更を指示し, 修正した配合を含まない。

全国の配合の評価としては十分なデータ数ではないが, 図-1および図-2により, PC用コンクリートの配合の現状をおおむね把握できる。すなわち, 呼び強度 40 (JIS A 5308 に準じて単位は省略する)でスランブ 8cmのAE減水剤を使用したPC用コンクリートの配合は, 図-1に示すとおり, 単位水量が 155~186kg/m³, 単位セメント量が 405~543kg/m³, 水セメント比が 30.0~40.7%の広い範囲を有することがわかる。スランブ 8cmであってもコンクリート標

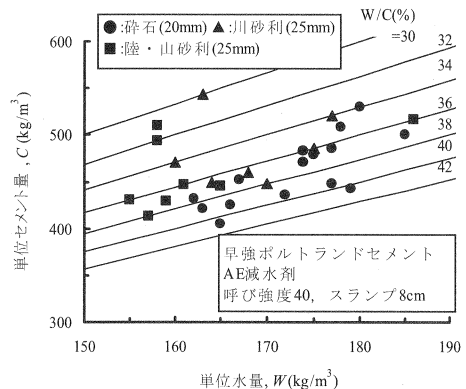


図-1 呼び強度 40, スランブ 8cm の AE 減水剤を使用したコンクリートの単位水量, 単位セメント量および水セメント比の関係

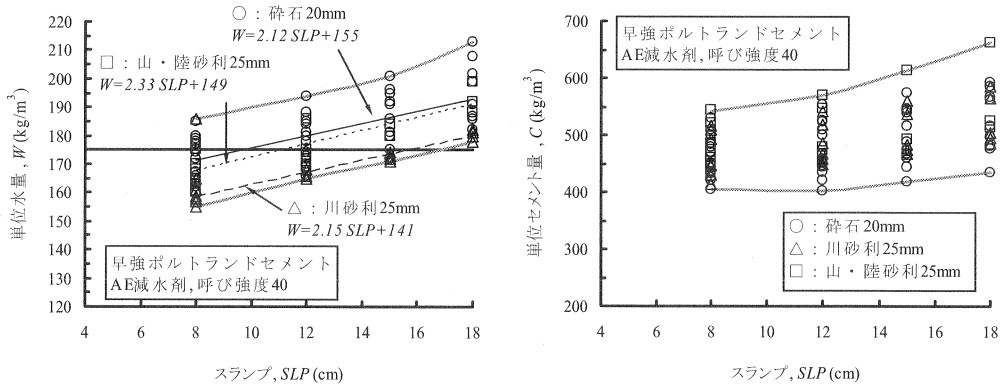


図-2 呼び強度 40 の AE 減水剤を使用したコンクリートのスランブと単位水量および単位セメント量の関係

準示方書¹⁾が定める単位水量の上限値 175kg/m³を超える配合を標準とした生コン工場が存在する。その一方で、単位水量が 160kg/m³前後と比較的少ない条件であっても、水セメント比が小さいことにより単位セメント量が 500kg/m³程度となる配合も存在する。すなわち、温度応力等に考慮して単位セメント量の低減を図る場合には、単位水量と水セメント比の双方の設定値に対して何らかの対策を講じる必要がある。

昨今は、配筋量の増加等に伴い、スランブ 8cm よりも大きな値に変更することが増えている⁵⁾。図-2 に示すとおり、単位水量はスランブ 1cm 当たり 2kg/m³程度変化するので、スランブを大きくする場合には高性能 AE 減水剤の使用等の対策を講じる必要がある。しかし、スランブ 15, 18cm の単位水量が 200kg/m³、単位セメント量が 600kg/m³ を超える配合を標準とする生コン工場も存在し、必ずしも高性能 AE 減水剤の使用のみで十分であるとは限らない。調査結果では、高性能 AE 減水剤を使用した場合であっても、単位水量が 177~195kg/m³ となる配合を使用している生コン工場が確認されている。

