

混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する実験的研究

土木研究所 正会員 工修 ○中村 英佑
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 鈴木 雅博
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工修 石井 豪
 土木研究所 工博 古賀 裕久

Abstract : An experimental study was performed to clarify the cracking tendency and the restraint stress of concrete containing supplementary cementitious materials during early ages. The restraint stresses of concrete due to autogenous shrinkage and temperature change were measured in concrete specimens restrained with invar or normal steels in expanded polystyrene formworks. The mixing of GGBF slag resulted in the increased restraint stresses and thermal cracks due to large autogenous shrinkage. Additionally, the use of expansive additives was found effective to mitigate the risk of thermal cracking.

Key words : Thermal cracking , Autogenous shrinkage , Mass concrete , GGBF slag , Fly ash

1. はじめに

環境負荷の低減や耐久性の向上を目的として、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートを用いたプレストレストコンクリート構造物の設計施工方法を検討している^{1)~3)}。過去の検討でマスコンクリートの高温履歴を模擬したコンクリート供試体の自己収縮ひずみを測定した結果、特に高炉スラグ微粉末を用いた場合に自己収縮ひずみとその進展速度が大幅に大きくなることが分かった³⁾。温度ひび割れの発生リスクを評価する際には、こうした自己収縮ひずみの挙動に加えて、コンクリートの温度変化、クリープによる応力緩和、ヤング係数の発現などの影響を適切に考慮して、若材齢のコンクリートに発生する応力を推定する必要がある。しかしながら、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートの初期応力の発生メカニズムは必ずしも明確ではない。

本研究では、発泡スチロール製の型枠でマスコンクリートの高温履歴を模擬したコンクリート供試体の拘束試験を行い、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの初期応力の発生メカニズムと膨張材による温度ひび割れ抑制効果を明らかにすることを目的とした。拘束試験では、既往研究⁴⁾を参考に、拘束用鋼材として異形鉄筋を用いてコンクリートの自己収縮ひずみに起因する拘束応力を測定し、熱膨張係数の小さいインバー鋼材を用いてコンクリートの自己収縮ひずみと温度変化に起因する拘束応力を測定した。

2. 実験方法

2. 1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表-1に示す。配合は、早強ポルトランドセメント(HPC)単味のH40、高炉スラグ微粉末4000(BS4)の置換率を30%としたH35B430、高炉スラグ微粉末6000(BS6)の置換率を50%としたH35B650、H35B650でHPCとBS6の一部を膨張材で均等に置換したH35B650EX、フライアッシュII種(FA)の置換率を20%としたH35F20の5種類とした。過去の実験³⁾で高温履歴を受ける場合に特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自己収縮ひずみが大幅に大きくなることが確認されたため、膨張材を用いたH35B650EXを追加して膨張材による温度ひび割れの抑制効果も検討した。水結合材比は、材齢3日の圧縮強度を同等とするため^{1), 3)}、早強ポルトランドセメント単味の供試体で40%、混和材を

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)	凝結時間		熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + EX + FA					S			G	始発 (min)		終結 (min)
			HPC	BS4	BS6	EX	FA							
H40	40	35	165	413 (100%)	—	—	—	—	758	12.0	4.2	345	464	12.1
H35B430	330 (70%)			141 (30%)	—	—	—	700	13.5	4.4	344	448	12.8	
H35B650	236 (50%)			—	236 (50%)	—	—	695	12.5	3.7	304	416	12.6	
H35B650EX	226 (48%)			—	226 (48%)	20 (4%)	—	696	13.5	3.0	316	448	12.5	
H35F20	377 (80%)			—	—	—	94 (20%)	682	17.0	4.9	396	509	11.0	

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³, 比表面積=4,600cm²/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³, 比表面積=4,440cm²/g, SO₃=2.1%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm³, 比表面積=5,970cm²/g, SO₃=3.1%(無水せっこう添加)), EX: 膨張材(石灰系, 単位量 20kg/m³となるよう HPC と BS6 を均等に置換), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.31g/cm³, 比表面積=4,000cm²/g), 単位量の()内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示
 ※S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm³, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm³, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 化学混和剤: 高性能 AE 減水剤と空気連行剤を使用
 ※熱膨張係数: 封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)を用いて材齢 91 日以降に温度範囲 15~55°C で測定

