

論文 高流動コンクリートの収縮ひび割れにおける結合材種類の影響

安本礼持*1・枝松良展*2・水越陸視*1・長岡誠一*3

要旨：各種粉体材料を用いた高流動コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を JIS 原案の乾燥ひび割れ試験によって比較し、使用する粉体材料によりひび割れが発生するまでの期間が大きく異なることを示した。また、その理由について、若材齢時におけるコンクリートの物性値から検討し、自己収縮ひずみがひび割れ発生材齢に大きな影響を及ぼすこと、水セメント比が低いコンクリートでは引張強度に及ぼす乾燥の影響が大きいとの知見を得た。

キーワード：自己収縮、乾燥収縮、引張強度、高流動コンクリート、ひび割れ

1. はじめに

自己充填型の高流動コンクリートは、締固め不要の特性を得るために単位ペースト量が多くなる。そこで、粉体材料を選定する場合には、乾燥収縮や自己収縮によるひび割れ抵抗性について考慮する必要がある。

本研究は高流動コンクリートに使用する粉体材料の選定資料を得ることを目的に、高流動コンクリートの自己収縮や乾燥収縮によるひび割れ抵抗性に及ぼす粉体材料の影響を比較するとともに、ひび割れ抵抗性と若材齢時におけるコンクリートの物性値との関連性について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用した粉体材料を表-1に示す。セメント種類の影響を比較するため、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および低熱ポルトランドセメントをそれぞれ単体で使用し

た。また、石灰石微粉末を使用した高流動コンクリートの事例が多いことから、普通ポルトランドセメントと石灰石微粉末を 70：30 および 45：55 の容積割合で混合した粉体を使用した。

細骨材は野洲川産川砂（表乾比重 2.59、吸水率 1.39%、粗粒率 2.90）、粗骨材は高槻産碎石（表乾比重 2.70、吸水率 0.60%、粗粒率 6.73）を使用した。

混和剤は、高流動コンクリートにポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を、スランプ 8cm のコンクリートに、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤を使用した。

2. 2 配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。高流動コンクリートの配合は、単位ペースト容積を一定

表-1 粉体材料の特性

粉体材料	記号	比重	比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)			
				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
低熱ポルトランドセメント	LH	3.24	3220	22	56	3	11
普通ポルトランドセメント	N	3.14	3250	55	20	9	8
高炉セメント B 種	BS	3.04	3750	-	-	-	-
石灰石微粉末	LS	2.73	5120	-	-	-	-

* 1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 コンクリート研究室 研究員、工修(正会員)
 * 2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 コンクリート研究室 研究員、工博(正会員)
 * 3 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 コンクリート研究室 主任研究員(正会員)

($0.33\text{m}^3/\text{m}^3$)とし、スランプフロー $65\pm 3\text{cm}$ 、空気量 $5.0\pm 1\%$ 、ボックス型充填装置[1]における充填高さ 30cm 以上(障害鉄筋数5本時)を満足するように決定した。また比較として、スランプ 8cm 、材齢28日の配合強度 $28.0\text{N}/\text{mm}^2$ の一般的なコンクリートについても検討した。

表-2 コンクリートの配合

記号	粉体材料	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)					減水剤 (粉体×重量%)
				W	C	LS	S	G	
BL	LH	31.0	5.0	165	533	-	868	771	1.8 ¹⁾
BB	BS	31.1		160	514	-			2.1 ¹⁾
NC-10	N	30.0		160	533	-			2.6 ¹⁾
NC-7	N+LS	41.4		157	379	141			2.1 ¹⁾
NC-5	N+LS	61.4		153	249	264			2.6 ¹⁾
SL8	N	62.0	4.5	165	266	-	829	1040	0.25 ²⁾

1) ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

2) リグニンスルホン酸系AE減水剤

2. 3 試験項目および方法

コンクリートのひび割れ抵抗性は、JIS原案「コンクリートの乾燥ひび割れ試験方法」(以後、一軸拘束試験と呼ぶ)により比較した[2]。脱型までの前養生は室温 $20\pm 1^\circ\text{C}$ における7日間の封かん養生とし、拘束板のひずみおよび温度の測定は自己収縮による応力を求めるために前養生の段階から行った。脱型後は室温 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 3\%$ の一定条件下とした。乾燥収縮試験はJISA 1129に準拠し、乾燥収縮試験用供試体の前養生は一軸拘束試験と同様に、材齢7日までの封かん養生とした。弾性係数および引張強度試験はそれぞれJSCE-G501およびJISA 1113に準拠し、試験まで封かん養生を行った供試体と、材齢7日まで封かんとした後に気乾養生(以後、気乾養生と呼ぶ)を行った供試体についてそれぞれ測定した。圧縮クリープ試験はJIS原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)」[3]に順じ、前養生および試験は封かん状態で行った。供試体は直径 150mm 、高さ 600mm の円柱供試体を用い、ひずみの計測は埋込み型ひずみ計により行った。載荷材齢は1,3,7,14日とし、載荷応力は載荷時における圧縮強度の30%とした。自己収縮試験は日本コンクリート工学協会「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に従った[4]。

3. 結果および考察

3. 1 ひび割れ発生材齢および応力

図-1は一軸拘束試験においてコンクリートに作用する応力の経時変化を示したものである。低熱ポルトランドセメントを用いたBL以外では材齢35日までにひび割れが発生しているのに対し、BLでは1年経過後においてもひび割れは認められなかった。このことより、粉体材料として低熱ポルトランドセメントを用いることにより高流動コンクリートのひび割れ抵抗性を著しく高められることが明らかとなった。

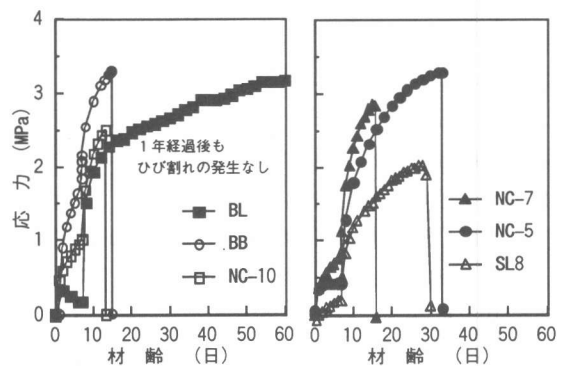


図-1 応力の経時変化

石灰石微粉末の混合率を変化させた場合では、石灰石微粉末の混合率を55%まで高めたNC-5のひび割れ発生材齢が最も長くなった。粉体系の高流動コンクリートでは、コンクリートに材料分離抵抗性を付与するため、水粉体比を低く設定する必要がある。このため、コンクリートの強度は、設計基準強度から設定した配合強度を大幅に上回る場合が多い。また、表-3より石灰石微粉末の混合率が少ないほど圧縮強度は大きくなるものの、強度増加によるひび割れ発生材齢への効果が認められないことなどから、配合強度を下回らない範囲内において石灰石微粉末の混合率を高めることはひび割れ抵抗性を高めるうえで有効であると考えられる。また、SL8と高流動コンクリートを比較すると、BLおよびNC-5以外はすべてSL8よりも短い期間でひび割れが発生した。

コンクリートのひび割れ発生時の応力と水セメント比の関係を図-2に示す。引張強度に直接関係すると考えられる水セメント比とひび割れ発生応力との間には相関が認められなかった。そこで、以下に高流動コンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす粉体材料の影響について、コンクリートの収縮、乾燥下における引張強度、弾性係数およびクリープ特性から検討した。

3.2 収縮による検討

図-3は各コンクリートの無拘束供試体の自由ひずみの経時変化を示したものである。材齢7日までの自由ひずみは、コンクリートの熱膨張係数を $10 \mu/\text{C}$ と仮定して全ひずみから温度ひずみを差し引くことにより求めた自己収縮ひずみを、材齢7日以降の自由ひずみは材齢7日の自己収縮ひずみに各材齢の乾燥収縮ひずみを加えたものである。粉体の種類によって自由ひずみが大きく異なることが明らかである。特に、BLは材齢7日までの自己収縮ひずみおよび乾燥後の自由ひずみとも、他の粉体を使用した高流動コンクリートと比較してかなり小さくなっている。これよりBLが高いひび割れ抵抗性を示した理由の一つとして、自己収縮および乾燥収縮が小さいことがあげられる。また、石灰石微粉末の混合率を変化させた場合では、混合率が多くなるほど乾燥後の自由ひずみが小さくなる傾向を示した。さらに石灰

