

論文 マス養生温度履歴下で測定した自己収縮ひずみの評価方法と温度ひび割れに及ぼす影響に関する考察

白井 達哉*1・大友 健*2・宮原 茂禎*3・宮澤 伸吾*4

要旨: マス養生あるいはマス養生に類似した温度履歴下で測定した各種ポルトランドセメントコンクリートおよび高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみについて、従来の JCI 委員会報告に示される予測式および JCI ひび割れ制御指針 2008 に示される経験最大温度をパラメータとした新しい予測式に対する適合性を各々評価した。高炉セメントコンクリートについては、新しい予測式により得られる特性値を基準として、実測の自己収縮ひずみの変動範囲を定め、これが壁状部材のひび割れ発生の程度に及ぼす影響を考察した。

キーワード: 自己収縮ひずみ, 養生温度, 温度応力, 高炉セメント, マスコンクリート, ひび割れ指数

1. はじめに

著者らは、今までに関与したマスコンクリート工事において、構造体内の無拘束ひずみを測定すること、あるいはマスコンクリート構造物の内部の温度変化に近似する温度履歴を与えた場合の体積変化測定を行うことで、マス養生温度履歴下で生じている自己収縮ひずみに関するデータを蓄積してきた。この分析については一部をテクニカルレポートとして報告¹⁾している。

本論文は、この報告以降に得たデータをこれに追加したうえで、実測で得られた自己収縮ひずみから定めた自己収縮関数が、従来の JCI の委員会報告²⁾ やあるいは新しく発刊された JCI ひび割れ制御指針 2008³⁾ に記載されている自己収縮予測式とどの程度適合しているのかを比較したものである。また、実測の自己収縮ひずみの特性値が、予測式の値とどの程度の範囲で異なっているかを評価し、この差が壁状のマスコンクリート部材のひび割れ発生程度に及ぼす影響についても考察した。

2. 自己収縮ひずみの予測式

マスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御のために温度応力解析を行う場合に利用する自己収縮ひずみの予測値については、歴代の JCI の関連委員会において各種セメントを用いた場合の予測式が提案されてきている。最も新しい知見によるものは、2006 年の委員会報告²⁾ によるものであり、これは式(1)により示される。

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{co} (1 - \exp(-a(t-t_0)^b)) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{co} = \gamma (3070 \exp(-7.2(W/C)))$

$a = a_1 \exp(a_2(W/C))$, $b = b_1 \exp(b_2(W/C))$

γ は NP:1.0/HP:1.2/MP:0.85/LP:0.4/BB:1.3,

NP/HP/MP/BB の場合 $a_1:6.3/a_2:-8.6/b_1:0.22/b_2:3.0$

LP の場合 $a_1:2.4/a_2:-6.5/b_1:0.12/b_2:2.7$

ここに、 $\varepsilon_c(t)$:自己収縮ひずみ関数($\times 10^{-6}$), ε_{co} :自己収縮ひずみの終局値($\times 10^{-6}$), t :有効材齢(日), t_0 :硬化原点材齢(日), W/C:水セメント比

NP は普通, HP は早強, MP は中庸熟, LP は低熟の各種ポルトランドセメント, BB は高炉セメント B 種の略称である (以下同様)。

すなわち、従来の JCI 委員会式ではセメント種類と水セメント比により自己収縮ひずみ関数値が与えられていた。以下これを JCI 従来式 (JCI 従来関数値) と呼ぶ。

著者らは、マスコンクリートにおける高温履歴が自己収縮ひずみに及ぼす影響についていくつかの検討を行い^{4),5)}など、とくに高炉セメント B 種を使用した配合で、材齢初期に高温履歴を受けたコンクリートでは、積算温度では表現できないほど自己収縮ひずみが増進する現象を明らかとしてきた。

JCI ひび割れ制御指針 2008 の内容の検討過程では、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をマスブロックにより評価する共通実験が行われ⁶⁾、この結果から、最大温度をパラメータに加えた予測式が示されている³⁾。これは式(2)により示されるものである。なお、NP 以外のポルトランドセメントは NP の予測式に式(1)に準じた係数 γ を乗ずることにより算定している。

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{co} (1 - \exp(-a(t-t_0)^b)) \quad (2)$$

ここに、高炉セメント B 種の場合:

$\varepsilon_{co} = 2350 \exp(-5.8(W/C))$

$+80(1 - \exp(-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4))$

*1 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 工修 (正会員)

