

高流動コンクリート（ニューロクリート）の開発（その3）

— 低発熱・低収縮性ニューロクリート —

近松 竜一 竹田 宣典
三浦 律彦 十河 茂幸

Development of Highly Workable Concrete, "Neuro-crete" (Part 3)

— Low Heat Hydration and Low Shrinkage Type Neuro-crete —

Ryuichi Chikamatsu Nobufumi Takeda
Norihiro Miura Shigeyuki Sogo

Abstract

"Neuro-crete" is highly fluid, self-compacting concrete. It has been applied in many concrete structures to shorten the construction period and to save labor, as well as to speed up placing work, which concrete volume has come up to about 370,000 m³.

It was necessary to reduce thermal and autogenous shrinkage to improve the crack resistance of highly fluid concrete with high strength and durability. It was thus decided to examine low-heat, low-shrinkage neuro-crete. As a result, it was showed that the combination of low heat portland cement and expansive admixture improved cracking resistance.

概 要

ニューロクリートは、締固め不要の自己充填性を有するコンクリートである。充填が困難で施工欠陥の発生が懸念される部材への適用はもとより、工期短縮や省力化など施工の合理化を図るための有用な手段として、各種のコンクリート構造物に広く用いられ、適用実績は既に約37万m³に達している。

高流動コンクリートを高強度化、高耐久化して付加価値を高め、同時にひび割れ抵抗性に優れたコンクリートとするためには、温度収縮や自己収縮の低減が重要な課題といえる。そこで、高流動コンクリートの低収縮化を図る上で効果的な結合材の組合せについて検討を行った。その結果、低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用することにより、硬化後の収縮が小さく、ひび割れ抵抗性を著しく改善できることが明らかとなった。

1. はじめに

一般に、コンクリートに要求される基本的な性能は、施工性、強度、耐久性の3つに大別することができる。

高流動コンクリート「ニューロクリート」は、これらの性能のうち、施工性を著しく向上させた、締固め不要の自己充填性を有するコンクリートである¹⁾。ニューロクリートは、充填が困難な特殊な場合の施工性の改善をはじめ、工期短縮や省力化など施工の合理化を図るための有用な手段として広く用いられてきており²⁾、その適用実績は、平成9年9月時点で約37万m³に達している。

コンクリートに自己充填性を付与するためには、充填条件に応じた間隙通過性、流動性および材料分離抵抗性を確保する必要がある。一般には、間隙通過性の観点から単位粗骨材量を設定し、高性能A E減水剤を用いて流動性を増大させている。また、材料分離抵抗性を付与

するためには、増粘剤の添加や配合中の微粉末を増量する方法が用いられる。後者の場合、セメントなどの結合材を微粉末として用いれば、低水結合材比となり、高強度化が図られると同時に、密実な硬化体が形成され、潜在的に高い耐久性を有する高流動コンクリートとすることができる³⁾。しかし、一方では、結合材量の増加に伴う発熱量の増大、結合材の水和に起因する自己収縮の顕在化などにより、乾燥作用を受けない封緘条件下でも著しい収縮が生じる傾向にあることが報告されている⁴⁾。したがって、高強度で高い耐久性を有し、ひび割れ抵抗性に優れた高流動コンクリートとするためには、温度収縮や自己収縮を極力低減することが重要な課題となる。

本文は、高流動コンクリートの低収縮化に関する研究成果⁵⁾、⁶⁾をまとめたものである。各種結合材を用いた場合の強度、発熱、体積変化などの試験結果をもとに、低収縮化に効果的な結合材の組合せについて報告する。