このように、生コン工場の配合には、経験あるいは研究に基づく判断を超える設定のものが存在する。現状では、施工計画段階になって生コン工場から提示された配合を確認し、各現場の判断により対策（高性能 AE 減水剤の使用、温度応力の各種対策等）を講じている。しかし、施工作业・維持管理の段階における不具合の発生確率を低減するためには、できるだけ早期の段階（できれば設計段階）に配合等の実態とその影響度を把握した上で、適切な対策を講じた設計・施工計画が行われるのが望ましい。

3. PC 用コンクリートの配合条件が圧縮強度に及ぼす影響

3.1 目的

単位セメント量の増加は、初期の高温履歴によって構造物内部のコンクリートの圧縮強度を供試体の圧縮強度よりも低下させる可能性がある。コンクリート標準示方書¹⁾では、設計基準強度 60N/mm² 以上の高強度コンクリートに対して、その影響を考慮した割増し係数 β_1 を設けている。図-1 に示したとおり、呼び強度 40 であっても設計基準強度 60N/mm² に近い配合（水セメント比が 30% 程度の配合、単位セメント量が 500kg/m³ を超える配合等）が存在する。また、割増し係数 β_1 の過大な設定は、水セメント比の低下および単位セメント量の増加を一層助長させる。そのため、材料、配合等に応じた割増し係数 β_1 を事前に確認し、適切に定める必要がある。本章では、試験室で得られるセメント水比と圧縮強度の関係から、2. で示した生コン工場の水セメント比の評価を行った後、断熱試験体を用いて割増し係数 β_1 を確認した。

3.2 実験方法

セメントには早強ポルトランドセメント（密度 3.14g/cm³）と普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を使用した。細骨材は鬼怒川産川砂（表乾密度 2.58g/cm³）と葛生産砕砂（表乾密度 2.64g/cm³）の混合砂（容積

比1:1), 粗骨材は葛生産砕石 2005(表乾密度 2.65g/cm³)である。スランブは、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)の使用量により8~23cmの範囲で、水セメント比が小さくなるほど大きくした。配合は、表-1に示すとおり、水セメント比(W/C)を25~55%とし、30%と40%に対しては単位水量(W)および単位セメント量(C)が異なるものを加えた。水セメント比30, 25%の単位粗骨材絶対容積(Vg)は、フレッシュ性状から判断して他の配合よりも減じた。空気量の目標値は水セメント比25%を除いて4.5%とし、コンクリートの練上り温度は約20℃に調整した。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	(kg/m ³)		Vg (m ³ /m ³)	空気量(%)		
	W	C		目標値	早強	普通
25	160	640	0.350	3.0	2.2	2.3
30	150	500	0.370	4.5	3.5	3.6
30	170	567	0.370	4.5	3.7	4.5
40	150	375	0.385	4.5	4.5	4.0
40	170	425	0.385	4.5	4.5	3.6
40	185	463	0.385	4.5	3.6	3.7
55	170	309	0.385	4.5	3.5	3.6

断熱試験体は、コンクリートブロック(立方体、一辺の長さ500mm)の全面を断熱材(厚さ200mm)で覆ったもので、その中心部と断熱材に接する端部に設置した熱電対によりコンクリート温度を測定した。寸法と数量の制約により、試験体は屋外(1月に打込み)に設置した。そのため、積算温度が20℃環境下よりも下回ることがないように、最高温度からの温度低下曲線の変化が小さくなった材齢21日にすべてのコアを採取し、それ以降は20℃の養生室内で封緘養生を行った。図-3は、試験体の中心部における材齢21日までの温度履歴の一例である。コア抜きはなるべく中心に近い位置(ただし、中心部と端部の最高温度の差は最大1℃程度)で、上面から下向きに行った。上下の端部を切断してコア供試体(φ100×200mm, 1条件当たり3本)とし、材齢28, 91日の圧縮強度を測定した。また、断熱試験体への打込み時に採取したコンクリートを使用し、材齢3, 7, 28, 91日まで標準水中養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)の圧縮強度を測定した。

