

論文 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

竹田宣典*¹・松永篤*²・米田俊一*³・十河茂幸*⁴

要旨：各種の結合材を混合した低発熱性のセメントを用いた高強度コンクリートについて、水和熱による温度履歴を受けた場合の温度応力と自己収縮に起因する応力（自己収縮応力）をJIS原案の温度ひび割れ試験により求め、水和熱による温度履歴および結合材の種類が自己収縮応力に及ぼす影響について検討を行った。その結果、水和熱による温度履歴を受ける場合、自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の発現が速くなることが確認され、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合した結合材を用いたコンクリートは、自己収縮ひずみおよび自己収縮応力が大きくなる傾向が示された。

キーワード：自己収縮，温度応力，温度履歴，高強度コンクリート，混和材

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に対する要求が多様化するに伴い、高強度コンクリートや高流動コンクリートの適用が増え、配合上単位結合材量が増加する傾向にある。これらのコンクリートでは、ひび割れ制御の観点から自己収縮に起因する応力（以下、自己収縮応力と呼称）を考慮しなければならない場合がある。すなわち、水和熱による温度応力の他に、温度履歴を受ける場合の自己収縮応力を評価し、ひび割れに対する危険性を検討する必要がある。これまで、自己収縮ひずみおよび自己収縮応力に関する報告[1], [2], [3], [4], [5]がなされているが、水和熱による温度履歴が、自己収縮ひずみおよび自己収縮応力に及ぼす影響については明らかにされていない。

本論文では、低熱ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の結合材を混合した低発熱性のセメントを用いた高強度コンクリートについて、拘束条件下において水和熱による温度履歴を受ける場合の発生応力を調べる試験[6]を行い、水和熱による温度履歴が自己収縮ひずみおよび自己収縮応力に及ぼす影響について検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

使用材料とその性質を表-1に示す。結合材として、低熱ポルトランドセメント（記号：L、 C_2S 含有量：52%）、低熱ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を70%混合した結合材（記号：BCL）、および低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを25%混合した結合材（記号：FCL）の3種類を用いた。また、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの配合を表-2に示す。いずれの配合も水結合材比を30%、単位結合材量を 550kg/m^3 とし、スランプフローが $600\pm 50\text{mm}$ 、空気量が $2.0\pm 0.5\%$ となる様に混和剤の添加量を調整した。

*1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、工修（正会員）

*2 宇部興産(株)建設資材事業本部 技術開発部 主任研究員、工修（正会員）

*3 宇部興産(株)建設資材事業本部 技術開発部 グループリーダー、工博（正会員）

*4 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 室長、工博（正会員）

表－１ 使用材料および性質

使用材料の種類	性 質
低熱ポルトランドセメント	C ₂ S:52%, C ₃ S:27%, 比重:3.23, 比表面積:3380cm ² /g
高炉スラグ微粉末	比重:2.88, 比表面積:5400cm ² /g
フライアッシュ	比重:2.24, 比表面積:3760cm ² /g
細 骨 材	福岡県産海砂, 表乾比重:2.55 吸水率:1.45%, F. M.:2.70
粗 骨 材	山口県産硬質砂岩砕石, 最大寸法:20mm 表乾比重:2.70, 吸水率:0.56%, F. M.:6.61

表－２ コンクリートの配合

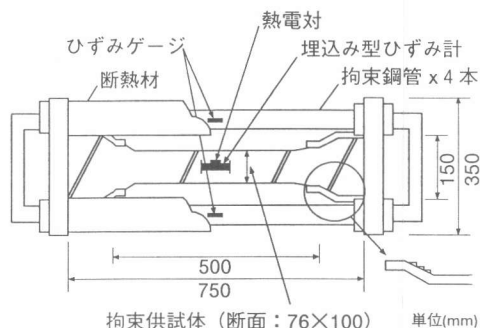
配合の 種 類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 (W)	結 合 材 (B)		細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (A _d)	
				低熱・ ポランド セメント	高 炉 スラグ 微粉末				フ ラ イ ア ッ シュ
L	30.0	43.0	165	550	0	0	712	991	8.80
BCL				165	385	0	702	975	4.95
FCL				413	0	137	689	964	8.80