*2 大成建設 (株) 土木本部プロジェクト部 次長 博士(学術) (正会員)

*3 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 工修 (正会員)

*4 足利工業大学 工学部都市環境工学科 教授 工博 (正会員)

履歴についても相当に異なる^{1), 4), 5)}などが、ここでは、式(2)に対応して最大温度をパラメータとして考慮したものである。

3.2 自己収縮ひずみに及ぼすセメント種類・配合と最大温度の影響

図-1には各種ポルトランドセメント配合、図-2には高炉セメントB種配合における、水セメント比あるいは最大温度が自己収縮特性に及ぼす影響を各々示す。各種ポルトランドセメントでは水セメント比が小さいほど終局ひずみは大きくなる傾向にある。発熱が大きくなる配合・施工環境ほど自己収縮ひずみも大きくなるのが当然と思われたが、低熱ポルトランドセメントでは、最大温度が大きくなっても終局ひずみは増大していない。速度係数は最大温度が大きくなるほど増大するようである。

異なる材料・配合のデータを合わせて記載した場合でも、各種ポルトランドセメント配合については一定の傾向が見いだせるのに対して、高炉セメントB種配合においては、水セメント比・最大温度の双方について一定した傾向が見いだせず、終局ひずみ・速度係数ともばらつきが非常に大きいデータとなっている。

図-3には、実測の自己収縮ひずみの特性値と JCI 従来予測式での特性値を比較した結果を示す。各

種ポルトランドセメント配合では実測の終局ひずみは予測式とおおむね同程度とみられるが、高炉セメントB種配合では予測式よりも明らかに大きくなる傾向がある。また速度係数aも非常に大きくなる場合があることが明らかとなった。

3.3 JCI 修正式の評価

JCI 従来式での評価を、コンクリートの最大温度の要因を加えて評価した

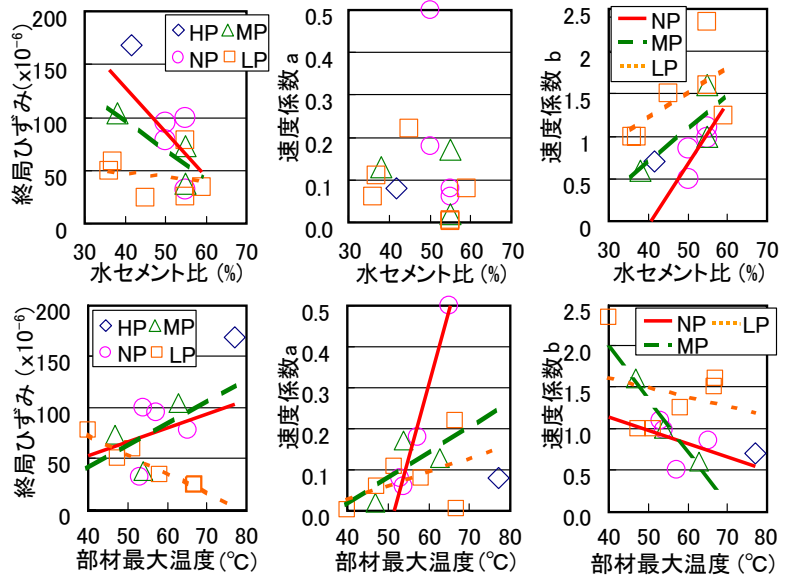


図-1 水セメント比・最大温度が自己収縮特性に及ぼす影響 (各種ポルトランドセメント配合)

