論文　混和材利用早強コンクリートの自己収縮特性とその予測

北野　勇一[*1]・鈴木　雅博[*1]・石井　豪[*2]・中村　英佑[*2]

要旨：フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を利用した早強コンクリートを対象に練上り温度や打込み後の温度履歴が自己収縮特性に与える影響について実験的に検討し，混和材を利用することによって自己収縮ひずみの発現時期，増加速度，最大値が異なることを確認した。また，高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみの増加速度は，20℃一定の場合と比べ，有効材齢で整理しても大幅に早まることを確認した。これらの結果および既往の実験データに基づき現在使用されている予測式に改良を加えることで，混和材利用早強コンクリートの自己収縮ひずみを予測することを試みた。

キーワード：混和材，早強コンクリート，自己収縮

1. はじめに

近年，プレストレストコンクリート構造物の建設材料としてフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材を利用するケースが増えつつある。この際，プレストレス導入時強度を確保するため，早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせたコンクリート（以下，混和材利用早強コンクリートという）が採用されることが多い。この混和材利用早強コンクリートは，組織が緻密で物質透過性が小さいことから，プレストレストコンクリート構造物の耐久性を高めると考えられる。ところが，混和材利用早強コンクリートは早強コンクリートに比べ単位結合材量が増加する傾向にあり，混和材の利用方法によっては，セメントの水和時に発生する水和熱やコンクリートの自己収縮による体積変化が増大し，これに起因する初期ひび割れの発生が懸念される。また，混和材利用早強コンクリートの発熱特性や自己収縮特性に関する調査事例は少なく，既往の技術指針[1), 2)]には初期ひび割れ抵抗性を照査するための材料の設計値が特に示されていない現状にある。

そこで，フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を利用した早強コンクリートを対象とした材料実験を行い，練上り温度や打込み後の温度履歴が自己収縮特性に与える影響について検討した。また，既往の実験データと本実験の結果に基づき，混和材利用早強コンクリートの自己収縮ひずみ予測式を新たに検討した。

なお，本文は既報[3)]を詳細に検討したものである。

2. 実験方法

2.1 コンクリート配合

実験に用いるコンクリートの配合を**表－1** に示す。早強コンクリートである H40 は，ポストテンション方式プレストレストコンクリート橋への適用を念頭に，設計基準強度 40N/mm^2 と材齢 3 日のプレストレス導入時強度 30N/mm^2 が得られるように水結合材比を 40%とした。混和材利用早強コンクリートについては，これまでの採用実績を考慮し，早強ポルトランドセメントをベースとして混和材利用率をフライアッシュⅡ種で 20%とした H35F20, 高炉スラグ微粉末 4000 で 30%とした H35B430, 高炉スラグ微粉末 6000 で 50%とした H35B650 の配合を選定した。混和材利用率とは式(1)による。

$$UR = \frac{SCM}{SCM + C} \times 100 \qquad (1)$$

ここで，UR：混和材利用率(%)，SCM：単位混和材量(kg/m^3)，C：単位セメント量(kg/m^3)。

混和材利用早強コンクリートの水結合材比は，早強コンクリートと同一の W/B=40%にするとプレストレス導入時強度が得られなくなるため, W/B=35%とした。また，上記以外のコンクリート配合の違いが自己収縮特性に与える影響を極力避けるため，各配合とも単位水量と単位粗骨材量を同一とし，スランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%が得られるように化学混和剤（ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤で, 練上り温度 10℃と 20℃は標準形，30℃は遅延形）の使用量を調整した。

2.2 実験水準および供試体

今回実施した実験水準を**表－2** に, 供試体形状を**図－1** に示す。ここでは，2 つのシリーズを設定して自己収縮ひずみの測定を行うことにした。シリーズⅠは 100×100×400mm の小型供試体を作製し，コンクリート温度を概ね 20℃に保持した。シリーズⅡでは，400×400×400mm のマスブロック供試体を作製し, 外周 6 面を厚さ 200mm