２．２ 試験方法

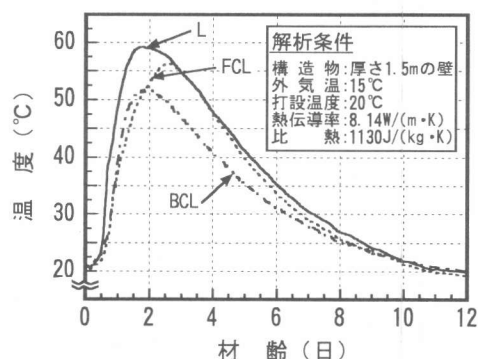
温度ひび割れ試験は、図－１に示すJIS原案の「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準拠して行った。試験装置および拘束されたコンクリート供試体(以下、拘束供試体と呼称)は温度制御が可能な槽に静置した。拘束供試体の温度は、２次元FEMによる温度解析によって求めた厚さ1.5mの壁モデルの中心部の温度履歴を与えた場合(温度履歴あり)と、20℃の一定温度とした場合(温度履歴なし)の２ケースとした。コンクリートの熱定数は、断熱温度上昇試験によって求めた値を用いた。図－２に温度ひび割れ試験において拘束供試体に与えた温度履歴を示す。温度履歴を与えた試験は、拘束供試体の見かけの拘束率を大きくするために、拘束鋼管の温度を打込み後12時間経過した時点より0.08℃/hrの割合で上昇させ、拘束供試体が破断するまで実施した。いずれの試験においても、拘束供試体の型枠による拘束を極力低減するために、型枠底板にテフロンシートを取付け、側板には発泡ポリスチレン板を用いた。打込み後は、拘束供試体からの水分の逸散を防ぐため、ビニルシートにより封緘した。また、拘束鋼管にひずみゲージを貼り付け、拘束供試体の内部に熱電対および埋込み型ひずみ計を設置した。埋込み型ひずみ計は、凝結の始発時点より、コンクリートのひずみの測定が可能な様に、見かけの弾性係数が約40N/mm²と小さいものを用いた。埋込み型ひずみ計を設置した無拘束状態の供試体(断面10×10cm, 長さ30cm, 以下、無拘束供試体と呼称)および圧縮強度・引張強度・弾性係数測定用の供試体(直径10cm, 長さ20cm)も、ビニルシートにより封緘して試験槽内に設置し、拘束供試体と同様の温度履歴を与えた。

２．３ 自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の計算方法

自己収縮ひずみは、無拘束供試体のひずみから温度変化によるひずみを差し引いた値とした。温度変化によるひずみは、供試体の発熱あるいは供試体に与えた温度履歴に起因するものであり、いずれの配合においても、熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として計算した。自己収縮ひずみは、打設直後より計測を行ったが、コンクリートの凝結の始発時を初期値とした。自己収縮応力は、拘束



図－１ 温度ひび割れ試験装置



図－２ 供試体に与えた温度履歴

供試体に発生する全応力（拘束応力）から水和熱に起因する温度応力を差し引くことにより求めた。以下示す計算方法により、水和熱による温度履歴を受けた場合と20℃の一定温度で養生した場合の温度応力および自己収縮応力について比較を行った。

- ①拘束鋼管のひずみ(ϵ_s)より拘束応力(σ_r)を求める。
- ②拘束供試体の温度変化量(Δt)より、温度応力の増分($\Delta \sigma_t$)を求め、各ステップの応力増分を総和し温度応力(σ_t)とする。図-3に拘束ひずみ(拘束供試体ひずみと無拘束供試体ひずみの差)と拘束応力の関係を示す。図中の曲線の傾きを見かけの有効ヤング係数(E_e)と呼び、拘束条件下でのクリープの影響を含んだヤング係数と考えられる。計算ステップは2時間毎とした。
- ③拘束応力(σ_r)より温度応力(σ_t)を差し引き温度履歴を受ける場合の自己収縮応力(σ_a)とする。