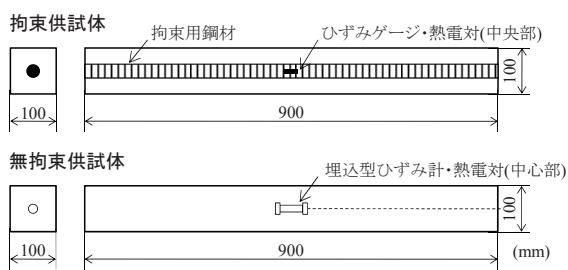


図-1 拘束供試体と無拘束供試体の形状



写真-1 実験の実施状況

用いた供試体で35%とした。なお、単位水量と単位粗骨材量は、全配合で同一とした。

2. 2 拘束試験の方法

供試体の形状を図-1, 実験の実施状況を写真-1に示す。供試体は拘束供試体と無拘束供試体の2種類とした。拘束供試体では、拘束用鋼材として異形鉄筋(D32)あるいはインバー鋼材(φ30, 熱膨張係数 0.7×10⁻⁶/°C)を供試体の断面中心に配置した。実構造物になるべく近い状態で応力を把握するため拘束用鋼材の全長で定着をとり、ひずみゲージと熱電対を拘束用鋼材の長さ方向中央部に設置した。コンクリートの拘束応力は、事前に測定した拘束用鋼材の荷重とひずみの関係を用いて拘束用鋼材のひずみから荷重を求め、この荷重をコンクリートの断面積で除して算出した。一方、無拘束供試体では、埋込型ひずみ計と熱電対を供試体中心部に設置してコンクリートのひずみと温度を測定した。

マスコンクリートの高温履歴を模擬するため、厚さ200mmの発泡スチロール製(発泡倍率90倍)の型枠にコンクリートを打込み、直ちに封緘状態として測定を開始した。また、供試体の変形を型枠で拘束しないように、型枠内部の底面にテフロンシート、これ以外の型枠と供試体の接触面にポリエステルフィルムを設置した。練混ぜ、打込み、測定は室温約20°Cに管理された実験室内で行い、その後、材齢91日の時点でコンクリート打込み面側の供試体表面でひび割れの発生状況を確認した。

2. 3 強度試験の方法

コンクリートの強度特性の経時的な変化を把握するため、圧縮強度とヤング係数、割裂引張強度を終結直後、注水から材齢0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28日の11時点で測定した。圧縮強度とヤング係数は、コンクリート打込み直後から室温約20°Cの実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)とJASS 5 T-606に準拠して発泡スチロール製の容器で簡易断熱養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用い、JIS A 1108とJIS A 1149に準拠して測定した。割裂引張強度は、室温約20°Cの