*1 （一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会　(正会員)
*2 （独）土木研究所　つくば中央研究所　材料資源研究グループ　基礎材料チーム　(正会員)

表－1　コンクリート配合

コンクリートの種類	配合名	セメント種類 (C)	水結合材比 W/B(%)	(水セメント比) W/C(%)	混和材種類 (SCM)	混和材利用率 UR (%)	単位量（kg/m³） W	B SCM	B C	S	G
早強コンクリート	H40	H	40	(40.0)	－	0	165	0	413	758	968
混和材利用早強コンクリート	H35F20		35	(43.8)	F	20		94	377	682	
	H35B430			(50.0)	B4	30		141	330	700	
	H35B650			(69.9)	B6	50		236	236	695	

H：早強ポルトランドセメント（密度 3.14gcm³，比表面積 4580cm²/g），F：フライアッシュⅡ種（密度 2.08gcm³，比表面積 3810cm²/g），B4：高炉スラグ微粉末 4000（密度 2.89gcm³，比表面積 3810cm²/g），B6：高炉スラグ微粉末 6000（密度 2.91gcm³，比表面積 6170cm²/g），S：砂（表乾密度 2.56gcm³，吸水率 2.23%），G：砕石 5 号（表乾密度 2.67gcm³，吸水率 0.43%）と砕石 6 号（表乾密度 2.67gcm³，吸水率 0.46%）を質量比で 1：1 の混合使用。

の発泡スチロール（発泡倍率 90 倍）で覆い簡易的な断熱を行うことにより，打込み後のコンクリート温度を高温に保持した。シリーズⅡについては，コンクリートの練上り温度を 10℃，20℃，30℃に変化させた。

2.3 試験項目

各供試体の中心部に低弾性タイプの埋込型ひずみ計を設置し，自己収縮ひずみを材齢 56 日まで測定した。同時に供試体中心部のコンクリート温度を測定した。また，小型試験体を用い，材齢 56 日以降に温度範囲 20～55℃におけるひずみ測定を行い，熱膨張係数を算出した。別途，封緘養生を行った供試体による圧縮強度試験（JIS A 1108）と凝結試験（JIS A 1147）を実施した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度，凝結，熱膨張係数試験の結果

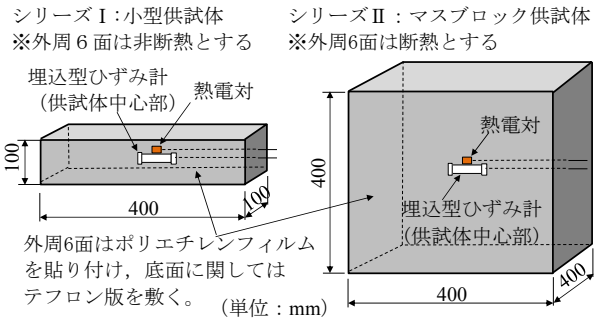
材齢 3 日の圧縮強度試験結果を**図－2** に示す。練上り温度 20℃と 30℃ではプレストレス導入時強度を確保することができた。練上り温度 10℃ではいずれの配合も 30N/mm² 前後であり，混和材利用率が高まるほど低温時の強度低下が顕著になった。なお，材齢 28 日の圧縮強度は配合および練上り温度によらず 40N/mm² を上回った。

凝結試験の結果を**図－3** に示す。いずれの配合においても，練上り温度が高く（低く）なるにつれ始発および終結とも早く（遅く）なることが確認された。ただし，混和材利用の有無による凝結時間の差異は最大でも 0.06 日であり，今回検討した混和材利用早強コンクリートの凝結特性は早強コンクリートのそれと同等の扱いができると考えられる。

