

論文

[1110] 各種セメントペーストの自己収縮にもとづく内部応力に関する研究

吉田智則\*・城安市\*・志沢三明\*・北山大八\*

1. はじめに

近年、建築物、構造物の大型化に伴ない、打設面の大きなコンクリートを打つ機会が増えている。この際、セメント硬化の比較的初期にしばしばひび割れの発生が見られる。この初期ひび割れの一因として、セメントの水和反応によって起こる自己収縮が考えられる。既に自己収縮の測定方法及び自己収縮と水和反応との関係について報告した [1]。

本報告では、拘束状態下にあるセメントペースト硬化体に発生する自己収縮により引き起こされる内部応力の測定方法を考案し、この方法により、各種ポルトランドセメントペーストの内部応力を測定し、また更に、自己収縮と内部応力との関係、及び内部応力のひび割れ危険性への影響度について検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び混練方法

セメントは表-1に示す普通ポルトランドセメント (NC)、早強ポルトランドセメント (HC)、中庸熱ポルトランドセメント (MC)、低熱ポルトランドセメント (LC) の4種類を用いた。ペーストの水セメント比 (W/C) は、0.3~0.5としホバートミキサーで3分間混練した。

表-1 セメントの鉱物組成及び物理特性

Type of portland cement	Symbol	Mineral composition (%) (by Bogue's eq.)				Specific gravity	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Time of setting		Mortar compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )		
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF			Initial set (h-m)	Final set (h-m)	3 D	7 D	28 D
High Early Strength	HC	59	15	9	9	3.14	4410	2-15	3-20	27.0	36.6	47.1
Ordinary	NC	48	27	9	9	3.16	3420	2-35	3-45	14.8	24.5	40.8
Moderate Heat	MC	41	36	4	12	3.21	3260	3-05	4-25	10.6	16.7	35.0
Low Heat	LC	25	55	2	12	3.23	3250	2-45	4-05	3.7	6.3	23.4

2.2 セメントペーストの自己収縮測定方法 (無拘束下)

ゴム製の封入袋に試料 (混練後のセメントペースト) を脱気封入し、ペースト全体の体積変化を計測する封入方法によりセメントペーストの自己収縮を測定した [1] [2] [3] [4]。

\* 徳山曹達(株)セメント製造部技術課、工修 (正会員)

### 2. 3 セメントペーストの内部（引張り）応力測定方法（拘束下）

図-1に示すように2重円筒管にセメントペーストを脱気封入し、内側の石英管の内壁に貼付した歪みゲージにより、石英管の歪みの経時変化を測定し、セメントペーストの自己収縮にもとづく内部引張り応力（ $\sigma_t$ ）を求めた。歪みの測定は、混練後30分を基準とした。