Table 1 各種セメントの鉱物組成および品質試験結果一覧
Properties of Various Cements

セメント種類		鉱物組成 (%)				密度 (g/cm ³)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (N/mm ²)				水和熱 (J/g)		
種類	記号	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
低熱	LP-1	17	62	3	11	3.24	3410	3.4	6.1	22.0	48.5	164	216	270
	LP-2	21	60	3	10	3.24	3130	4.1	6.1	27.8	56.5	185	265	326
	LP-3	24	57	2	10	3.23	3350	5.6	8.7	23.2	51.0	194	258	310
	LP-4	29	54	3	8	3.22	3400	7.7	12.0	32.6	58.5	212	273	318
	LP-5	27	52	4	11	3.23	3240	6.9	10.3	32.6	55.8	216	284	325
中庸熱	MP	36	42	4	12	3.22	3170	9.2	13.6	34.6	54.3	239	304	340
普通	NP	55	20	9	9	3.16	3200	16.2	26.3	41.9	51.5	321	378	401
高炉B種	BB	—	—	—	—	3.04	3720	12.1	21.1	42.5	56.4	287	345	367

Table 2 高流動コンクリートの試験配合
Mix Design and Proportion of Highly Flowable Concrete

配合 強 度 (N/mm ²)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
						W	P		SPA
							C+EX	LF	
≥ 80	55±10	4±1	29.0	33.0	49.0	175	530	70	9.0

注) EX: 膨張材, LF: 石灰石微粉末, SPA: 高性能A E減水剤

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通、中庸熱、低熱の各種ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用した。これらのセメントの品質をTable 1に示す。低熱ポルトランドセメントは、ピーライト(C₂S)量⁷⁾が異なる5銘柄を用いた。

混和材には、収縮補償の観点から、CSA系膨張材を使用した。また、分離抵抗性を確保するために、石灰石微粉末(密度2.71g/cm³, ブレン値5600cm²/g)を用いた。さらに、高炉スラグ微粉末(密度2.88g/cm³, ブレン値5400cm²/g), フライアッシュ(密度2.24g/cm³, ブレン値3760cm²/g)も一部の試験において使用した。

細骨材は、海砂(表乾比重2.55, 粗粒率2.57, 実積率65%), 粗骨材は、碎石(最大寸法20mm, 表乾比重2.63, 粗粒率6.49, 実積率59%)を用いた。また、混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能A E減水剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

高流動コンクリートの試験配合をTable 2に示す。水結合材比は33%, 単位結合材量は530kg/m³と一定とした。また、単位粗骨材量は0.300m³/m³, 各種の結合材と石灰石微粉末を併せた単位粉体量は600kg/m³に設定した。なお、後述する温度ひび割れ試験において、低熱ポルトランドセメント(LP-5)を単独あるいはこれにスラグ微粉末やフライアッシュを各々70%および25%置換した場合の水結合材比は30%, 単位結合材量は550kg/m³とした。

2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを用い、各種粉体、骨材を投入して30秒空練りした後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を加え、90秒練り混ぜた。

練上り15分後においてフレッシュコンクリートの品質を確認し、各種供試体を作製した。圧縮強度用供試体は、材齢3日で脱型後、所定の材齢まで標準養生した。また、養生条件を変えた場合についても一部試験した。

発熱特性は、空気循環式断熱温度上昇試験装置およびFig. 1に示す簡易型温度上昇試験装置により測定した。

自己収縮(膨張)特性は、Fig. 2に示す供試体を用い、20℃封緘で無拘束条件下でのコンクリートひずみを埋込み型ひずみ計により材齢28日まで測定した。なお、自己収縮(膨張)ひずみは、凝結始発時を基点とし、熱膨張係数を10×10⁻⁶/℃として温度補正を行った。一軸拘束膨張率の測定は、JIS A 6202-参考1に準拠した。乾燥収縮試験は、JIS A 1109に準拠して行い、材齢91日まで標準養生した後、試験を開始した。

温度ひび割れ試験は、JIS 原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準拠した。温度可変槽内に静置した拘束および無拘束供試体に対して、部材厚0.8mの壁モデル中心部の温度履歴を与え、鋼管のひずみをもとに発生拘束応力、埋込み型ひずみ計を用いて拘束および無拘束ひずみを求めた。なお、拘束鋼管は、供試体の拘束率を大きくするために、JIS 原案仕様より肉厚を大きくしたもの(4.9mm)を用い、鋼管内の循環水温は20℃の一定とした。