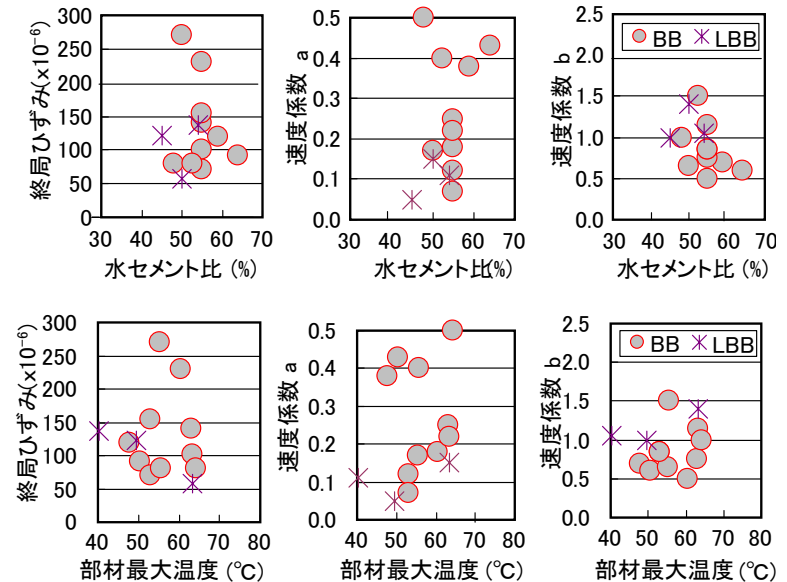


図-2 水セメント比・最大温度が自己収縮特性に及ぼす影響 (高炉セメントB種配合)

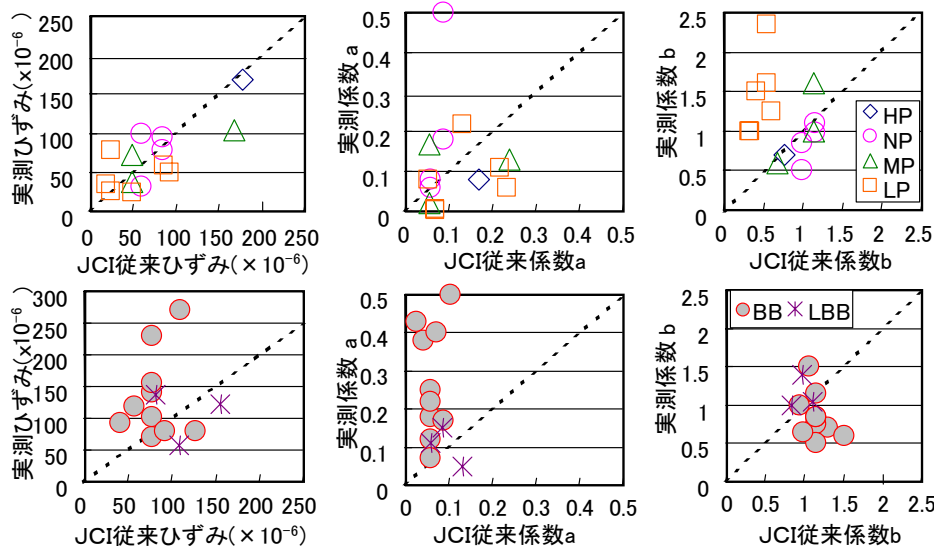


図-3 実測の自己収縮ひずみの特性値と JCI 従来予測式での特性値の比較

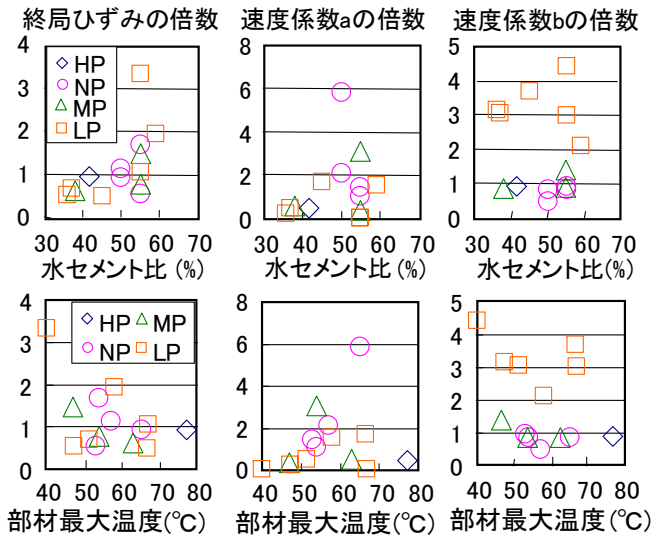


図-4 JCI 従来式による特性値に対する実測の特性値の比 (各種ポルトランドセメント配合)