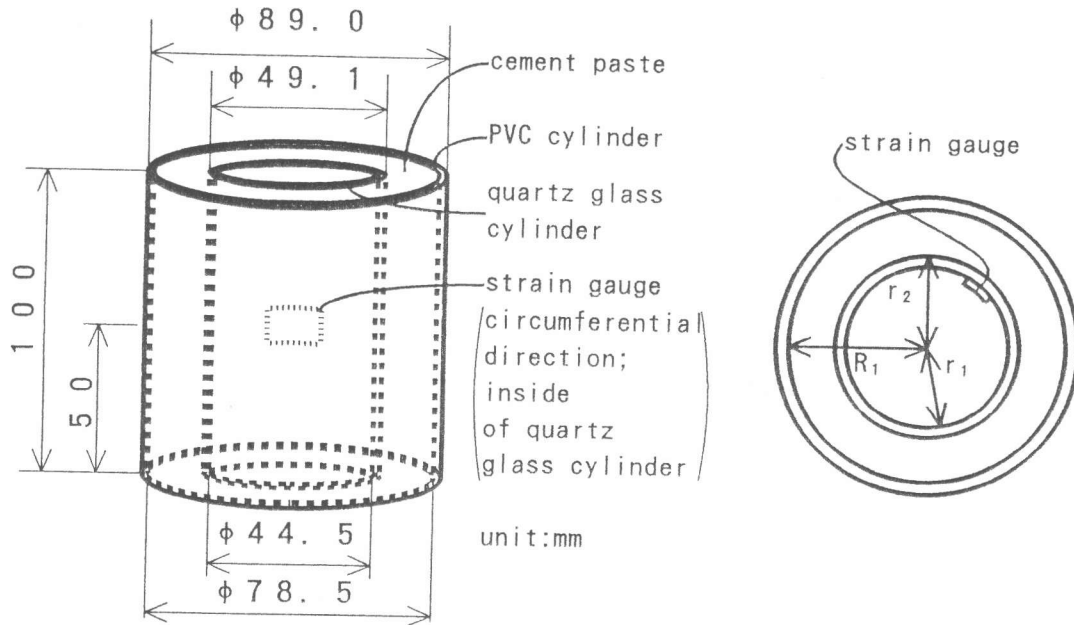


図-1 セメントペーストの内部応力測定方法模式図

式（1）に試料の内部引張り応力（ $\sigma_t$ ）の算出式を示した〔5〕。

$$\sigma_t = -\varepsilon_t \cdot E \left( r_2^2 - r_1^2 \right) / \left( R_1^2 - r_2^2 \right) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_t$  : 内部引張り応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_t$  : 石英管の歪み量 (-)

E : 石英管のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$R_1, r_1, r_2$  : 円筒管の半径 (図-1 参照)

### 2. 4 その他の物性の測定

各種ポルトランドセメントの力学特性を、表-2に示す項目について測定した。

表-2 セメントペーストの力学特性の測定

Property of cement paste	Age(day)	Measuring method	W/C
Compressive strength	1, 3, 7	Based on JIS R5201	0.3
Tensile strength	1, 3, 7	Based on ASTM C190	0.3
Young's modulus	1, 3, 7	Based on JIS proposal	0.3

3. 実験結果及び考察

3. 1 セメントペーストの拘束状態での内部応力

材令7日までの拘束状態の各種ポルトランドセメントペースト (W/C=0.3~0.5) 中に発生する内部引張り応力を図-2に示した。各ポルトランドセメントとも内部引張り応力の発生時期は、各々の凝結始発時間にほぼ対応し、2~5時間の間であった。また、その応力は水セメント比の影響を大きく受けており、水セメント比が低いほど大きい。LCのW/C=0.3~0.5及びNC、MCのW/C=0.5での内部引張り応力は小さくゼロに近かった。W/C=0.3、0.4の場合、内部引張り応力の大きさは、HC>NC>MC>LC=0の順で、水セメント比の低い範囲では水和反応性の大きさに対応している。内部引張り応力の発生がゼロに近いセメントでも強度の発現は十分認められることから、セメント種類あるいは水セメント比によっては、自己収縮にもとづく内部引張り応力を小さくする作用があるものと推察される。