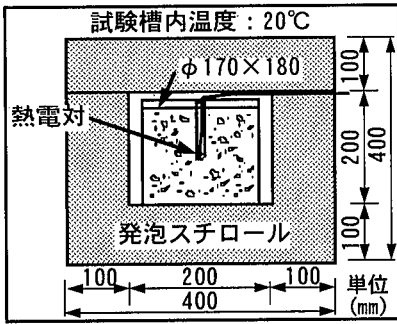


Fig. 1 簡易型断熱温度上昇試験装置
Adiabatic Temperature Rise Test Apparatus (Simple Type)

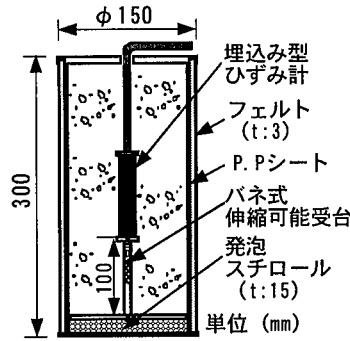


Fig. 2 自己収縮(膨張)試験体
Autogenous Shrinkage (Expansion) Specimen

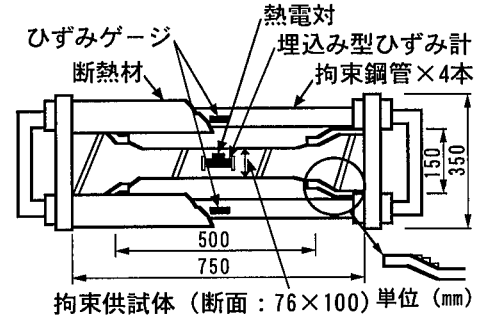


Fig. 3 温度ひび割れ試験装置
Cracking Test Apparatus of Concrete by Restraining Thermal Deformation

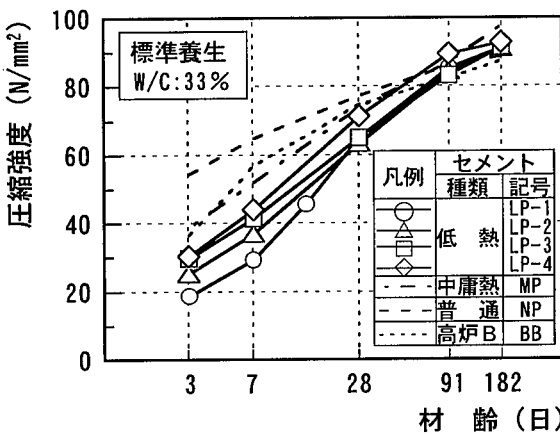


Fig. 4 各種高流動コンクリートの強度発現特性
Strength Development of Highly Flowable Concrete

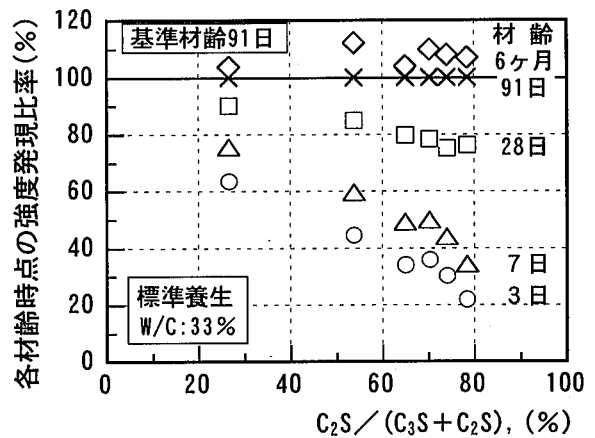


Fig. 5 セメントの鉱物組成と強度発現比率
Relationship between $C_2S/(C_2S+C_3S)$ of Cement and Ratio of Strength of Concrete