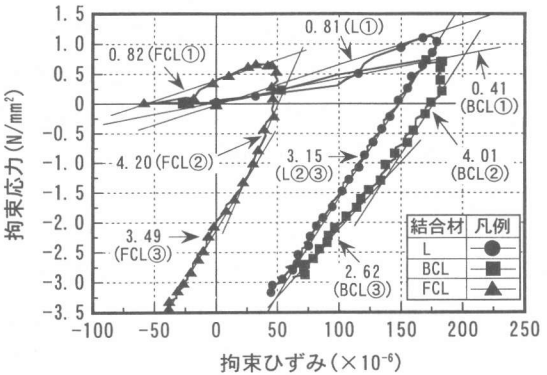
$$\sigma_r = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s / A_c \quad \dots (1)$$

A_s : 拘束鋼管の断面積(mm²)
 E_s : 拘束鋼管のヤング係数(N/mm²)
 A_c : 拘束供試体の断面積(mm²)
 ϵ_s : 拘束鋼管のひずみ

$$\sigma_t = \sum \Delta \sigma_t = \sum (K \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot E_e) \quad \dots (2)$$

α : 熱膨張係数
 E_e : 見かけの有効ヤング係数(N/mm²)
 K : 拘束率=($\Delta \epsilon_f - \Delta \epsilon_r$)/ $\Delta \epsilon_f$
 $\Delta \epsilon_f$: 無拘束供試体のひずみの変化量
 $\Delta \epsilon_r$: 拘束供試体のひずみの変化量

$$\sigma_a = \sigma_r - \sigma_t \quad \dots (3)$$



(図中の数字は見かけの有効ヤング係数($\times 10^4$ N/mm²))

図-3 拘束ひずみと拘束応力の関係

3. 実験結果および考察

3. 1 コンクリートの物性値

コンクリートの性質を表-3に示す。標準養生した場合の圧縮強度は、いずれの結合材を用いた場合も、材齢28日において55~65N/mm²の範囲にあった。また、20℃の一定温度で養生した場合の自己収縮ひずみは、材齢14日においてLで約150 μ 、BCLで約130 μ 、FCLで約110 μ であった。

3. 2 自己収縮ひずみに及ぼす温度の影響

水和熱による温度履歴を受けた場合と20℃で養生した場合の自己収縮ひずみの経時変化を図-4に示す。いずれの配合のコンクリートも、水和熱による温度履歴を受けると、自己収縮ひずみは速く発現する傾向を示すが、低熱ポルトランドセメントのみを用いた場合(L)では、材齢を経るに従って、20℃で養生した場合の方が大きくなった。高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いた場合(BCL、FCL)は、材齢に関わらず水和熱

表-3 コンクリートの性質

結合材の種類	断熱温度上昇試験結果		圧縮強度 材齢28日 (N/mm ²)	静弾性係数 材齢28日 ($\times 10^4$ /mm ²)	自己収縮ひずみ 材齢14日 (μ)
	K(°C)	α			
L	54.5	0.69	62.4	3.31	153
BCL	44.9	0.65	56.6	3.34	133
FCL	50.6	0.58	59.9	3.51	111