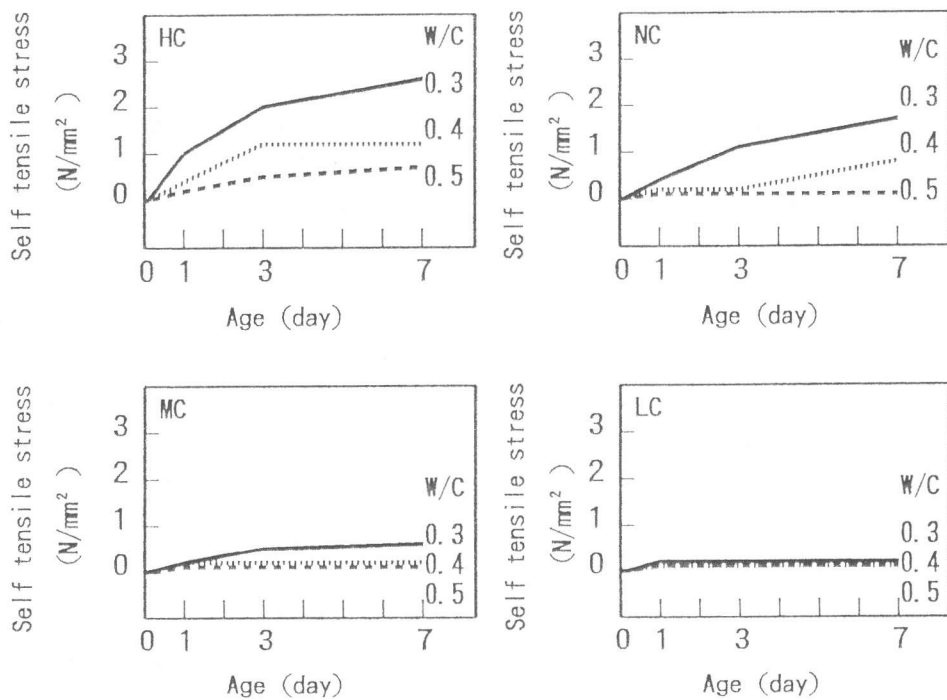


図-2 各種ポルトランドセメントペーストの内部引張り応力

### 3. 2 セメントペーストの自己収縮と内部引張り応力

材令7日までの各種ポルトランドセメントペーストの自己収縮と内部引張り応力の関係を図-3に示した。W/C = 0. 3のペーストでは、自己収縮が大きくなるに従い、内部引張り応力は大きくなっており、水セメント比の低い場合セメントペーストの自己収縮と内部引張り応力とは関係していると思われる。しかしながら、水セメント比が0. 4、0. 5と高くなるにつれ、自己収縮は大きくなるが、内部引張り応力の発生は小さくなっていく。水セメント比が0. 4以上では、自己収縮と内部引張り応力との間に明らかな関係は認められなかった。

筆者らは既に、各種ポルトランドセメントともW/C = 0. 3~0. 5、設定温度20℃、材令7日までの範囲では、水和反応速度に差が認められないこと、および水セメント比の低い(W/C = 0. 3)ペーストでも材令7日まででは水の表面張力による収縮力が主に作用するほど自己乾燥はしていないことを報告した[1]。

即ち、自己乾燥による収縮力は小さくなく、そして水セメント比の違いによる水和反応速度の差が無いにも拘らず、内部引張り応力は水セメント比が0. 3から0. 5と大きくなるに従って小さくなっていく。

表-3に材令7日までの各種ポルトランドセメントペーストのW/C = 0. 3での、引張り強度とヤング係数から求めた最大引張り変形能力および自己収縮量(線収縮表示)を示した。引張り強度とヤング係数から求めたペーストの最大変形能力に比べ、自己収縮

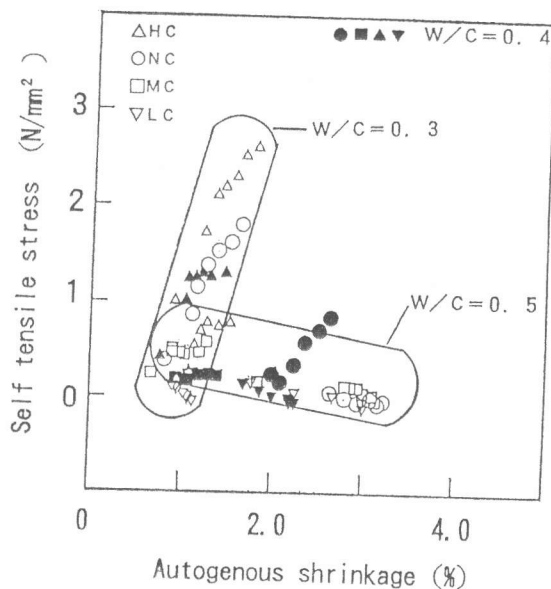


図-3 各種ポルトランドセメントペーストの自己収縮と内部引張り応力

表-3 引張り強度とヤング係数による変形能力及び自己収縮量

Type	Age (day)	deform-ability ( $\times 10^{-6}$ )	amount of autogenous shrinkage ( $\times 10^{-6}$ )
HC	1	400	3000
	3	200	4400
	7	200	5900
NC	1	450	2700
	3	200	3800
	7	200	5400
MC	1	650	2200
	3	350	3000
	7	300	4200
LC	1	700	3000
	3	450	3200
	7	350	3700

はかなり大きく、クリープ変形量（3日材令で $130 \times 10^{-6}$ ）を考慮してもこの傾向は変わらない。この自己収縮量は、混練後のセメントペーストをゴム製の袋に封入し、ペースト全体の体積変化を計測し求めたもので、無拘束状態下の収縮を表わしたものである。この自己収縮が内部引張り応力測定時のように拘束状態下で起こる場合、拘束材（内側の円筒管）に働く内部応力はヤング係数と自己収縮量から求まり、材令7日では $30 \sim 90 \text{ N/mm}^2$ となる。ひび割れが発生するかその他の応力緩和作用が働かない限り、実測されたものの10倍以上の内部応力が発生していなければならない。内部応力測定終了後のペースト硬化体には、ひび割れの発生が認められなかったことから何らかの応力緩和が働いているものと考えられる。この応力緩和は水和の過程で随時行われていると思われ、収縮によってごくミクロな欠陥が発生すると同時に水和反応によって欠陥が修復されると考えられる。