表-3 圧縮強度およびひび割れ発生材齢

配合	圧縮強度 (MPa)			ひび割れ発生材齢
	3日	7日	28日	
BL	20.8	36.5	65.2	—
BB	44.7	60.2	76.9	14.5日
NC-10	42.9	53.4	63.1	12.7日
NC-7	39.9	47.3	54.7	14.4日
NC-5	27.3	32.7	34.5	28.7日
SL8	16.3	21.1	27.9	26.9日

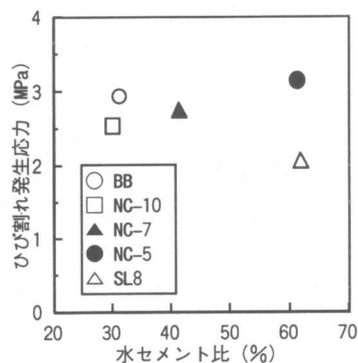


図-2 水セメント比とひび割れ発生応力の関係

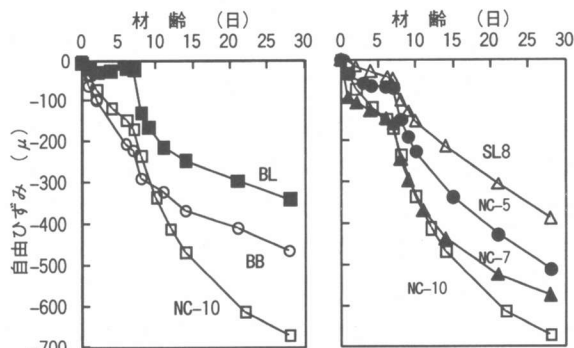


図-3 自由ひずみの経時変化

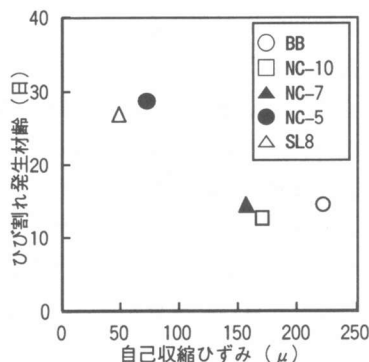


図-4 自己収縮ひずみとひび割れ発生材齢の関係

石微粉末の混合率を55%まで高めたNC-5では、自己収縮ひずみも小さくなることが明らかとなった。

前養生期間における自己収縮ひずみとひび割れ発生材齢の関係を図-4に示す。本研究と同様に前養生を7日間とした報告[5]では、自己収縮による応力の割合が大きいほど、ひび割れの発生が早くなる傾向が示されている。図-4から、自己収縮ひずみで整理した場合においても、前養生期間中の自己収縮ひずみが大きいほど、ひび割れの発生が早くなる傾向が認められた。

3.3 引張強度による検討

ひび割れ発生材齢とその材齢における引張強度との関係を図-5に示す。なお、ひび割れ発生材齢時の引張強度は、任意材齢における割裂試験の結果より求めた、材齢と引張強度の関係の近似式を用いて算出した。ひび割れ発生材齢が短いBB, NC-10 および NC-7では、気乾養生の引張強度が封かん養生の引張強度に比べて大きく低下していることが明らかとなった。すなわち、低水セメント比のコンクリートほど乾燥による引張強度の低下率が大きいことを示している。図-2において水セメント比とひび割れ発生応力との間に相関性が認められなかったのは、引張強度に及ぼす乾燥の影響が水セメント比によって異なっているためと考えられる。これについて、ひび割れ発生材齢時における封かん養生の引張強度と気乾養生の引張強度との差（以後、引張強度差と呼ぶ）と逸散水量から考察する。単位水量に対するコンクリート1 m³当たりの逸散水量の割合（以後、逸散水率と呼ぶ）と引張強度差の関係を図-6に示す。逸散水率の増加に伴い、引張強度差が減少することが認められる。既往の研究[6]によると、水セメント比の低いコンクリートほど、乾燥収縮ひずみと逸散水量との比が大きくなるといわれている。したがって、若材齢時では、水セメント比が低くなるほど径の小さい細孔容積が多くなるために、逸散水率が少ないにもかかわらず毛細管張力は大きくなったことが推測できる。これにより、気乾養生における引張強度が低下したものと考えられる。また、低水セメント比のコンクリートほど水和によって取りこまれる自由水の割合が多く、乾燥との相乗効果により水和反応に必要な水が不足したことも影響していると考えられる。このようにBLを除いた低水セメント比のコンクリートでは、自己収縮が大きいことに加え、乾燥によって引張強度が大きく低下するために、比較的短い期間でひび割れが発生したものと考えられる。石灰石微粉末の混合率を変化させた場合では、混合率が少なくなるほど水セメント比が小さくなるため、ひび割れ発生材齢が短くなったものと考えられる。