3. 実験結果および考察

3.1 強度発現特性

各種セメントを用いた高流動コンクリートの強度発現特性をFig. 4に示す。水セメント比を33%（一定）とした場合、材齢91日以降の圧縮強度は、いずれの場合もほぼ同等で 80N/mm²以上の高い強度水準が得られた。しかしながら、材齢の経過に伴う強度増進の傾向に関しては、セメントの種類により著しく相違する結果となった。

Fig. 4に示した結果をもとに、各ケース毎に材齢91日の強度を基準として各材齢時の強度発現比率を算出し、これらをセメント鉱物組成のうち、ピーライト(C₂S)とエーライト(C₃S)成分比の関係で整理した結果をFig. 5に示す。材齢7日までの若材齢では、ピーライト成分比の増加とともに強度発現が緩慢となるものの、材齢28日時点では強度比率の相違が相当に小さくなっている。

最もピーライト量が多い低熱ポルトランドセメントを用いた場合を対象として、強度発現に及ぼす養生の影響を調べた結果をFig. 6に示す。養生温度が20℃（一定）の場合、乾燥条件下に供するまでの初期養生（水中または封緘）期間が短いものほど、材齢91日時点の圧縮強度が

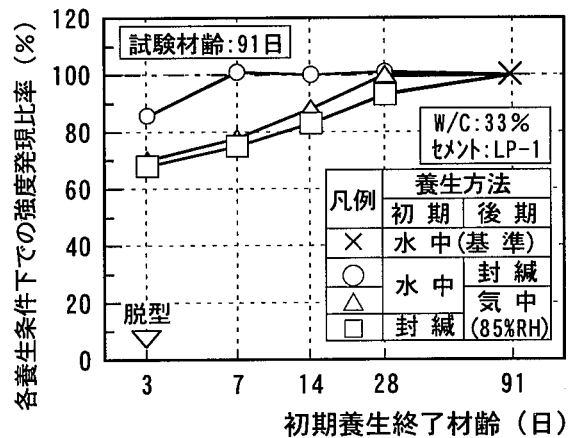


Fig. 6 養生方法の違いが強度発現に及ぼす影響
Influence of Curing Method on Strength Development

小さく、強度増進が阻害される傾向が認められる。したがって、低発熱性セメントを適用する場合は、低水セメント比の配合でも、所要の強度発現を付与させるためには、湿潤養生に十分配慮することが望ましいといえる。