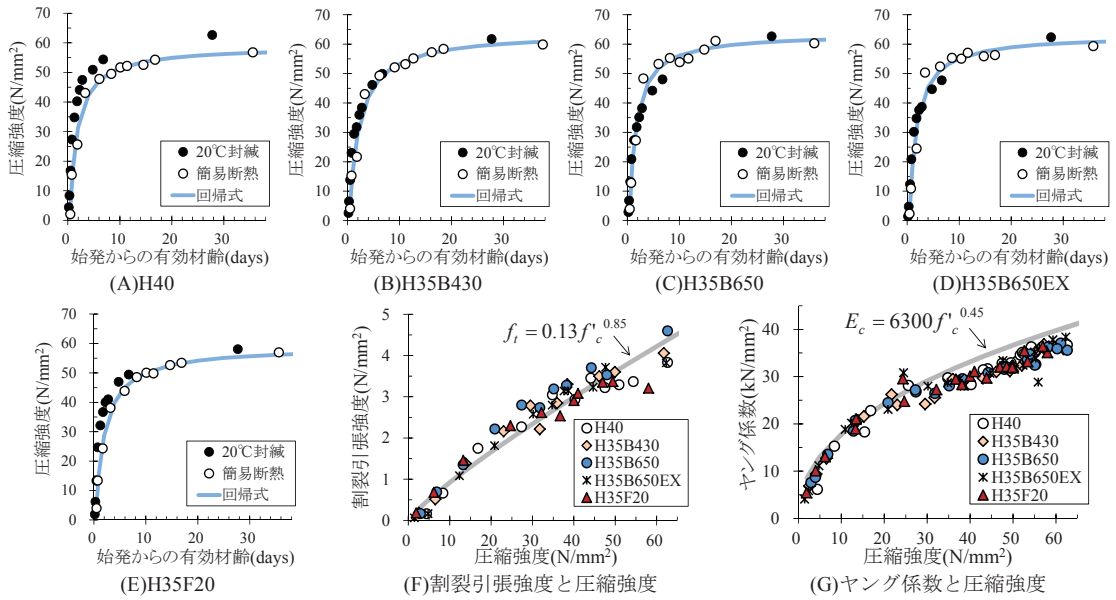


図-2 強度試験の結果

実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ150×150mm)を用い、JIS A 1113に準拠して測定した。

3. 実験結果

3. 1 強度試験の結果

各配合の圧縮強度を図-2(A)~(E)、割裂引張強度と圧縮強度の関係を図-2(F)、ヤング係数と圧縮強度の関係を図-2(G)に示す。無拘束供試体と簡易断熱養生を行った円柱供試体の最高温度が同程度であったため、図-2(A)~(E)では簡易断熱養生を行った円柱供試体の圧縮強度を式(1)で回帰分析して求めた回帰式の計算値を併記した。また、図-2(F)には式(2)、図-2(G)には式(3)で文献5)の係数を用いた場合の計算値を併記した。なお、有効材齢は式(4)で計算した。

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(t_{28}) \tag{1}$$

$$f_t(t_e) = C_1 \cdot f'_c(t_e)^{C_2} \tag{2}$$

$$E_c(t_e) = C_3 \cdot f'_c(t_e)^{C_4} \tag{3}$$

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \tag{4}$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 圧縮強度(N/mm²), t_e : 有効材齢(days), $f'_c(t_{28})$: 材齢28日の圧縮強度(N/mm²), $f_t(t_e)$: 割裂引張強度(N/mm²), $E_c(t_e)$: ヤング係数(kN/mm²), Δt_i : コンクリート温度の継続時間(days), $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度(°C), T_0 : 1°C, $a, b, S_f, C_1, C_2, C_3, C_4$: 係数である。

図-2(A)~(E)から、20°C封緘養生を行った供試体と簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は、有効材齢で整理すると、初期材齢では温度履歴にかかわらず同様の傾向で増加したことが分かる。高温履歴を受ける場合にも初期材齢の強度発現は有効材齢を用いた推定が可能と考えられる。ただし、材齢が長くなると圧縮強度の推移は異なる傾向を示し、混和材を用いた供試体では早強ポルトランドセメント単味のH40と比較して養生条件の違いによる圧縮強度の差が小さくなった。

また、圧縮強度と割裂引張強度、ヤング係数の関係は、混和材や膨張材の使用にかかわらず、同傾向であった。式(2)と式(3)を用いて圧縮強度から割裂引張強度とヤング係数を推定できると考えられる。

3. 2 拘束試験(異形鉄筋)の結果

異形鉄筋を用いた拘束供試体の拘束応力とコンクリート温度、無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-3に示す。有効材齢5日の拘束応力は、早強ポルトランドセメント単味のH40と比較すると、フライアッシュを用いたH35F20で同程度、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650で大きく、特にH35B650では突出して大きくなった。また、拘束応力の大小関係と増加開始時の有効材齢は自己収縮ひずみの傾向と概ね一致した。コンクリート温度は混和材の置換率が高いほど上昇時の勾配が小さくなったが拘束応力への影響はほとんどなく、自己収縮ひずみが大きいほどコンクリートに発生した拘束応力も大きくなる傾向にあった。