3.3 実験結果

早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートのセメント水比と圧縮強度(標準水中養生による)の関係を、図-4に示す。セメント水比4.0(水セメント比25%)は空気量の設定値が異なるものの、その影響がほとんど見られないので、これを含めて直線回帰を行った。圧縮強度の保証材齢を7日とし、変動係数を10%程度見込んで、試験結果に基づく呼び強度40の水セメント比は43%程度となり、図-1に示した生コン工場における水セメント比(30~41%)は小さい。すなわち、同一の設計基準強度(呼び強度)を想定しても、研究レベルから判断される水セメント比と生コン工場の水セメント比にはかなり違いがある。

断熱試験体から採取したコア供試体の積算温度は、図-5に示すように同一材齢の標準水中養生供試体よりも大きく、コア供試体の圧縮強度が標準水中養生供試体の値を下回る条件でない。しかし、図-6に示すとおり、いずれのセメントにおいても材齢28日の圧縮強度比C28/S28の平均値は1.0を下回っており、割増し係数β_sを設けて適切な値を定める必要があるものと判断される。また、最高温度が60℃を超える範囲では最高温度と圧縮強度比の関係は明確ではないが、55℃の圧縮強度比を考慮すると、材齢28日, 91日ともに普通

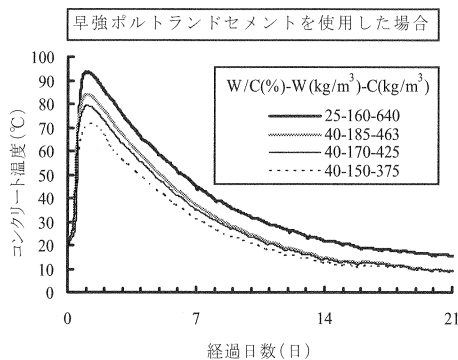


図-3 断熱試験体の中心部における温度履歴の一例

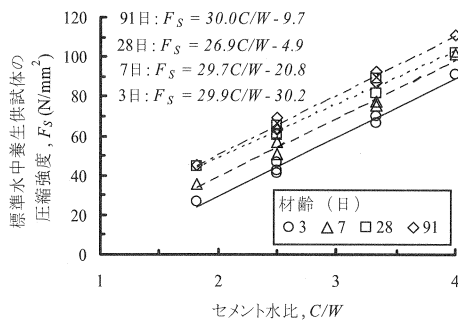


図-4 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係

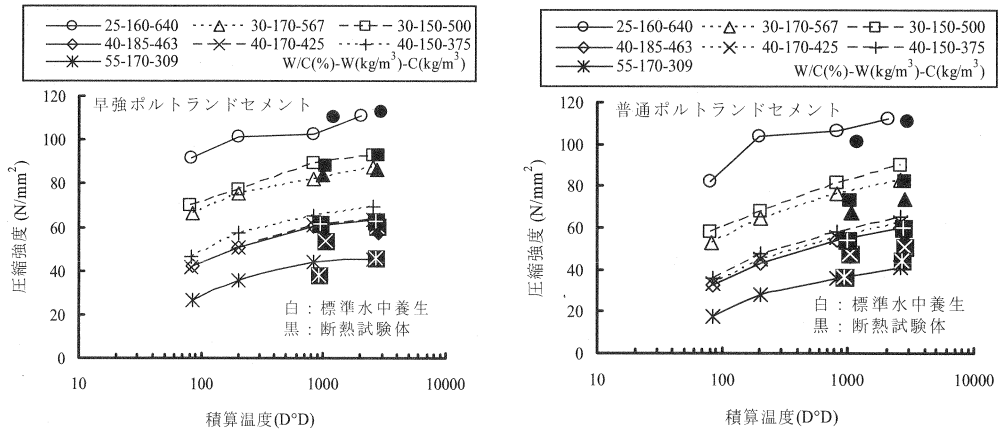


図-5 積算温度と圧縮強度の関係

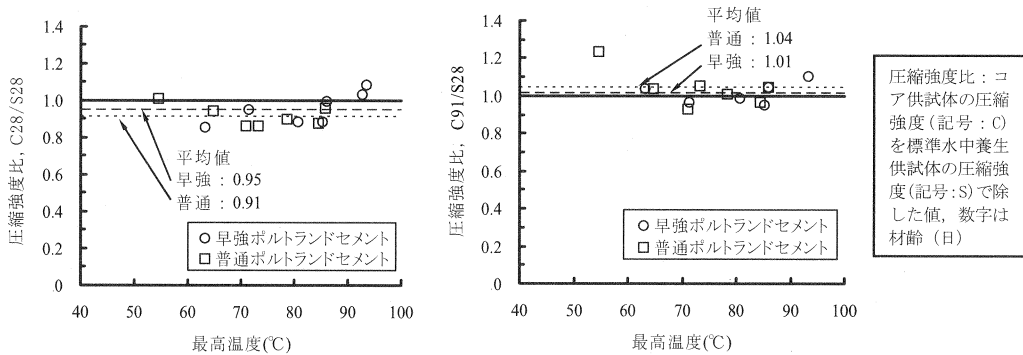


図-6 最高温度と圧縮強度比の関係

ポルトランドセメントでは最高温度の上昇に伴い、圧縮強度比が低下する傾向が認められる。