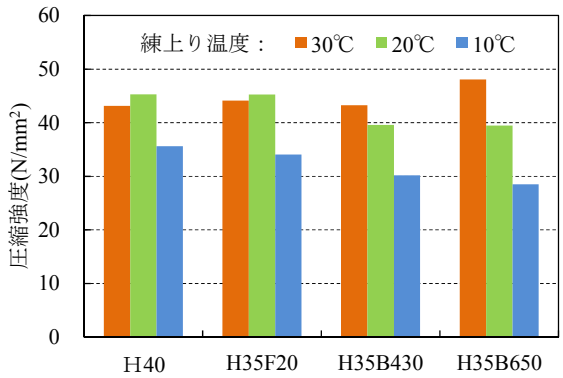
熱膨張係数は，H40 で 11.8×10⁻⁶/℃，H35F20 で 11.4×10⁻⁶/℃，H35B430 で 12.0×10⁻⁶/℃，H35B650 で 11.9×10⁻⁶/℃であり，混和材の種類や利用率の影響は小さいことが確認された。

表－2　実験水準

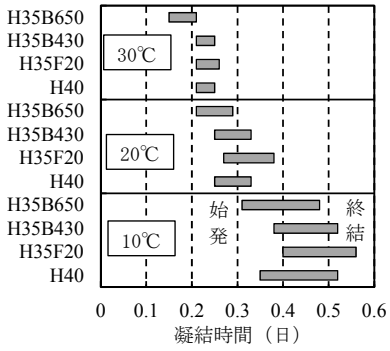
シリーズ	練上り温度	打込み後の温度履歴	コンクリート配合 H40	H35 F20	H35 B430	H35 B650
Ⅰ	20℃	20℃	○	○	○	○
Ⅱ	10℃	高温	○	○	○	○
	20℃		○	○	○	○
	30℃		○	○	○	○