一方、膨張材を用いたH35B650EXの拘束応力はH40よりも小さく、膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。ただし、有効材齢5日ではH35B650EXの無拘束供試体には膨張ひずみが生じていたが、拘束供試体には引張応力が発生していた。H35B650EXの膨張ひずみは始発から有効材齢0.5日程度までの若材齢で生じており、コンクリートのヤング係数が小さいことや若材齢クリープの影響を受けたことにより、若材齢の圧縮応力の発生量よりもその後の収縮による引張応力の発生量が大きくなったためと考えられる。

次に、図-3(A)(C)に示した拘束応力と自己収縮ひずみの関係を図-4に示す。H35B650EX以外の供試体では、混和材の使用の有無にかかわらず、自己収縮ひずみと拘束応力の関係の勾配が概ね等しく、自己収縮ひずみの進展とともに拘束応力が増加した。すなわち、混和材の使用の有無にかかわらず、若材齢の自己収縮ひずみの進展と拘束応力の増加は同様の傾向を示し、若材齢クリープによる応力緩和の影響も同程度であったと考えられる。一方、H35B650EXでは、前述したように、始発直後に膨張ひずみが急速に発生したが、その際の圧縮応力の増加量は必ずしも大きくなかった。

3. 3 拘束試験(インバー鋼材)の結果

インバー鋼材を用いた拘束供試体の拘束応力とコンクリート温度、無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-5に示す。有効材齢14日の拘束応力と自己収縮ひずみは、H40と比較すると、異形鉄筋を用いた供試体と同様に、H35F20で同程度、H35B430とH35B650で大きく、特にH35B650では突出して大きくなった。また、材齢3日の圧縮強度を同等とするために水結合材比を調整したことにより、最高温度から有効材齢14日までのコンクリート温度の低下量は配合間でほとんど差がなく、温度降下時の温度ひずみに起因して発生した拘束応力は同程度となったと考えられる。この結果、異形鉄筋を用いた供試体と同様

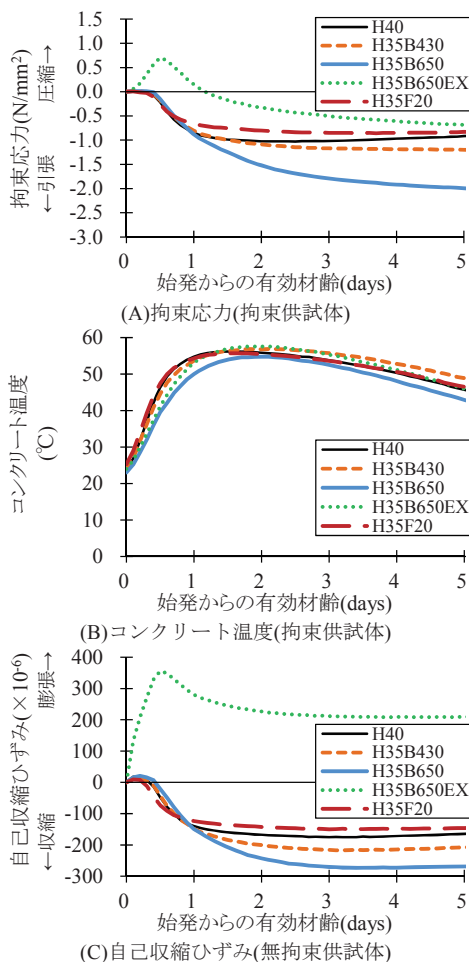


図-3 拘束試験(異形鉄筋)の結果

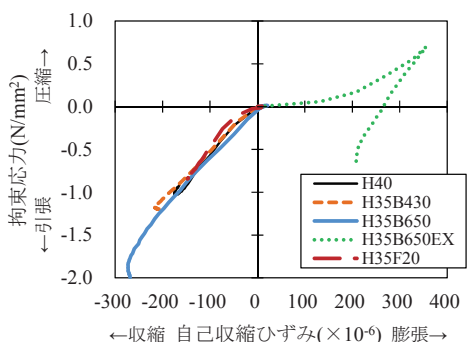


図-4 拘束応力と自己収縮ひずみ

に、自己収縮ひずみが大きい供試体ほど拘束応力も大きくなったと考えられる。

一方、有効材齢14日のH35B650EXの拘束応力はH40よりも若干大きくなったがH35B650よりも小さく、膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。また、圧縮応力が最大となった後のH35B650EXの拘束応力は、H35B650と概ね平行に推移し、H40よりも変化量が大きくなった。H35B650EXの膨張後の収縮量が同じ期間のH40よりも大きくなったためと推察される。