圧縮強度比 C_{91}/S_{28} はいずれも平均 1.0 であるため、供試体の管理材齢 (28 日) の時点で構造物のコンクリートが設計基準強度を満足しなくても良い場合には、割増し係数 β_1 は 1.0 に近い値でも支障がないものと判断される。ただし、データ数が少ないことや試験結果にはばらつきがあるほか、製造時の割増し係数、実構造物の最高温度や積算温度等も考慮し、対象構造物のコンクリートに対する割増し係数 β_1 の値を適切に定める必要がある。

4. PC用コンクリートの配合条件が収縮および収縮ひび割れに及ぼす影響

4.1 実験の目的および方法

本章では、生コン工場の単位水量および単位セメント量が大きい場合の影響の一つとして、PC用コンクリートの収縮量の増大に着目し、配合条件が収縮および収縮ひび割れに及ぼす影響を調べた。収縮ひずみは、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を使用し、埋込み型ひずみ計で測定を行った。また、鉄筋拘束試験体によって自己・乾燥収縮によるひび割れ発生日数とひび割れ発生時の引張応力を確認した。鉄筋拘束試験体は、日本コンクリート工学協会「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)」⁹⁾を参考に、中央 300mm範囲のリップ等を除いた鉄筋D32を供試体 ($100 \times 100 \times 1500$ mm) の中心に設けたものを使用した。その中央部にはひずみゲージと熱電対を貼り付け、コンクリートとの縁取りを行った。今回の実験では、いずれの供試体も材齢 1 日から乾燥を開始させた。同一養生条件の割裂引張強度試験 (直径 150mm, 高さ 200mm) を実施した。

使用材料は、基本的に3.と同様であるが、表-2に示す配合のうち、単位水量が多い配合H40UはAE減水剤に変更し、配合H40UUはAE剤のみを使用した。水セメント比は40%を中心に、30%、55%を比較した。単位粗骨材絶対容積は、3.と同様に $0.385\text{m}^3/\text{m}^3$ としたが、高流動コンクリート程度の値を想定し、 $0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ まで減じた配合を追加した。