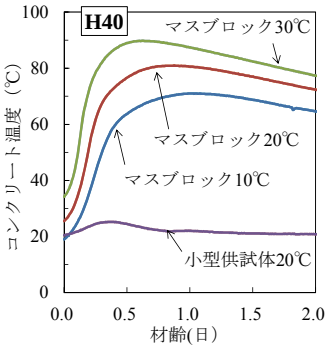
図－1　供試体形状



図－2　圧縮強度試験結果（材齢 3 日）



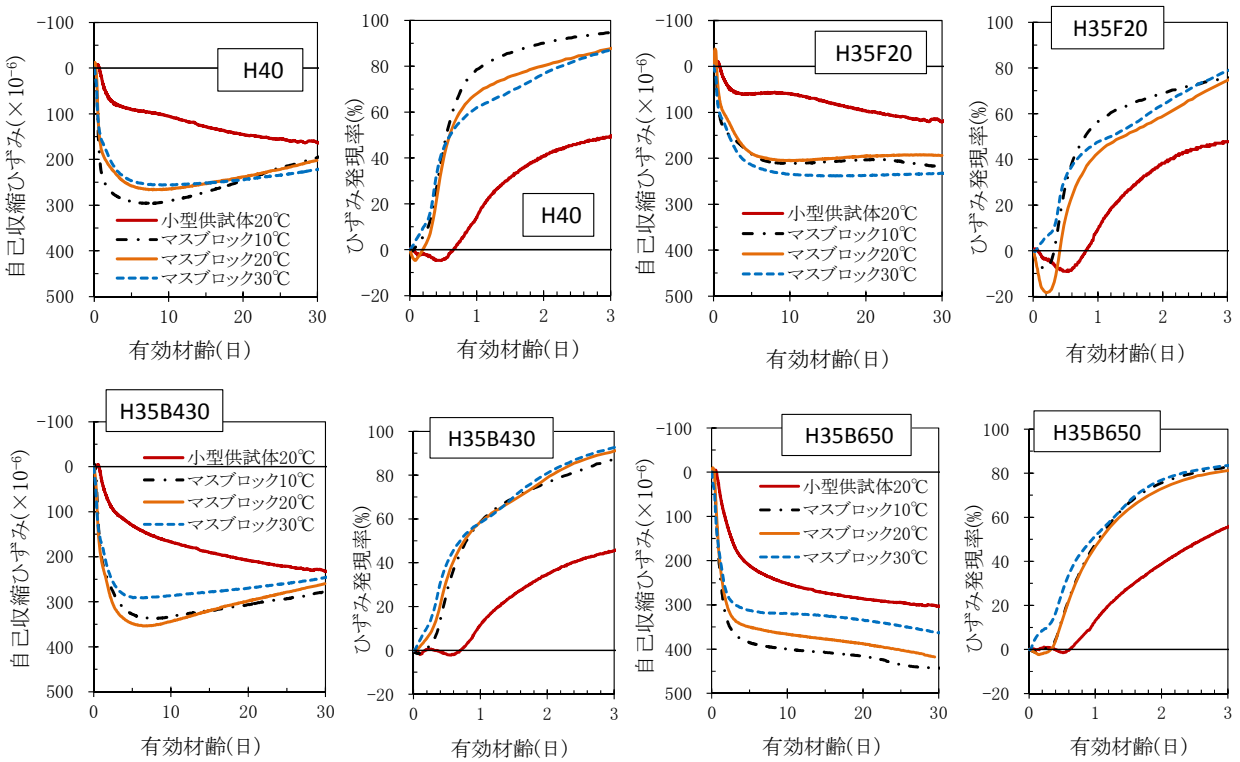
図－3　凝結試験の結果



図－4　温度履歴

表－3　コンクリート最高温度（℃）

配合	小型供試体	マスブロック		
		10℃	20℃	30℃
H40	25.2	71.0	81.0	89.8
H35F20	25.1	72.4	82.4	91.4
H35B430	24.5	74.6	83.3	92.0
H35B650	25.0	70.9	79.9	89.8



図－5　自己収縮ひずみの推移とひずみ発現率

3.2 自己収縮試験の結果

打込み直後からのコンクリート温度を測定した結果，各配合とも同様な温度履歴を示し，小型供試体では最大5℃，マスブロック供試体では最大 60℃の温度上昇が確認された（**図－4**）。また，各供試体が経験したコンクリートの最高温度は，練上り温度が同じであれば，各配合とも同程度になった（**表－3**）。

図－5 には文献 2)に示される有効材齢で整理した自己収縮ひずみの推移と，有効材齢 28 日までの間に確認された自己収縮ひずみの最大値に対する発現率を示す。自己収縮ひずみは埋込型ゲージで得られる全ひずみよりコンクリートの温度ひずみ（温度は**図－4**，熱膨張係数は 3.1 節に示した値を用いる）を差し引いて得た。その結果，混和材を利用することによって自己収縮ひずみの発現時期，増加速度，最大値が異なることが確認された。特に，マスブロック供試体の自己収縮ひずみの発現時期は，発現率が 50%に達する有効材齢を確認すると，H40 が 0.6 日であるのに対し，混和材を利用したものは 0.8～1.0 日であり，0.2～0.4 日ほど遅れる傾向にあった。また，高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみの増加速度は，20℃一定の場合と比べ，有効材齢で整理しても大幅に早まることが確認された。この現象は，混和材利用の有無によらず，早強コンクリートについても確認された。

4. 混和材利用早強コンクリートの自己収縮特性の予測

4.1 自己収縮ひずみ予測式の改良について

現在使用されている自己収縮ひずみ予測式[1]（以下，現予測式という）を混和材の利用にも対応させるため，式(2)～(6)として改良する（以下，改良式という）。また，ここでは，早強コンクリートを H，フライアッシュ利用

早強コンクリート（UR=10～20%）を HFB，高炉スラグ微粉末利用早強コンクリート（UR=30～60%）を HBB の記号で示す。

$$\varepsilon_{ag} = -\beta\varepsilon'_{as\infty}\left[1 - \exp\left\{-a\left(t' - t_s - t_d\right)^b\right\}\right] \qquad (2)$$

ここで，β：配合補正係数（H，HFB は 1.2，HBB は 1.0），t'：有効材齢（日），t_s：凝結の始発（H，HFB，HBB は 0.20 日（3.1 節参照）），t_d：自己収縮の発現時期の遅れ（H は 0.0 日，HFB，HBB は 0.30 日（3.2 節参照））。