なお、図-5(C)に示した自己収縮ひずみには、有効材齢が長くなると収縮量が減少に転じたものがあった。この現象はひずみの測定値から表-1の熱膨張係数を用いて温度ひずみを差し引いた際に生じたものであるが、原因については必ずしも明確ではなかった。

次に、図-5(A)(B)に示した拘束応力とコンクリート温度の関係を図-6に示す。若干のばらつきはあるが、コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度が低いほどその後の引張応力が小さくなった。既往研究⁶⁾では、コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度を指標として温度ひび割れ抵抗性を定性的に評価する方法が提案されている。自己収縮ひずみが大きくなったH35B430とH35B650では拘束応力がゼロとなる材齢が早くなり、この時点のコンクリート温度も高くなる傾向にあった。このため、拘束応力がゼロとなる時点のコンクリートの温度を比較することにより、自己収縮ひずみの傾向が異なる場合にも引張応力の発生量の違いを定性的に評価できる可能性があると考えられる。

3. 4 ひび割れ発生状況とひび割れ指数

材齢91日に確認したひび割れの発生状況を図-7、材齢91日までのひび割れ指数の最小値を図-8に示す。ひび割れ指数は、図-3(A)と図-5(A)に示したコンクリートの拘束応力を割裂引張強度で除して求めた。割裂引張強度は、図-2(A)～(E)に示した回帰式を用いて拘束供試体の温度履歴に応じた圧縮強度を推定し、この圧縮強度を配合ごとに求めた式(2)の圧縮強度と割裂引張強度の回帰式に入力して算出した。ここでは発泡スチロール製の型枠を用いたためにひび割れ発生材齢を目視で特定することが困難であったが、インバー鋼材を用いたH35B430では材齢61日、H35B650では材齢57日、H35F20では材齢73日に鋼材ひずみが大幅に変動したため、これらの時点のひび割れ指数を示した。他の供試体は、材齢91日のひび割れ指数が最小となったため、この値を示した。