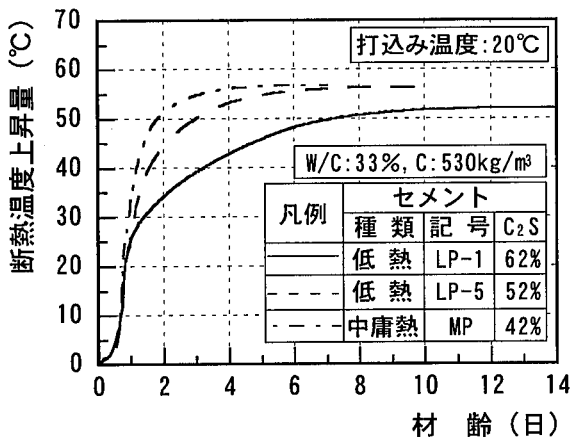


Fig. 7 高流動コンクリートの断熱温度上昇特性
Adiabatic Temperature Rise of Concrete

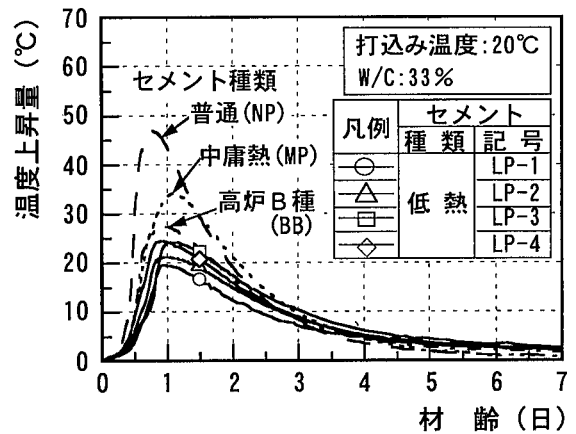


Fig. 8 セメントの種類による温度上昇量の相違
Difference of Temperature Rise by Type of Cement

3.2 発熱特性

水セメント比が33%で、単位セメント量を530kg/m³とした高流動コンクリートの断熱温度上昇特性をFig. 7に示す。終局断熱温度上昇量は、いずれの場合も55°C前後となった。一方、温度上昇速度には、セメントの種類による顕著な差異が生じ、ピーライト含有量が多い低発熱性のセメントを用いた場合ほど、材齢1日以後の温度上昇が緩やかで、発熱速度が小さくなる結果が得られた。

簡易型断熱温度上昇試験装置による温度上昇量の測定結果をFig. 8に示す。本試験装置で得られる測定値は、厚さが60cm程度の壁部材の中心温度履歴にほぼ相当するものである。Fig. 8では、前述したセメント種類による発熱特性の相違が、温度上昇量ならびに温度上昇(降下)速度の差として示されており、ピーライト量の多いセメントを用いた場合ほど、打込み後の温度上昇が抑制され、温度降下速度が小さくなる傾向が認められた。

以上の結果より、低発熱性セメントの使用は、効率的なポストクーリング対策が期待でき、特に、放熱の影響が大きい薄肉部材に適用する場合には、温度ひび割れの低減に対して相当に有利になるものと考えられる。

3.3 体積変化

3.3.1 自己収縮 各種セメントを用いた高流動コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化をFig. 9に示す。

ポルトランドセメントの種類によって収縮量には差異が生じ、普通、中庸熱、低熱の順に、水和熱が小さく、C₃A量が少ないセメントを用いた場合ほど、自己収縮ひずみが小さい結果となった。特に、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、若材齢時には、間隙相の水和によるエトリングタイトの生成に起因した膨張ひずみが生じ、材齢7日程度まではほとんど収縮が生じない場合も認められた。一方、高炉セメントB種を用いた場合は、材齢の経過とともに自己収縮ひずみが漸増する結果となり、材齢28日時点では、収縮量が最も大きくなった。

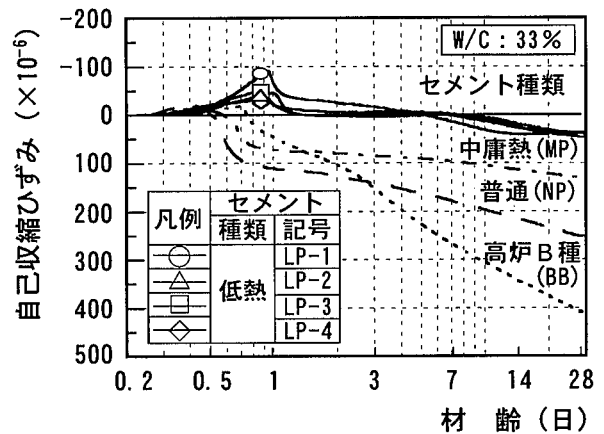


Fig. 9 高流動コンクリートの自己収縮ひずみ
Autogenous Shrinkage of Highly Flowable Concrete

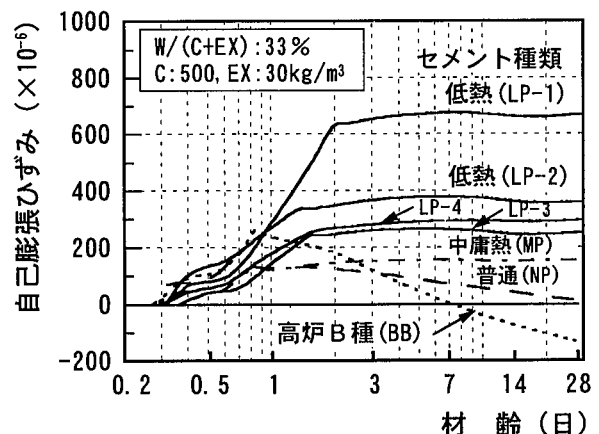


Fig. 10 高流動コンクリートの自己膨張ひずみ
Autogenous Expansion of Highly Flowable Concrete

これらの結果は、自己収縮に関する既往の報告⁴⁾と同様の傾向を示すものである。高炉スラグ微粉末を混和材として多量に使用する場合は、自己収縮特性を事前に把握しておくことが望ましいと考えられる。