$\varepsilon'_{as\infty}$：自己収縮ひずみの最終値（$\times 10^{-6}$）

$$\varepsilon'_{as\infty} = c_1 \exp\left\{c_2\left(\frac{W}{k \times SCM + C}\right)\right\} + \varepsilon'_{asT} \qquad (3)$$

c_1, c_2：係数（H, HFB は c_1=3070, c_2=-7.2, HBB は c_1=2350, c_2=-5.8），k：混和材寄与率。

ε'_{asT}：高温履歴による自己収縮の増加量（$\times 10^{-6}$）

$$\varepsilon'_{asT} = \varepsilon'_{asT\infty}\left[1 - \exp\left\{-1.2 \times 10^{-6}\left(T_{\max} - 20\right)\right\}\right] \qquad (4)$$

$\varepsilon'_{asT\infty}$：高温履歴による自己収縮の増加量の最終値（$\times 10^{-6}$）（H，HFB は 50，HBB は 80）

a，b：自己収縮の進行特性を表す係数

$$a = 3.7 \times \exp\left\{-6.8\left(\frac{W}{k \times SCM + C}\right)\right\} \times g \qquad (5)$$

$$b = 0.25 \times \exp\left\{2.5\left(\frac{W}{k \times SCM + C}\right)\right\} \times h \qquad (6)$$

g，h：高温履歴による影響を表す係数（H，HFB は g=h=1.0, HBB は g=0.060T_{max}-0.20, h=-0.0075T_{max}+1.15）。

4.2 自己収縮ひずみの最終値について

ここでは，既往の実験データ[4)～8)]に基づき，4.1 節に示した改良式の適用性を検討する。

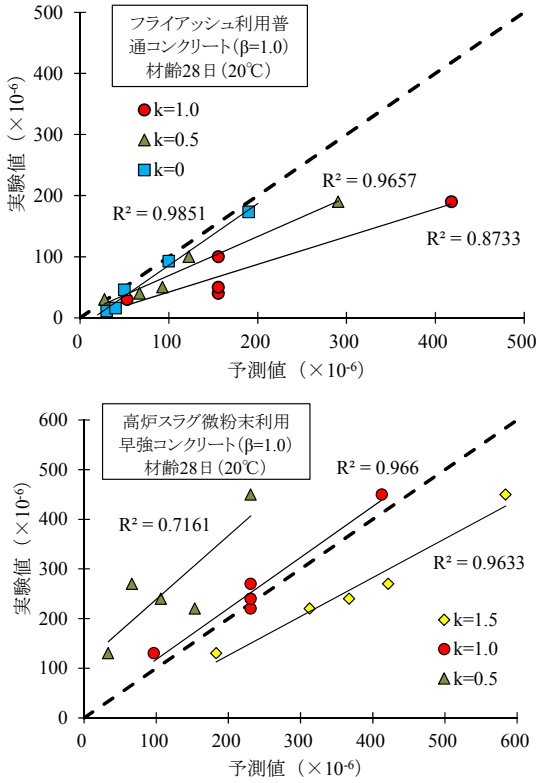
表－4 は，温度 20℃，材齢 28 日時点の自己収縮ひずみの実験値を収集し，文献の図より判別するため 10×10^{-6} 単位で表示したものである。実験データの一部は材齢 56 日の結果であったため，自己収縮ひずみの進行度の比率より材齢 28 日に換算している。また，フライアッシュについては早強ポルトランドセメントを用いた実験データ（No.6～8）が少ないことから，普通ポルトランドセメントを用いた実験データ（No.1～5）も収集した。