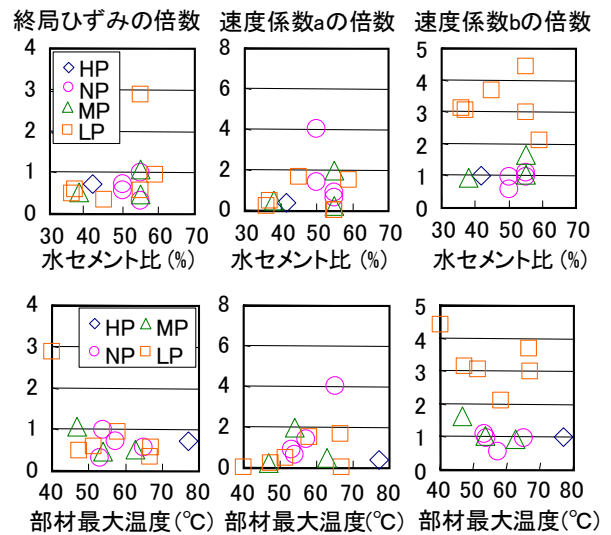


図-5 JCI 修正式による特性値に対する実測の特性値の比 (各種ポルトランドセメント配合)

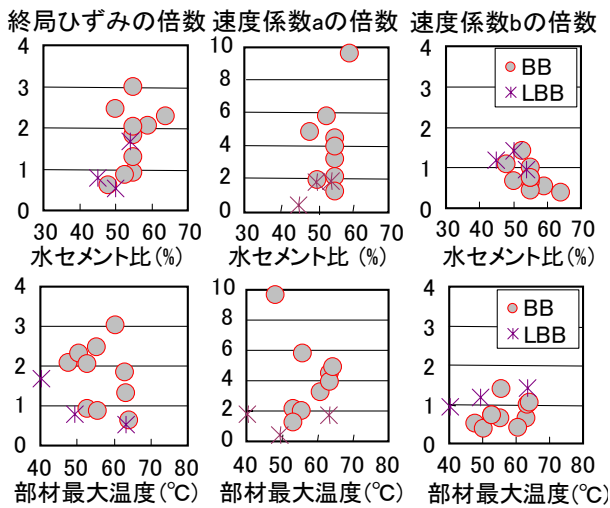


図-6 JCI 従来式による特性値に対する実測の特性値の比 (高炉セメント B 種配合)

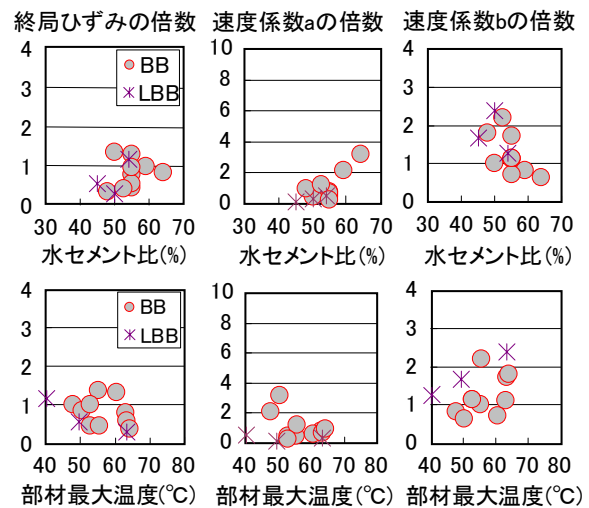


図-7 JCI 修正式による特性値に対する実測の特性値の比 (高炉セメント B 種配合)

JCI 修正式に替えた場合の変化を、各種ポルトランドセメント配合については図-4 と図-5 に、高炉セメント B 種配合については図-6 と図-7 に比較して示す。これらの図は実測ひずみの指数関数における終局ひずみ、速度係数 $a \cdot b$ の各々が予測式における各係数の何倍になっているかを示したものである。

各種ポルトランドセメント配合に JCI 修正式を適用した場合、例外はあるものの、予測値が実測値に近づくかあるいはこれを下回るものとなるようである。ただし、低熱ポルトランドセメント配合での係数 b は、実測値が予測値の平均 3 倍程度となっており他のポルトランドセメントの傾向とは大きく異なっている。

高炉セメント B 種配合についても、最大温度の影響を考慮した修正式を用いることによって、終局ひずみ・速度係数 a のばらつきの範囲は小さくなる傾向が認められる。したがって JCI ひび割れ制御指針 2008 に示される最大温度の影響を考慮した項は有効であると評価される。