即ち、硬化体内で反応による強度発現と自己収縮による内部応力の発生、マイクロクラックによる応力緩和および水和物生成による修復、強度発現が平行して起こっているものと推察される。

### 3. 3 自己収縮のひび割れへの影響度

図-4に、内部応力のひび割れへの影響度を表す一つの指標として、セメントペーストの拘束状態下の自己収縮にもとづく内部引張り応力の引張り強度に対する割合の経時変化を示した。LC、MCペーストはその割合が小さいが、HC、NCペーストでは、材令7日で、50%程度に達した。自己収縮は、使用するセメントの種類、コンクリートの配合条件によっては、乾燥収縮、熱収縮等の要因と共に、ひび割れ発生の一因となるものと考えられる。セメントペーストの自己収縮により引き起こされる内部引張り応力によるひび割れ発生機構として以下のようなことが考えられる。

即ち、拘束状態下にある低水セメント比のペーストの水和反応過程においては、水和反応により自己収縮、強度発現と応力緩和は平行して起こっている。水和活性の高いセメントは強度の増加、自己収縮速度は速いが応力緩和力は小さくなり、次第に内部引張り応力が大きくなる。これに前述した乾燥収縮等の要因が加わり、これが引張り強度より大きくなればひび割れが発生する。コンクリート配合上、自己収縮によるひび割れへの影響度を小さくする方法として、次の二つが有効であると考えられる。

- ① 低水セメント比のコンクリートの場合は、なるべくMC、LC等の反応速度が遅いセメントを用いる。
- ② HC、NCを使用する場合、コンクリートの水セメント比を下げ過ぎないようにする。

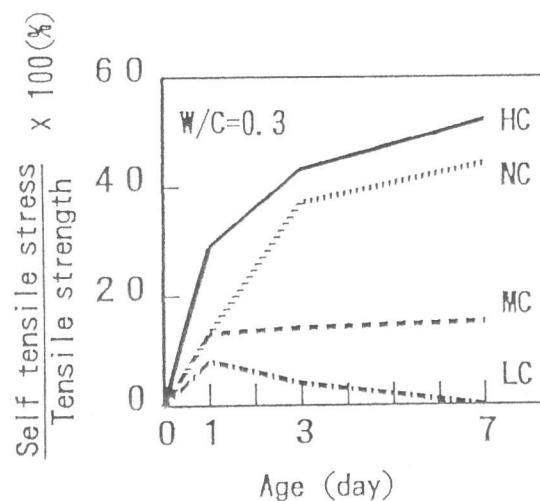


図-4 内部引張り応力の引張り強度に対する割合

#### 4. 結論

各種ポルトランドセメントについて、ペーストの $W/C$ を0.3~0.5の範囲で変化させて、自己収缩量および拘束状態下で自己収縮により引き起こされる内部応力の大きさを調べた。その結果以下のことが明らかとなった。

- 1)  $W/C = 0.3$ と低い場合、セメントペーストの自己収縮とそれにより引き起こされる内部引張り応力との間には関係が認められ、自己収縮が大きくなるに従い内部引張り応力も大きくなる。
- 2)  $W/C = 0.4$ 以上と高い場合、セメントペーストの自己収縮とそれにより引き起こされる内部引張り応力との間には、明らかな関係は認められない。
- 3) セメントペーストの内部引張り応力は、 $W/C$ が低く、また反応速度の大きいセメントの方が大きくなる。
- 4) セメントペーストの内部引張り応力は、水和反応の過程で緩和される。
- 5) HC、NCの低水セメント比ペーストでは、自己収縮により引き起こされる内部引張り応力のひび割れに対する影響は大きい。

#### 参考文献

- 1) 城安市ほか：セメントの初期硬化収縮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. 15、No. 1、pp. 537-542、1993. 6
- 2) 吉田智則ほか：各種セメントペーストの初期硬化収縮について、セメント・コンクリート論文集、Vol. 47、pp. 118-123、1993. 12
- 3) 本間栄五郎・樋田岩美：セメントペーストの水和初期における体積変化について、セメント技術年報、No. 16、pp. 121-125、1962. 12
- 4) 向井毅・菊池雅史：セメントペースト及びモルタルの養生温度と初期容積変化に関する検討、セメント技術年報、No. 30、pp. 85-88、1976. 12
- 5) 川田雄一：大学演習材料力学、裳華房、pp. 160-162、1978