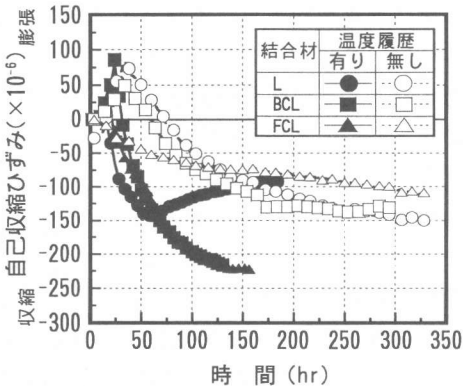


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

による温度履歴を受ける方が自己収縮ひずみは大きくなり、材齢 6 日程度において供試体が破断した時点で、自己収縮ひずみは 200μ 以上となった。

積算温度と自己収縮ひずみの関係を図-5に示す。Lの自己収縮ひずみは、積算温度が小さい時は、水和熱による温度履歴を受ける方が大きいが、積算温度が大きくなると、 20°C で養生した方が大きくなった。BCL、FCLでは、積算温度に関わらず水和熱による温度履歴を受ける方が自己収縮ひずみは大きくなった。高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いた場合、自己収縮ひずみは、水和熱による温度履歴を受けると大きくなる傾向を示し、積算温度で整理することはできなかった。

3. 3 自己収縮応力の評価

(1) 温度一定の場合

20°C の一定温度とした場合の温度ひび割れ試験の結果を表-4に示し、同試験における自己収縮応力の経時変化を図-6に示す。 20°C の一定温度とした場合、材齢14日における自己収縮応力は、Lで約 1.3N/mm^2 、BCLで約 1.0N/mm^2 、FCLで約 0.4N/mm^2 であった。温度変化を受けない場合、全発生応力に対する自己収縮応力の比率は、いずれの配合においても90%以上であったが、自己収縮ひずみが $100\sim 150\mu$ 程度であっても、 1.0N/mm^2 程度の自己収縮応力が発生することが認められた。

(2) 水和熱による温度履歴を受ける場合

水和熱による温度履歴を受けた場合の温度ひび割れ試験の結果および供試体の破断時の自己収縮応力の計算結果を表-5に示す。ひび割れ発生材齢は、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した場合は、低熱ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて早いが、引張強度に対する破断時の応力の比率は、いずれの結合材を用いた場合も90%程度以上であった。

また、水和熱による温度履歴を受けた場合の温度応力および自己収縮応力の経時変化を図-7に示す。いずれの結合材を用いた場合も、水和熱による温度履歴を受ける場合の自己収縮応

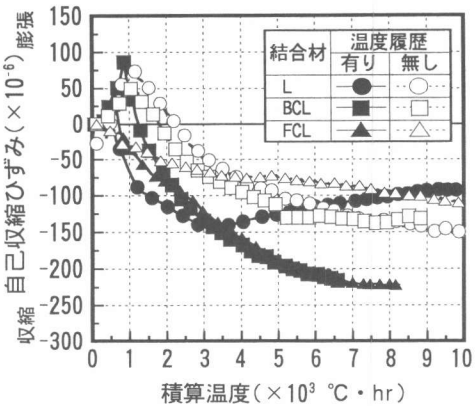


図-5 積算温度と自己収縮ひずみの関係

表-4 一定温度(20°C)で養生した場合の温度ひび割れ試験結果(材齢14日)

結合材の種類	積算温度(°C·hr)	温度上昇量(°C)	拘束応力 σ_r (N/mm^2)	温度応力 σ_t (N/mm^2)	自己収縮応力 σ_a (N/mm^2)	σ_a/σ_r
L	10000	1.5	1.33	0.05	1.29	0.97
BCL	8950	1.7	1.09	0.07	1.02	0.94
FCL	10100	1.5	0.49	0.05	0.44	0.90

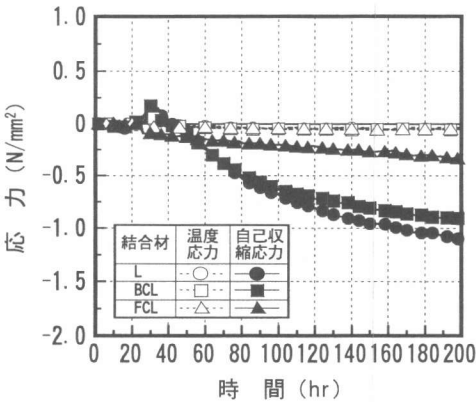


図-6 自己収縮応力の経時変化(養生温度: 20°C)

表-5 水和熱による温度履歴を受ける場合の温度ひび割れ試験結果(破断時)