改良式中の混和材寄与率を変化させた予測値と既往の実験データを対比した結果を**図－6** に示す。実験データは，同一材料で体系的な実験がなされたフライアッシュ利用普通コンクリート（No.1～5）と高炉スラグ微粉末 6000 利用早強コンクリート（No.11～15）を抽出し，配合補正係数は β=1.0 とした。図より，前者のコンクリートは k=0, 後者のコンクリートは k=1.0 とした予測値と，既往の実験値が概ね一致することがわかる。言い換えれば，フライアッシュ利用コンクリートに関しては水セメント比から自己収縮ひずみを直接予測でき（フライアッシュは自己収縮ひずみへの寄与が認められない），高炉スラグ微粉末利用早強コンクリートは高炉セメント B 種の予測式をそのまま適用できるといえる。

表－4　既往の実験データ

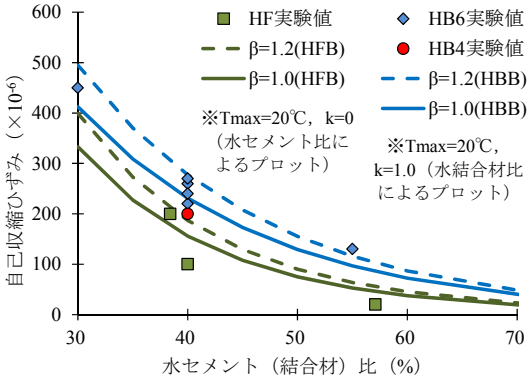
No.	C	W/B (%)	(W/C) (%)	SCM	UR (%)	ε'_{as28} ($\times 10^{-6}$)	文献
1	N	55	(79)	F	30	30	4
2		40	(73)		45	40	
3			(57)		30	50	
4			(47)		15	100	
5		27	(39)		30	190	
6	H	40	(57)	F	30	20	5
7		32	(40)		20	100	6
8		32	(38)		17	200	7
9		40	(80)	B4	50	200	5
10		40	(80)	B6	50	260	
11		55	(110)		50	130	8
12		40	(57)		30	220	
13			(80)		50	240	
14			(133)		70	270	
15		30	(60)		50	450	

ε'_{as28}：20℃，材齢 28 日の自己収縮ひずみ

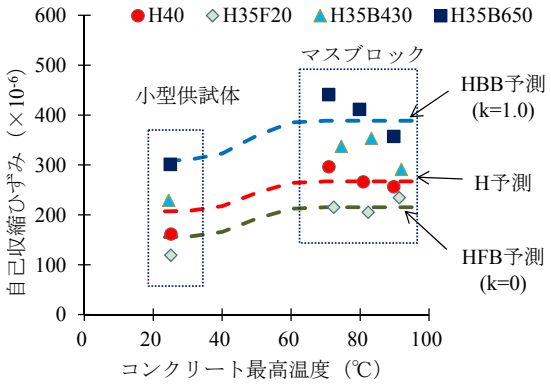


図－6　改良式中の混和材寄与率を変化させた場合の自己収縮ひずみ予測値と実験値の比較

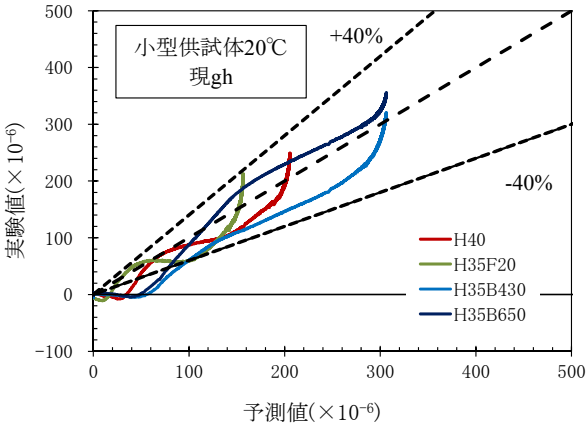
上述した通り，フライアッシュの寄与率を k=0，高炉スラグ微粉末の寄与率を k=1.0 とした改良式の予測値と，混和材利用早強コンクリート（フライアッシュは No.6～8，高炉スラグ微粉末は No.9～15）の実験データを対比した結果を**図－7** に示す。既往の実験データは，配合補正率 β=1.0～1.2 の予測値に近づくことがわかる。