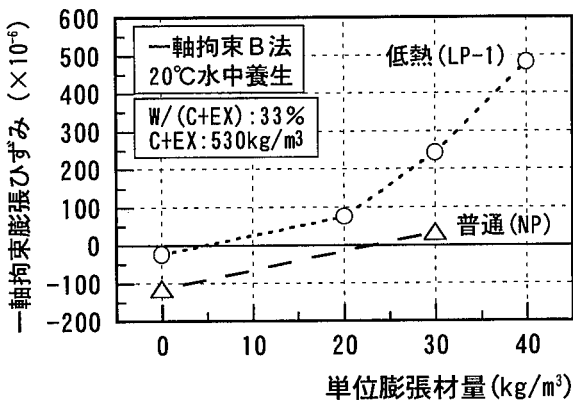


Fig. 11 単位膨張材量と一軸拘束膨張ひずみ
Results of Restrained Expansion and Contraction

3.3.2 膨張材による収縮補償効果 各種のセメントに膨張材を併用した高流動コンクリートの自己膨張ひずみの経時変化をFig. 10に示す。普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種に膨張材を併用した場合、若材齢時には一旦膨張ひずみが生じるものの、材齢の経過に伴い徐々に収縮側へ移行する結果となった。一方、中庸熱または低熱ポルトランドセメントを用いた場合には、ピーライト量が多いものほど自己膨張ひずみ量が増大し、膨張ひずみが長期にわたって保持される結果となった。

単位結合材量を一定とし、単位膨張材量を変化させた場合の一軸拘束膨張率の試験結果をFig. 11に示す。同一単位膨張材量で比較した場合、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の一軸拘束膨張ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも大きく、無拘束条件下での自己膨張ひずみと同様の傾向が認められた。

これらの結果は、膨張材の水和に起因するコンクリートの収縮補償効果が、併用するセメントの種類によって左右されることを示すものである。また、膨張材によるケミカルプレストレス作用を安定かつ効率的に付与させ、高流動コンクリートの低収縮化を図る観点からは、温度収縮や自己収縮が小さい低熱ポルトランドセメントとの併用が効果的であると考えられる。

3.3.3 乾燥収縮特性 乾燥収縮試験結果をFig. 12に示す。十分な湿潤養生を行い、ほぼ同等の強度発現が得られた段階(材齢91日)で乾燥条件に供した場合、セメントの種類による乾燥収縮量の相違はほとんど認められなかった。