結合材の種類	破断材齢(hr)	最高温度(°C)	積算温度(°C·hr)	破断応力 σ_r (N/mm^2)	引張強度 f_t (N/mm^2)	σ_r/f_t	自己収縮ひずみ(μ)	温度応力 σ_t (N/mm^2)	自己収縮応力 σ_a (N/mm^2)	σ_a/σ_r
L	187	38.0	9600	3.17	3.55	0.89	82	1.99	1.18	0.37
BCL	132	31.0	6700	2.92	3.26	0.90	217	1.01	1.91	0.65
FCL	158	35.1	8100	3.62	3.69	0.98	222	1.01	2.62	0.72

力は、温度が降下し始める時点で約80%が発現しており、それ以降の引張応力の増加に対しては、温度降下に伴う温度応力の影響が大きくなり、20℃で養生した場合に比べて早期に発現する傾向を示した。

また、いずれの結合材を用いた場合も、水和熱による温度履歴を受けた場合の拘束供試体の破断時の自己収縮応力は、Lで約1.2N/mm²、BCLで約1.9N/mm²、FCLで約2.6N/mm²であり、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した場合は、低熱ポルトランドセメントのみを用いる場合に比べて、破断時の自己収縮応力は大きい傾向を示した。

水和熱による温度履歴を受けた場合の全発生応力に対する自己収縮応力の比率は、破断する材齢により異なるが、本実験での供試体の破断時においては、Lで37%、BCLで65%、FCLで72%であった。すなわち、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いた場合は、低熱ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて、破断応力に対する自己収縮応力の影響が大きくなると考えられる。

積算温度と自己収縮応力の関係を図-8に示す。水和熱による温度履歴を受けた場合の破断時の自己収縮応力は、20℃で養生した場合の同一積算温度の時点と比較して、Lではほぼ同等であるが、BCLで約2倍、FCLで約6倍であった。すなわち、低熱ポルトランドセメントのみを用いた場合は、自己収縮応力に対する水和熱による温度履歴の影響は比較的少ないが、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いた場合は、積算温度が同一であっても水和熱による温度履歴を受ける方が、自己収縮応力は大きくなる。これは、水和熱による温度履歴の影響により、自己収縮ひずみの発現が速くなったためと考えられ、既往の研究[7]に示されているように、低熱ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの強度発現は、高炉スラグ微粉末を混合した場合に比べて、水和熱による温度履歴の影響を受けにくいことも関係しており、結合材の水和反応機構が影響しているものと考えられる。

20℃の一定温度で養生した場合の自己収縮ひずみの発現が同等であっても、結合材の種類によって、水和熱による温度履歴が、破断に到るまでのヤング

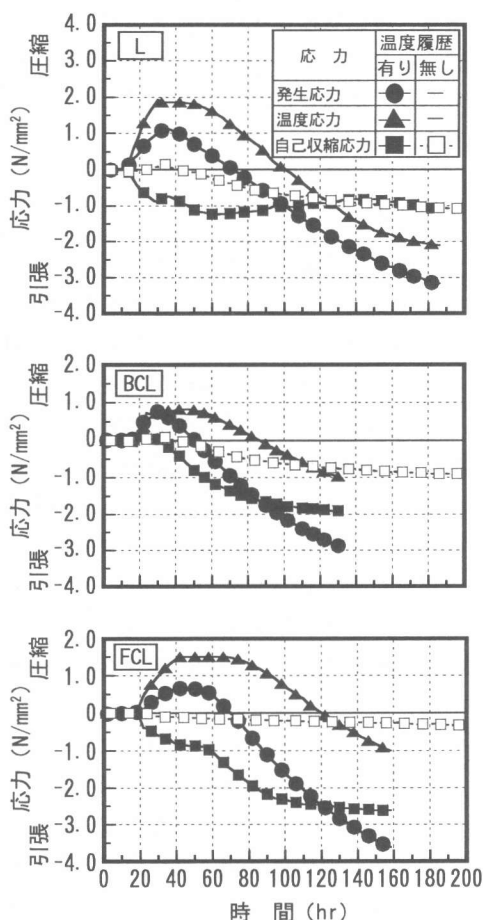


図-7 自己収縮応力の経時変化
(水和熱による温度履歴あり)