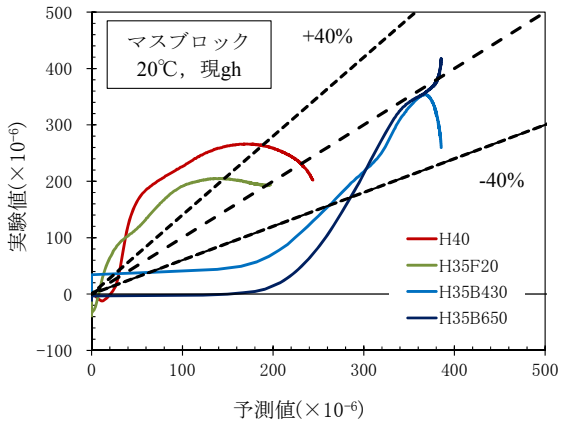


図－7　改良式中の配合補正係数を変化させた場合の自己収縮ひずみ予測値と実験値の比較



図－8　コンクリートの最高温度と材齢 28 日までの自己収縮ひずみの最大値との関係





図－9　現 gh を用いた場合の自己収縮ひずみの予測値と実測値の対比

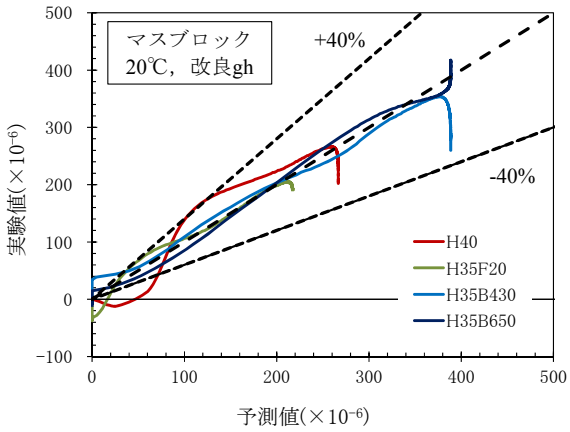
4.3 高温履歴による自己収縮ひずみの増加量について

今回の実験で得られた有効材齢 28 日までの自己収縮ひずみの最大値と，改良式による予測値をコンクリート最高温度で整理した結果を**図－8** に示す。実験で得られた自己収縮ひずみの最大値は，コンクリート最高温度にかかわらず大きい順に, H35B650, H35B430, H40, H35F20 となっており，改良式による予測値はこの傾向と概ね一致することが確認された。

4.4 自己収縮の進行特性について

自己収縮の進行特性のうち，高温履歴の影響を表す係数 g と h を現予測式（以下，現 gh という）のまま用いた場合の自己収縮ひずみの予測値と，今回の実験値とを対比した結果を**図－9** に示す。小型供試体に着目すると，今回の実験値は予測値の±40%の範囲に概ね入ることがわかる。一方, マスブロック供試体で得られた実験値は，予測値の±40%の範囲外となる部分が多いことが確認された。この原因として，H40 と H35F20 では高温履歴の影響を考慮していない（g=h=1.0 としている）こと，H35B430 と H35B650 では高温履歴の影響を考慮しているものの過大評価となっていることが考えられる。

そこで，現 gh を式(7)および式(8)に改良し（以下，改良 gh という），全配合に適用することにした。



図－10　改良 gh を用い算出した自己収縮ひずみの予測値と実測値の対比

$$g = 0.030T_{\max} + 0.40 \quad (7)$$

$$h = 0.0025T_{\max} + 0.95 \quad (8)$$

図－10 には，改良 gh による予測値とマスブロック供試体の実験値を改めて比較した結果を示す。練上り温度 10℃と 30℃の図示は割愛するが，今回実施したすべての実験において取得した自己収縮ひずみは, 改良 gh による

予測値の±40%の範囲に概ね入ることが確認された。したがって，早強コンクリートおよび混和材利用早強コンクリートに関しては改良 gh を適用することにより，コンクリートの最高温度 20℃から 90℃までの温度履歴を受ける場合の自己収縮ひずみを予測できるといえる。