ひび割れの発生状況に着目すると、異形鉄筋を用いた供試体ではH35B430とH35B650で、インバー

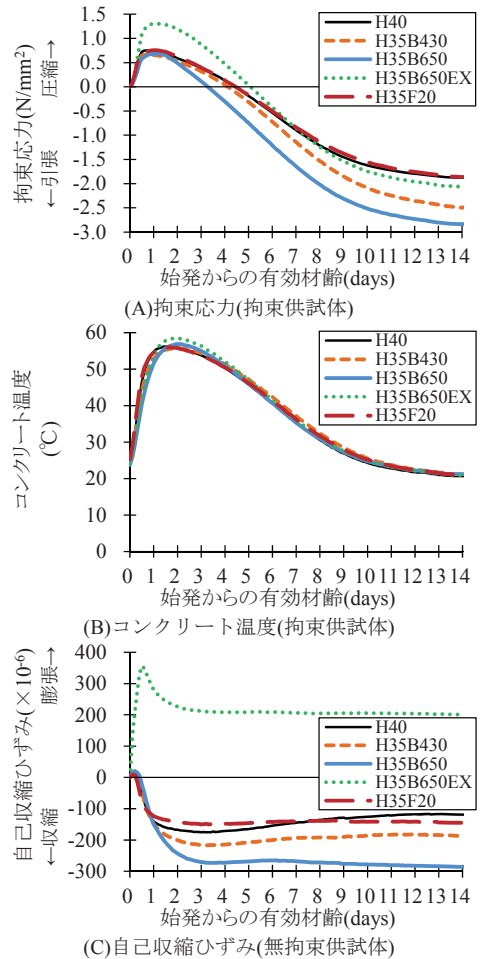


図-5 拘束試験(インバー鋼材)の結果

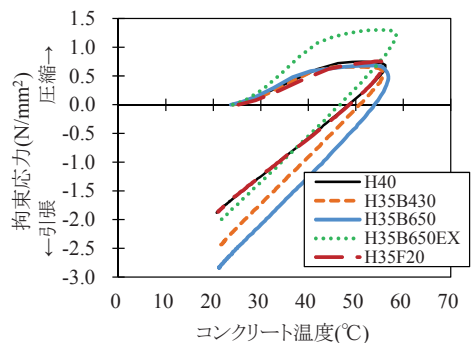


図-6 拘束応力とコンクリート温度

鋼材を用いた供試体ではH35B650EX以外の供試体でひび割れが発生したことが分かる。特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体ではひび割れの幅が広く、本数が多くなったため、早強ポルトランドセメント単味の供試体と比較して温度ひび割れの発生抑制に向けた配慮が重要であると考えられる。一方、H35B650EXではひび割れの発生は認められず、ひび割れ指数が大きくなり、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末6000で置換した場合にも、膨張材の使用によりひび割れの発生を抑制できたことが分かる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材や膨張材の使用の有無にかかわらず、初期材齢の強度発現は有効材齢を用いて推定でき、圧縮強度と割裂引張強度、ヤング係数の関係は同傾向となった。
- (2) 初期材齢に高温履歴を受ける場合、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮ひずみが大きくなり、早強ポルトランドセメント単味の供試体と比べて拘束応力が大きく、ひび割れが多く発生した。
- (3) 早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した供試体においても、膨張材を用いることにより、拘束応力を低減させ、ひび割れの発生を抑制することができた。

なお、本稿は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会、国内7機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の検討結果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 中村英佑ほか：混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究，第 22 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.503-508，2013
- 2) 中村英佑ほか：混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する実験的研究，第 23 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.53-58，2014
- 3) 石井豪ほか：混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響，第 23 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.59-64，2014
- 4) 佐藤重一ほか：現場打ち高強度コンクリートの初期ひび割れに関する検討，第 10 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.551-556，2000
- 5) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，p.298，2008
- 6) Springenschmid, P, et. al: Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine, Thermal cracking in concrete at early ages, RILEM Proceedings 25, E & FN Spon, , pp.137-144, 1994

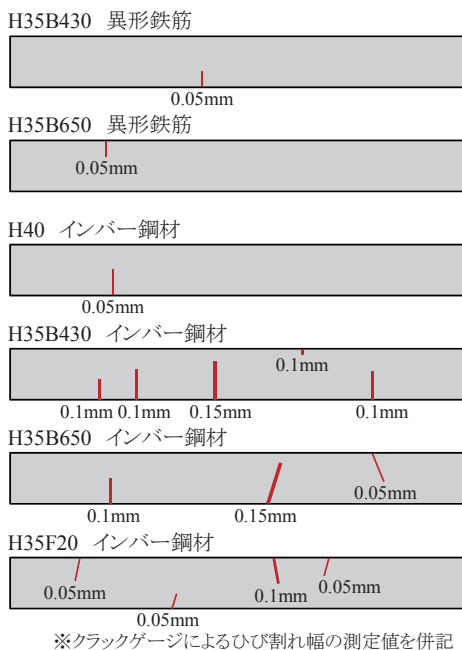


図-7 供試体上面のひび割れ発生状況

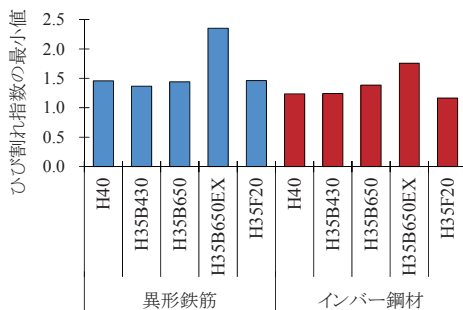


図-8 ひび割れ指数の最小値