4.2 実験結果

単位粗骨材絶対容積を $0.385\text{m}^3/\text{m}^3$ としたコンクリートの収縮ひずみの結果を、図-7に示す。なお、収縮ひずみの測定の起点は、凝結の始発とした。材齢300日における収縮ひずみは配合H40Dと配合H40では 100×10^{-6} 程度の差があり、単位水量の減少による収縮低減効果が認められる。一方、配合H40と配合H40Uの収縮ひずみはほぼ同値で、単位水量 $15\text{kg}/\text{m}^3$ の差が結果に反映されていない。コンクリート標準示方書⁷⁾により計算した乾燥収縮ひずみは、3配合の単位水量の範囲では材齢300日で 10×10^{-6} 程度である。単位水量の減少により単位セメント量が少なくなるので、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの低減が期待されるが、配合条件によっては明確に収縮低減の効果が見られない場合もあるので、事前の確認が必要である。

配合H30は単位セメント量の影響により自己収縮の増加に伴う初期収縮ひずみ、配合H55は単位水量の影響により長期的な乾燥収縮ひずみが多いが、材齢300日の収縮ひずみでは水セメント比の違いによる明確な差異は認められない。なお、配合N40の収縮ひずみは配合H40よりも若干小さくなる程度である。

図-8は、単位水量、水セメント比および単位粗骨材絶対容積を指標としてひび割れ発生日数を比較したものである。単位水量が $150 \sim 200\text{kg}/\text{m}^3$ の広い範囲で見れば、その増加に伴ってひび割れ発生日数は短くなっており、単位水量の低減が収縮ひび割れを抑制する上で重要であることがわかる。ただし、単位水量が $170\text{kg}/\text{m}^3$ と $185\text{kg}/\text{m}^3$ の狭い範囲では、その傾向は収縮ひずみと同様に明確ではない。配合H40Dは、収縮ひずみ、収縮ひび割れ発生日数ともに効果が認められたものの、スランブ試験時に片崩れを生じる砂利っぽい状態であり、実際に工事で使用する場合には単位粗骨材絶対容積を減じる(細骨材率を上げる)必要がある。配合H30に関して、施工性を考慮してスランブ(フロー)を大きくした場合には単位粗骨材絶対容積を減じることになる。しかし、単位粗骨材絶対容積を $0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ に減じた場合(配合H40G、H40HG、H40DG)には、単位水量の効果は認められず、いずれも材齢15~20日程度でひび割れを発生している。そのため、単位水量の低減という行為のみでなく、実際に効果の有無を確認した配合を採用すること、ならびに使用材料や養生等を含めた総合的な検討で適切な収縮(ひび割れ)の低減を図る必要があるものと考えられる。

図-9に示すとおり、ひび割れ発生日数が約20日以上となったコンクリートに関しては、ひび割れ発生時の引張応力と割裂引張強度の比は0.7程度の値となり、配合の影響は認められない。しかし、早期にひび割れを生じた単位水量が過大な配合および単位粗骨材容積が $0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ ではその比がかなり小さくなり、配合H40UUでは約0.4になった。引張強度用供試体は鉄筋拘束試験体よりも断面が大きいために、乾燥が引張強度に及ぼす影響が必ずしも同一であるとは限らないが、配合条件によっては割裂引張強度よりもかなり小さな引張応力でひび割れを発生する可能性があることがわかった。

表-2 コンクリートの配合

記号	Cの種類	W/C (%)	(kg/m ³)		Vg (m ³ /m ³)	
			W	C		
H40	H	40	170	425	0.385	
H40U			185	463		
H40UU			200	500		
H40D			150	375		
H40G			170	425	0.300	
H40UG			185	463		
H40DG			150	375		
H30			30	150	500	0.385
H55			55	170	309	
N40			N	40	170	