しかしながら、それでもなお予測値に対する実測値の差は相当残るものとなった。

4. 高炉セメントコンクリートの自己収縮の変動範囲とその影響

4.1 高炉セメントコンクリートの自己収縮の変動範囲

高炉セメント B 種配合において、JCI 修正式による予測値に対する実測値の倍数を、指数関数 3 係数の相互の関係として図-8 に示す。速度係数 b の倍数が終局ひずみの倍数に従属して変化する傾向が認められるため、実測ひずみのばらつきの範囲は終局ひずみ ϵ_{∞} の倍数と速度係数 a の倍数の範囲として考えられる。本調査研究で得られたデータの範囲としては、図-8 (a) 中の A~H となり、終局ひずみは予測式の 0.4~1.3 倍、速度係数は 0.3~3.3 倍の範囲となっている。

仮に水セメント比を 55%、コンクリートの最大温度を 68.8°C (部材厚 1.5m に相当、4.2 参照) とした時、これ

らの特性値の組み合わせの変化範囲 A～H, JCI 修正式(3 係数の倍数が全て 1.0) を T, 実測値の平均を M として, 各々有効材齢軸上での自己収縮ひずみ曲線として算出すれば, この履歴曲線は図-9 に示すように非常に異なった形状を示すものとなった。

さらに部材の形状条件や打込み温度などの環境条件の相違が加わり, 最高温度に差が生じることも考え合わせれば, 同じ高炉セメント B 種を使用した水密仕様のコンクリートといっても, 著しく異なる自己収縮ひずみ曲線を有する高炉セメントコンクリートが存在し得ることが自明とも思われる。

4.2 自己収縮曲線の相違がひび割れ発生の程度に及ぼす影響

壁厚が相違することによって部材の最大温度が異なることを考慮し, Case1:壁厚 1.5m および Case2:0.6m の 2 種類の壁状部材について, 自己収縮特性が図-8 (a) に示される A～H および M, T に変化した場合の発生する引張応力およびひび割れ指数を算出した。この結果を図-10 に示す。

コンクリートの配合は, 水セメント比 55%, 単位セメント量 300kg/m^3 , セメントは, 高炉セメント B 種とし, 打込み温度 30°C , 外気温 20°C の環境での施工を想定した。発熱特性・型枠からの放熱条件などは JCI ひび割れ制御指針 2008³⁾ に示される標準的な値としている。この時, 壁厚 1.5m の部材中心の最大温度は 68.8°C , 壁厚 0.6m では 51.7°C となった。温度応力の算出には下水道構造物のひび割れの評価で実績が確認されている増分法⁷⁾ を使用し, 自己収縮ひずみの考慮も実績のあるひずみの重ね合わせ法⁸⁾ を用いた。

壁厚 1.5m の部材の長さが 8m, 壁厚 0.6m の部材の長さが 20m と異なるのは, JCI 修正式(自己収縮関数の 3 係数の倍数が 1.0)である T の最小ひび割れ指数の結果が Case1, Case2 とも 1.0 になるようにしたことによる。すなわち, T の最小ひび割れ指数 1.0 に対して A～H と M の最小ひび割れ指数の差が相対的なひび割れ発生程度の差を評価していることになる。

図-10 では, C や D の発生する引張応力が大きく, A・H・G の発生する引張応力が小さくなる。最小ひび割れ指数は T と C～E で小さくなりひび割れの発生確率が高まってくると考えられる。最大温度の大きい壁厚 1.5m の部材よりも壁厚 0.6m の部材のほうが自己収縮ひずみ量の相違の影響が大きいように見えるが, この条件の設定では壁厚の小さいほうが温度ひずみによる応力成分