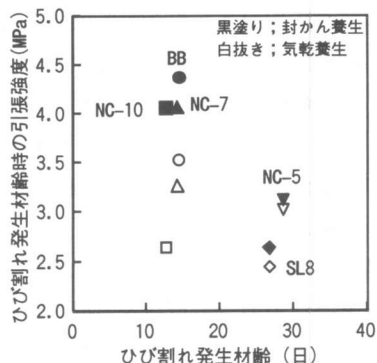


図-5 ひび割れ発生材齢と引張強度の関係

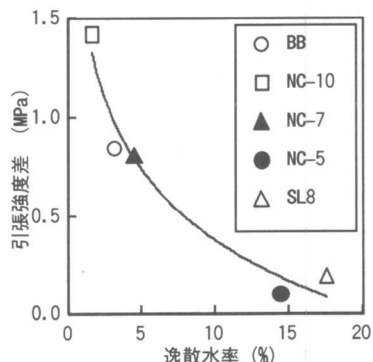


図-6 逸散水率と引張強度差の関係

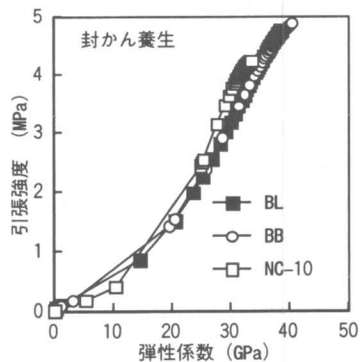


図-7 弾性係数と引張強度の関係

図-7は、封かん養生した供試体における弾性係数と引張強度の関係を示したものである。乾燥による影響がない場合、弾性係数と引張強度との関係は、セメントの種類に関係なくほぼ同じ傾向を示すことが明らかとなった。これより、引張強度の高いコンクリートはその弾性係数も高いため、拘束を受ける収縮ひずみが大きい場合には、大きな引張応力が作用することとなる。したがって、引張強度の高いコンクリートが必ずしも高いひび割れ抵抗性を示すとは限らないと考えられる。また、BL、NC-5およびSL-8については気乾養生を行った場合の材齢28日の弾性係数が封かん養生に比べて10%程度低下したのに対し、その他のコンクリートでは養生条件の相違による弾性係数の差は認められなかった。すなわち、ひび割れ発生材齢の短いコンクリートでは、乾燥による引張強度の低下が大きくなるものの、弾性係数はほとんど変化しなかった。逆にひび割れ発生材齢の長いコンクリートでは、乾燥による引張強度の低下は小さいが、弾性係数は顕著に低下した。このように、引張強度と弾性係数の乾燥による影響の相違が、ひび割れ抵抗性に大きく関係したものと考えられる。

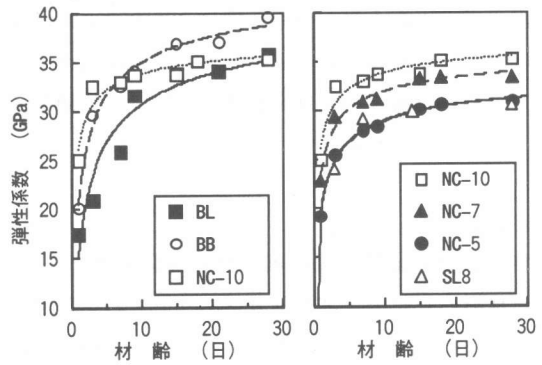


図-8 弾性係数の経時変化

図-8は、封かん養生した場合の弾性係数の経時変化を示したものである。セメント種類の比較において、BLは材齢28日までの弾性係数が最も低く、弾性係数の増加も緩やかであった。また、石灰石微粉末の混合率を変化させた場合では、混合率の増加に伴い弾性係数が低下した。自由ひずみと拘束供試体のひずみの差が同程度の場合、弾性係数の低いコンクリートほど引張応力が小さくなるため、ひび割れ抵抗性上有利であると考えられる。