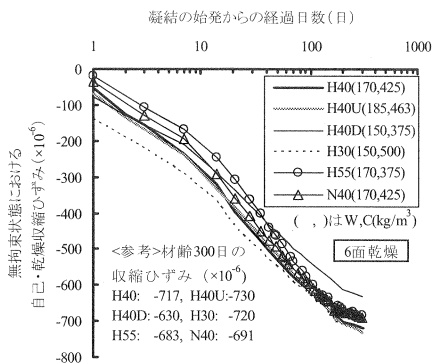


図-7 収縮ひずみの経時変化

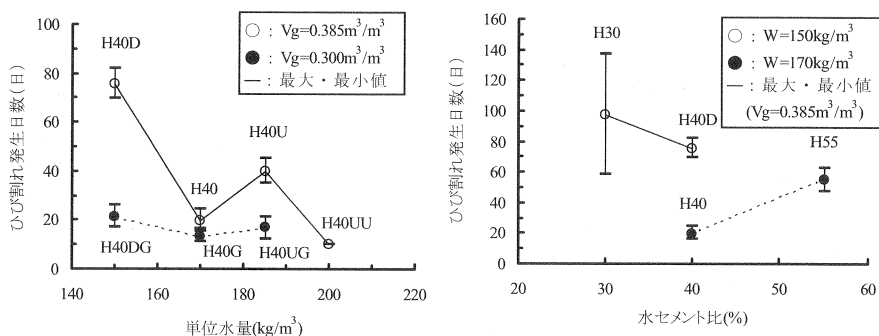


図-8 単位水量、水セメント比および単位粗骨材絶対容積とひび割れ発生日数の関係

5. おわりに

PC 橋を対象にした高強度コンクリートの生コン工場の配合実態調査、ならびに配合条件と圧縮強度および収縮に関する実験の結果により、以下のことがわかった。

- (1) 生コン工場で製造されるAE減水剤を使用した呼び強度 40 の標準配合には、単位水量が $175 \text{ kg}/\text{m}^3$ を超えるものや水セメント比が 30%程度のもが存在する。スランプの増加に伴い、単位水量および単位セメント量が増大する傾向にあるので、高性能AE減水剤を使用する等の適切な対策を講じる必要がある。
- (2) 断熱試験体から採取したコア供試体と標準養生供試体の材齢 28 日における圧縮強度比の平均値は、いずれも 1.0 を下回り、初期の高湿履歴を考慮した割増し係数 β_1 が必要である。ただし、材齢 91 日のコア供試体と材齢 28 日の標準養生供試体の圧縮強度比は平均 1.0 程度であり、設計基準強度を必要とする材齢によっては割増し係数 β_1 を低減することが可能である。
- (3) 単位水量の減少により、コンクリートの収縮低減効果が期待できるが、単位水量の減少量や単位粗骨材絶対容積等の配合条件によりその効果は異なる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，施工編，2002.
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS5，鉄筋コンクリート工事，2003.
- 3) 谷口秀明，樋口正典，藤田学：高強度コンクリートの打上り面の表面仕上げ方法に関する検討，三井住友建設技術研究所報告，No. 2，pp. 47-52，2004. 11.
- 4) 谷口秀明，樋口正典，藤田学：高強度コンクリートの表面仕上げと養生の方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，pp. 1355-1360，2006. 7.
- 5) 徳光卓，中村定明，竹中秀樹，脇本優：PC 橋のコンクリート配合と単位水量測定に関するアンケート調査結果，コンクリート工学，Vol. 43，No. 12，pp. 26-31，2005. 12.
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)，JCI-SAS2，2002.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002.

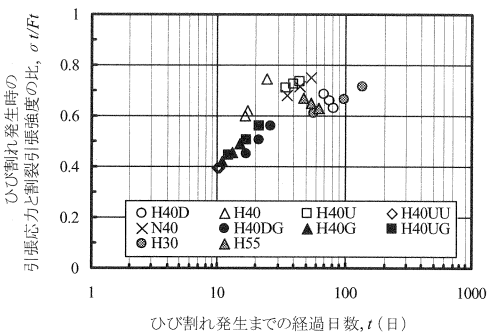


図-9 配合の違いがひび割れ発生日数およびひび割れ発生時の引張応力と割裂引張強度の比の関係に及ぼす影響