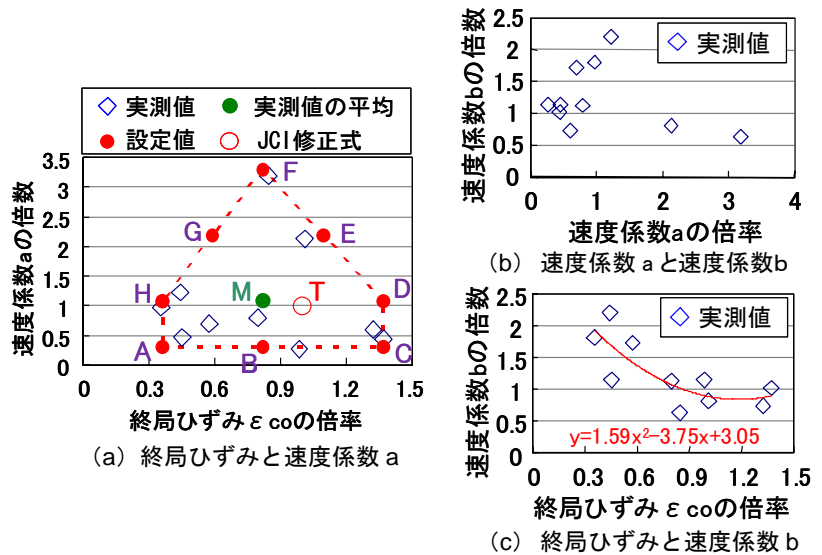


図-8 終局ひずみと速度係数 a,b の関係

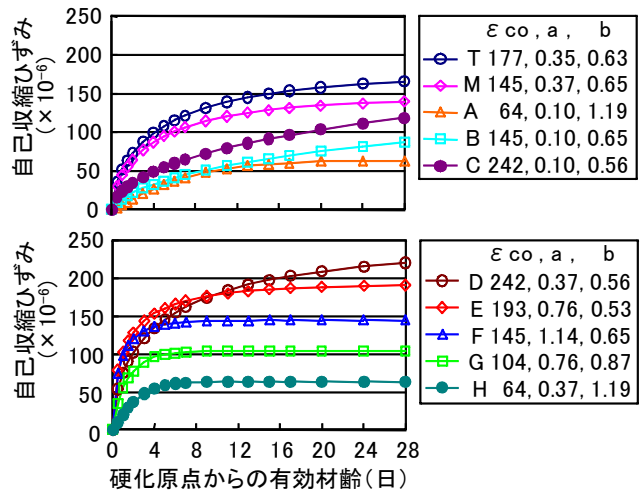


図-9 異なる特性値における自己収縮ひずみの履歴

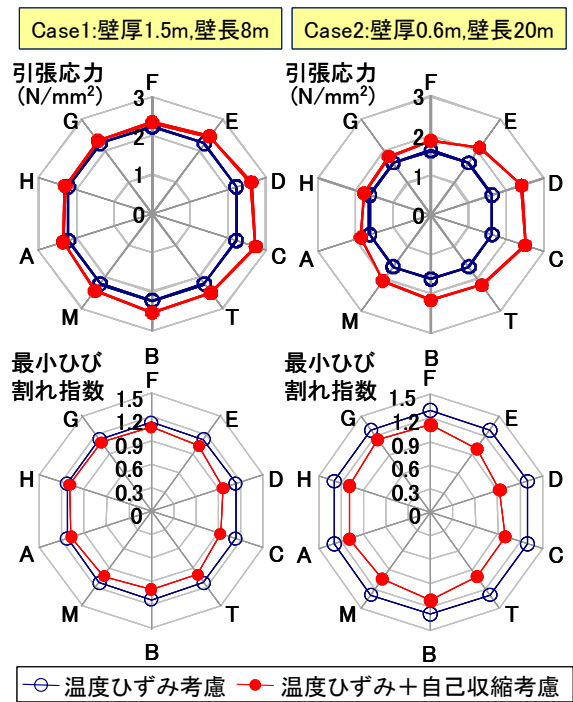


図-10 壁部材における応力・最小ひび割れ指数の算定結果

が小さくなるため自己収縮ひずみの影響度が相対的に高まって見えるようである。

自己収縮関数の3係数がひび割れ指数に及ぼす影響を図-11に示す。Case1:壁厚1.5mとCase2:壁厚0.6mのひび割れ指数の変化傾向および変化量は異なっていることから、自己収縮ひずみ曲線の相違がひび割れの発生状態に及ぼす影響は、構造物の形状等にも影響を受けることがわかる。