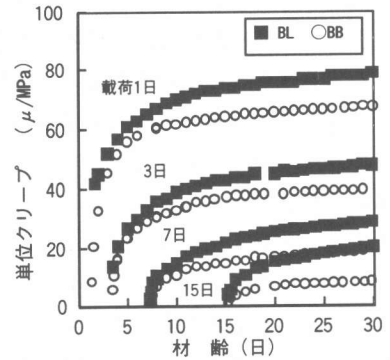


図-9 単位クリープの経時変化

3. 4 クリープによる検討

図-9は、BLとBBの単位応力当りの圧縮クリープひずみ(以後、単位クリープと呼ぶ)を示したものである。同一載荷材齢において比較した場合、BLの方が大きいことが明らかとなった。同一材齢に同程度の応力が作用した場合、BLの方が応力緩和が大きくなるため、ひび割れ抵抗性上有利であると考えられる。

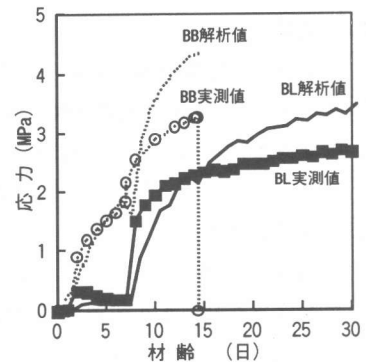


図-10 一軸拘束供試体の応力の解析値と実測値の比較

図-10は無拘束供試体の自由ひずみ、一軸拘束試験における拘束板のひずみ、気乾養生供試体の弾性係数および圧縮荷重によるクリープ係数を用いてStep-by-step法[7]によって求めた一軸拘束供試体の応力の解析値と実測値を比較したものである。本研究でも、既往の研究結果[7]と同様に自己収縮のみが作用している材齢7日までの期間は解析値と実測値がほぼ一致しているものの、脱型後の乾燥条件下については解析値が実測値を大きく上回る結果となった。これは、クリープ係数が

圧縮荷重によるものと引張荷重によるものとで異なること[8]、またクリープ特性の乾燥による影響を考慮しなかったためと考えられる。乾燥条件下におけるコンクリートの収縮応力の予測、ひいてはひび割れ抵抗性の評価を行うためには、乾燥を受ける引張クリープの影響について考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

自己収縮および乾燥収縮に対する高流動コンクリートのひび割れ抵抗性について粉体材料の影響を検討した結果、高流動コンクリートのひび割れ抵抗性は、使用する粉体材料の種類によって大きく異なることが明らかとなった。この原因について、ひび割れ抵抗性とコンクリートの各物性値との関係について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1)低熱ポルトランドセメントを単体で使用した高流動コンクリートは、自己収縮および乾燥収縮が小さく、ひび割れ抵抗性が極めて高い。
- (2)石灰石微粉末の混合率が高いほどひび割れ発生材齢が長くなっており、設計基準強度から設定される配合強度を下回らない範囲内で石灰石微粉末の混合率を高めることはひび割れ抵抗性を高めるうえで有効である。
- (3)自己収縮ひずみの大きいコンクリートほどひび割れ発生材齢が早くなる。
- (4)低水セメント比のコンクリートは、乾燥による引張強度の低下率が大きい。
- (5)引張強度の高いコンクリートは同時に弾性係数も高いため、拘束される収縮ひずみが大きい場合には、ひび割れ抵抗性は必ずしも高くはならない。
- (6)乾燥を受けた場合の収縮応力の予測、ひいてはひび割れ抵抗性の評価においては、乾燥を受ける引張クリープの影響について考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 枝松良展、安本礼持：高流動コンクリートの自己充填性に及ぼす細骨材量の影響、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.616-617、1996.9
- [2] 川瀬清孝：コンクリートの乾燥ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その1)、セメント・コンクリート、No.532、pp49-56、1991.6
- [3] 建材試験センター：コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp55-56、1985.3
- [4] 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：超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)、日本コンクリート工学協会、pp.209-210、1994.5
- [5] 安田正雪、阿部道彦、笹原厚、桃谷智樹：各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp147-152、1994.6
- [6] 長滝重義、米倉亜州夫：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察、コンクリート工学、Vol.20、No12、pp85-95、1982.12
- [7] 日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会：自己収縮研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.123-163、1996.11
- [8] 後藤忠広、上原匠、梅原秀哲：若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp1133-1138、1994.6