3.4 温度ひび割れ試験による評価

各種結合材を用いた高流動コンクリートを対象に温度ひび割れ試験を実施し、低発熱化、低収縮化によるひび割れ抵抗性の改善効果について検証した。

水結合材比を30%とした低発熱性高流動コンクリートについて、試験温度を一定(20°C)とした場合の発生応力

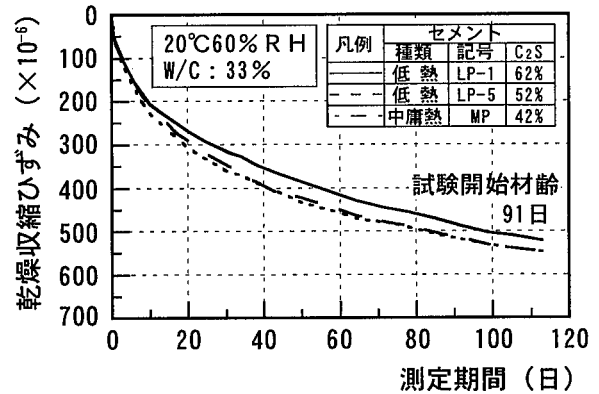


Fig. 12 高流動コンクリートの乾燥収縮ひずみ
Drying Shrinkage of Highly Flowable Concrete

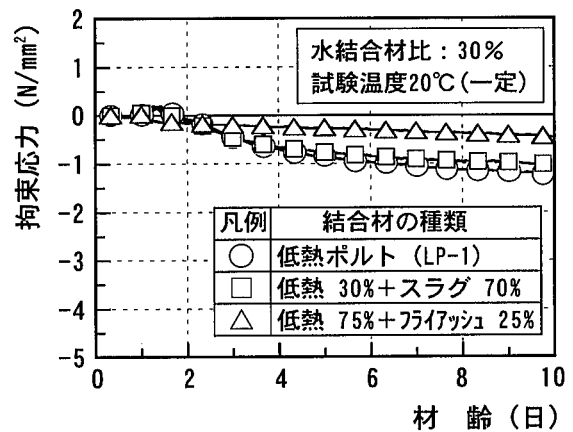


Fig. 13 拘束応力の経時変化 (温度一定の場合)
Transition of Restrained Stress (Temp.: Constant)

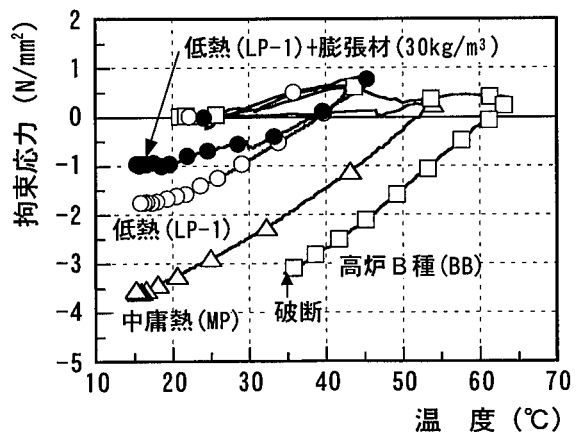


Fig. 14 拘束供試体の温度と発生拘束応力の関係
Relationship between Temp. and Restrained Stress

の経時変化をFig. 13に示す。温度変化や乾燥作用を受けない条件でも、材齢の経過に伴い収縮応力が増大し、材齢14日で最大約1.0N/mm²程度の収縮応力が生じる結果と

なった。この発生応力は、セメントの水和に伴う自己収縮に起因するものと考えられ、拘束条件によっては、自己収縮がひび割れ抵抗性を左右する重要な要因となることが明らかとなった。

水結合材比を33%とした各種の高流動コンクリートを対象として、それぞれに部材厚0.8mの壁モデル中心部の温度履歴を与えた場合の拘束試験体の温度と拘束応力の関係をFig. 14に示す。また、同一の温度履歴を与えた場合の引張強度の発生拘束応力に対する比率の推移を各ケース毎にFig. 15に示す。さらに、本試験結果を拘束ひずみ（無拘束および拘束供試体のひずみ量の差）と拘束応力の関係で整理した結果をFig. 16に示す。

同一の拘束条件下で比較した場合、高炉セメントB種を用いた場合は、収縮応力が最も大きく、拘束供試体は材齢3日時点で破断した。一方、低熱ポルトランドセメントを用い、これに膨張材を併用した場合は、拘束応力が最も小さく、発生応力に対する引張強度の比率も増大する結果となった。Fig. 16中に併記した有効弾性係数に着目すると、低発熱性セメントの使用や膨張材の併用により、温度降下過程での有効弾性係数が小さくなる傾向が認められる。以上の結果、高流動コンクリートの低発熱化、低収縮化を図ることによって、ひび割れ抵抗性が大幅に改善されることが確認できた。

4. まとめ

本報告の範囲内で得られた知見を以下に示す。

1) 高流動コンクリートを高強度化、高耐久化して付加価値を高め、ひび割れ抵抗性にも優れたコンクリートとするためには、コンクリート自体の低発熱化および低収縮化を図る必要がある。