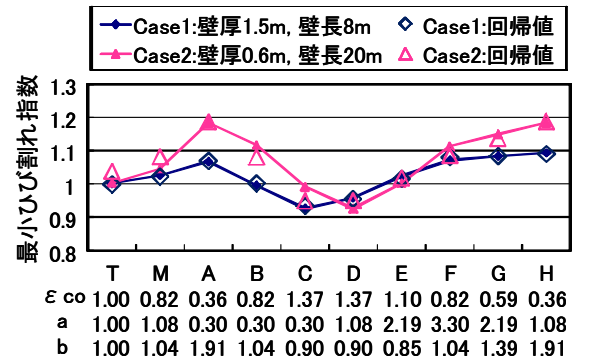
自己収縮関数の3係数の組み合わせの影響について、これらを説明変数としたひび割れ指数に関する重回帰分析結果を図-11の付表として示す。Case1:壁厚1.5mでは、 ϵ_{co} が大きいほど、速度係数aが小さいほどひび割れ指数は小さくなり、速度係数aに関する影響がより大きい(t値が大きい)。これに対してCase2:壁厚0.6mでは、ひび割れ指数の大きさには ϵ_{co} のみが強く影響している。このように自己収縮関数の各係数の影響についても、構造物の形状を含めての影響があると思われる。

自己収縮ひずみ量あるいはひずみ関数形だけで温度ひび割れへの影響を評価することは難しいということも本研究の知見であろう。

5. 結論

実際の工事に関係して収集したマスコンクリートの温度履歴を受けた状態での自己収縮特性の評価方法について検討した。この結果以下が明らかとなった。

- (1) 実測自己収縮ひずみの特性値と JCI の従来予測式の特性値を比較した場合、各種ポルトランドセメント配合では実測の終局ひずみは予測式とおおむね同程度とみられるが、高炉セメント B 種配合では予測式よりも明らかに大きくなる傾向がある。また速度係数 a も非常に大きくなる場合がある。
- (2) 自己収縮の予測に JCI 修正式を適用した場合、各種ポルトランドセメント配合では予測値が実測値に近くか下回る傾向にある。
- (3) 高炉セメント B 種配合では、最大温度の影響を考慮した修正式を用いることによって、終局ひずみ・速度係数 a のばらつきの範囲は小さくなる傾向が認められた。JCI 修正式に示される最大温度の影響を考慮した項は有効であると評価される。しかしながら、それでもなお予測値に対する実測値の差は相当残る。
- (4) 高炉セメント B 種配合の自己収縮特性では、速度係数 b の倍数が終局ひずみの倍数に従属して変化するため、実測ひずみのばらつきの範囲は終局ひずみ ϵ_{co} の倍数と速度係数 a の倍数の範囲として考えられる。ばらつきの範囲として、終局ひずみは JCI 修正式の 0.4~1.3 倍、速度係数は 0.3~3.3 倍の範囲である。
- (5) 壁厚が異なることにより、自己収縮ひずみ曲線の相



構造 壁厚 /壁長	重回帰分析係数 有意さF	ひび割れ指数: Y=X1+X2* ϵ_{co} +X3*a+X4*b	説明変数			
			切片 X1	ϵ_{co} X2	a X3	b X4
1.5m /8m	0.995 2.7E-06	係数	1.072	-0.117	0.0266	0.0169
		t値	-	-7.3	9.7	1.2
0.6m /20m	0.948 0.0022	係数	1.286	-0.242	0.0015	-0.0066
		t値	-	-3.1	0.1	-0.1

図-11 異なる自己収縮特性値に対するひび割れ指数の変化および重回帰分析結果

違が最小ひび割れ指数に及ぼす影響は一樣ではないことが重回帰分析の結果からも明らかとなった。

実際の工事に関連した計測結果の集積であるため、統一的な材料・環境での試験結果ではないが、そのような条件においても、(1)~(5)に示すような新たな知見が得られている。今後、さらに分析を深めたい。

参考文献

- 1) 大友健ほか：マスコンクリートに生じている自己収縮の実態とその制御対策の一例，コンクリート工学，Vol.44, No.3, pp.26-33, 2006.3
- 2) 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に関する研究委員会報告書，2006.6
- 3) 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 2008，2008.12
- 4) 大友健ほか：各種セメントを使用したコンクリートの異なる温度条件下での自己収縮特性，第 57 回セメント技術大会講演要旨，PP.176-177, 2003.5
- 5) 宮澤伸吾ほか：各種セメントの自己収縮に及ぼす温度の影響，第 59 回セメント技術大会講演要旨，PP.186-187, 2005.5
- 6) 宮澤伸吾ほか：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, 2008.6
- 7) ライフサポート研究会：ひび割れ指数を用いた温度ひび割れの評価—事例紹介—，月刊下水道，Vol.27, No.14, pp.75-79, 2004.12
- 8) 須網巧二ほか：底面を拘束されたスラブにおける自己収縮によるひび割れ発生現象の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.685-690, 2003.6