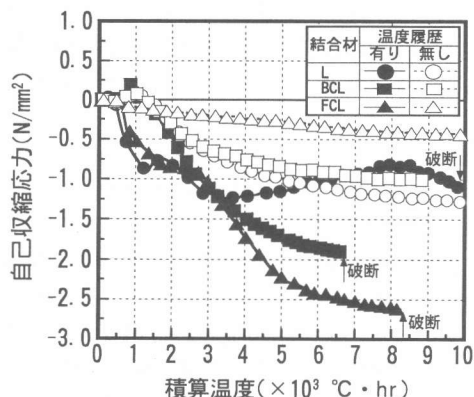


図-8 積算温度と自己収縮応力の関係

係数、自己収縮ひずみの発現性およびクリープ特性等に及ぼす影響は異なるため、温度履歴を受ける場合の自己収縮応力は異なる場合があることが確認された。自己収縮ひずみおよび自己収縮応力は、水和熱による温度履歴を受ける場合と一定温度における場合とでは、その発現性が異なると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果、以下のことが明らかになった。

(1) 自己収縮ひずみに及ぼす水和熱による温度履歴の影響は、結合材の種類によって異なることが確認された。高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材は、水和熱による温度履歴を受けると自己収縮ひずみは大きくなり、積算温度で整理できない場合があった。

(2) 水和熱による温度履歴の影響を受けない場合、自己収縮ひずみが $100\sim 150\mu$ 程度であっても、 1.0N/mm^2 程度の自己収縮応力が発生する場合があることが認められた。

(3) 低熱ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートでは、自己収縮応力に対する水和熱による温度履歴の影響は比較的少ないが、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いたコンクリートでは、水和熱による温度履歴を受ける場合は、 20°C で養生した場合に比べて自己収縮応力は大きくなる傾向を示した。この理由は、水和熱による温度履歴を受けることにより破断に到るまでのヤング係数、自己収縮ひずみ等の発現性が変化するためと考えられる。

(4) 高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混合した結合材を用いた場合は、低熱ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて、温度ひび割れ試験における破断応力に対する自己収縮応力の影響が大きくなる傾向が示された。

(5) 水和熱による温度履歴を受ける場合と受けない場合の自己収縮応力の発現性は異なり、水和熱による温度履歴が、自己収縮応力へ及ぼす影響の程度は、結合材の種類によって異なると考えられる。したがって、高強度コンクリートのひび割れ抵抗性を検討する際には、水和熱による温度履歴を受ける場合の自己収縮の影響を考慮することが必要である。

【参考文献】

- [1] 宮澤伸吾、田澤栄一、佐藤 剛、佐藤克俊：鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 57-62, 1993. 7
- [2] 筒井英之、佐藤良一、許 明：高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討、第50回セメント技術大会講演要旨, pp. 206-207, 1996
- [3] Tazawa, E., Matsuoka, Y., Miyazawa, S., Okamoto, S.: Effect of Autogenous Shrinkage on Self-Stress in Hardening Concrete, Int. RILEM Sym. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp. 221-228, 1994
- [4] 筋野晃司、田澤栄一、宮澤伸吾、保明淳二：マスコンクリートのひび割れ発生に及ぼす自己収縮の影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 1139-1144, 1995. 6
- [5] 松永 篤、米田俊一、竹田宣典、十河茂幸：自己収縮の異なる混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 1, pp. 1287-1292, 1996. 7
- [6] 仕入豊和、青柳征夫、川瀬清孝：コンクリートのひび割れ試験方法（案）、コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 40-49, 1985. 3
- [7] 青木 茂、三浦律彦、竹田宣典、十河茂幸：ピーライト高含有セメントを用いた高強度コンクリートの高温履歴下での強度発現性、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 16-1, pp. 1317-1322, 1994