2) 低発熱・低収縮性高流動コンクリートの結合材としては、ピーライト量が多く、製造プロセス上、間隙分量が少なく設定される低熱ポルトランドセメントの使用が効果的である。また、乾燥収縮を含めた硬化後の収縮補償対策としては、膨張材の併用が推奨される。

3) 低発熱・低収縮性高流動コンクリートは、若材齢時の強度発現が緩慢で、長期にわたって強度が増加する傾向にある。強度増進の観点からは、脱枠後の湿潤養生期間を長く設定し、外部への水分の逸散を極力防止することが望ましい。

5. あとがき

低発熱・低収縮性高流動コンクリートは、本報告で示した研究成果を踏まえ、高い水密性が要求される高度浄水処理施設や、高強度で、高いひび割れ抵抗性が所要とされるPCLNGタンク防液堤などを対象に実用化が図られており、今後も各種構造物に対して積極的に適用していく予定である。

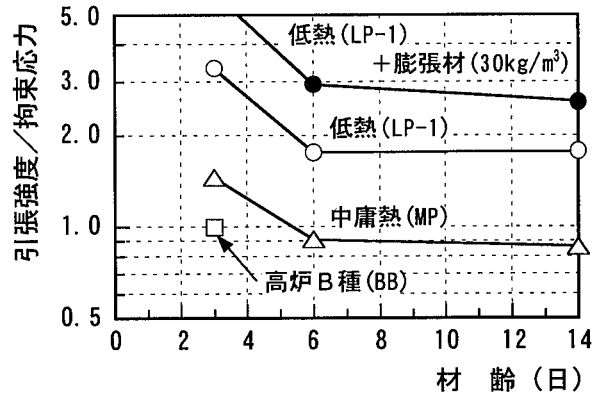


Fig. 15 拘束応力に対する引張強度比率の推移
Transition of Tensile Strength / Restrained Stress

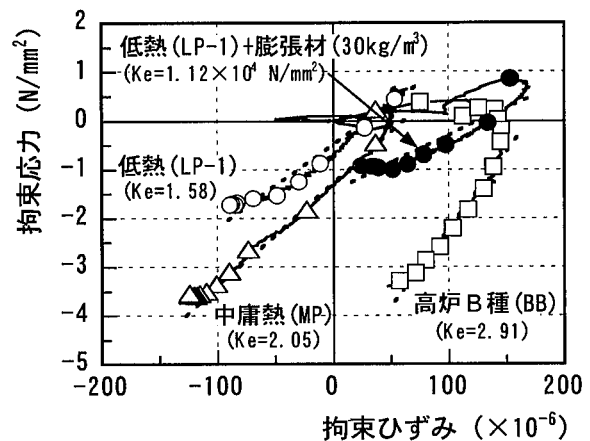


Fig. 16 拘束ひずみと拘束応力の関係
Relationship between Restrained Strain and Stress

参考文献

- 1) 三浦律彦, 他: 高流動コンクリート（ニューロクリート）の開発（その1）, 大林組技術研究所報 No. 47, p. 43~50, (1993)
- 2) 近松竜一, 他: 高流動コンクリート（ニューロクリート）の開発（その2）, 大林組技術研究所報 No. 51, p. 71~76, (1995)
- 3) 三浦律彦, 他: 低発熱・超高強度地下連続壁コンクリートに関する研究, 大林組技術研究所報 No. 54, p. 21~28, (1997)
- 4) 例えば, 自己収縮研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, (1996)
- 5) 近松竜一, 他: 高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, p. 169~174, (1997)
- 6) 竹田宣典, 他: 水和熱による温度履歴が高強度コンクリートの自己収縮応力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19-1, p. 1417~1422, (1997)
- 7) 例えば, 名和豊春: 高ピーライト系セメントの現状, コンクリート工学 Vol. 34, No. 12, p. 16~25, (1996)