なお，改良 gh の妥当性を検証するため，宮澤ら[9]の実験データと対比し，特に高温履歴を受けるケースでの予測精度が向上することを確認している（**図－11**）。

5. 実務設計への反映

実務設計において混和材利用早強コンクリートの自己収縮を考慮する場合は，適用範囲と精度が検証されている試験あるいは推定式を用いて，設計値を定めるのが良いと考えられる。後者に関し，3.2 節に示した自己収縮の発現時期の遅れ(t_d)は実務上無視できると考えられ，フライアッシュの化学特性によっては自己収縮ひずみ（混和材寄与率 k）が大幅に変動するおそれがある[10]。このため，本研究で対象とした混和材利用早強コンクリートは，**表－5** に示す設計値を用いるのが良いと考えられる。

6. まとめ

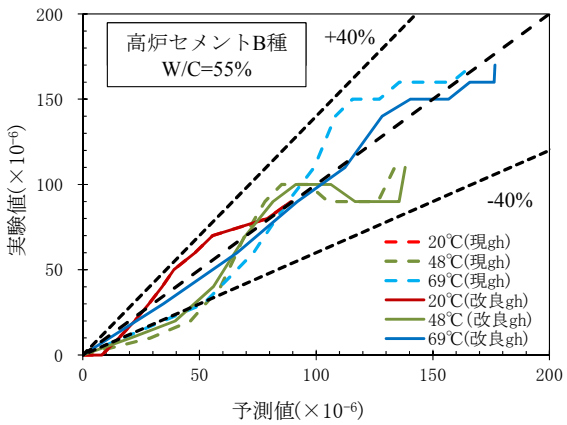
本研究を通じ，次のことが確認された。

(1) 混和材利用早強コンクリートは，早強コンクリートに比べ，自己収縮ひずみの発現時期，増加速度，最大値が異なる。

(2) 早強コンクリートおよび混和材利用早強コンクリートにおいて，高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみの増加速度は，20℃一定の場合と比べ，有効材齢で整理しても大幅に早まる。

(3) 現在使用されている予測式に改良を加えることで，早強コンクリートおよび混和材利用早強コンクリートの自己収縮ひずみを精度良く予測できる。

なお，本研究は，(独)土木研究所，(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会ほか国内 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」の一環として実施したものである。



図－11　現 gh と改良 gh を用い算出した自己収縮ひずみの予測値と既往の実験値[9]の対比

表－5　早強コンクリートおよび混和材利用早強コンクリートの自己収縮ひずみの設計値

	H,HFB	HBB
ε_{ag}	現予測式[1]を用い，t_s=0.20 日とする	
β	1.2	1.0
$\varepsilon'_{as\infty}$	現予測式[1]を使用 (c_1=3070，c_2=-7.2)	現予測式[1]を使用 (c_1=2350，c_2=-5.8)
k	1.0	1.0
$\varepsilon'_{asT\infty}$	50	80
g,h	式(7)，式(8)の改良 gh による	

適用範囲：W/B=35～55%，20℃≤Tmax ≤90℃

参考文献

1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，pp.314-318，2013.3

2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，pp.46-56，2008.11

3) 石井ら：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，プレストレストコンクリート工学会第 23 回シンポジウム論文集，pp.59-64，2014.10

4) 安田ら：フライアッシュコンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験，コンクリート工学論文報告集，Vol.20，No.2，pp.655-660，1998

5) 斯波ら：早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートの諸特性，三井住友建設技術開発センター報告，第 11 号，pp.37-42，2013

6) 山村ら：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討，株式会社ピーエス三菱技報，第 11 号，2013

7) 北野ら：コンクリート中のセシウム拡散性試験（続），川田技報 Vol.34，2015.1

8) 谷口ら：高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの収縮特性，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-160，2003.9

9) 宮澤ら：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.465-470，2008

10) 堀田ら：モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.165-170，2002