

論文 低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートの膨張収縮挙動に関する研究

百瀬 晴基^{*1}・閑田 徹志^{*2}・鈴木 康範^{*3}・小林 隆芳^{*4}

要旨：低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートの膨張収縮挙動を把握するため、体積表面積比を変化させた乾燥収縮実験、拘束鋼材比及び養生温度を変化させた膨張量実験を行った。本コンクリートの膨張後の乾燥収縮ひずみは、体積表面積比が変化した場合においても土木学会の普通強度用の乾燥収縮推定式を修正した式を用いる事で概ね良好に予測できる事が分かった。また、拘束鋼材比 0.46%と 0.93%の最大膨張ひずみの 2 点から拘束鋼材比 0%まで直線で外挿した値を有効膨張ひずみとする概念に基づき、拘束鋼材比 0.1%の微拘束膨張ひずみを有効膨張ひずみに適用する事が可能である事が判明した。

キーワード：コンクリート，膨張材，乾燥収縮，体積表面積比

1. はじめに

近年、建築分野において品確法が施行されるなど RC 造構造物の耐久性に関する社会的関心は高まっている。それに伴い、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼすひび割れを低減させる技術の需要も増大している。そういった需要に応えるべく、低熱ポルトランドセメントと膨張材を組み合わせたひび割れ低減コンクリートの開発を行ってきた^{1),2)}。

本コンクリートの性能を十分に発揮するためには、その膨張収縮挙動を実部材レベルで把握し設計に反映させる事が不可欠であるが、十分に解明されていないのが現状である。膨張コンクリートの膨張後の乾燥収縮ひずみについては、100×100×400mm のデータは数多くある¹⁾が、梁や柱部材の様に体積表面積比(以下、V/S)の大きな試験体の乾燥収縮に関するデータは少ない。また、膨張コンクリートの膨張量については、養生温度の影響が大きく、内部鉄筋等で拘束されている場合はその拘束度による影響が大きい事も報告されている³⁾。本論文では、本コンクリートの膨張収縮挙動を把握するため、V/S を変化

させた乾燥収縮実験、拘束鋼材比及び養生温度を変化させた膨張量実験を行った。

2. 乾燥収縮実験

2.1 実験概要

表 - 1 に実験要因と水準を示す。低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いたひび割れ低減コンクリート(以下、L)、普通コンクリート(以下、N)の 2 調合について、表 - 1 及び図 - 1 に示す 4 種類の V/S の試験体を作製し乾燥収縮ひずみを測定した。

2.2 実験方法

試験体作製後材齢 7 日までは封緘養生とし、材齢 7 日以降は 20 RH60%の気乾養生とした。計測方法は表 - 1 に示す測定位置に埋め込みひずみ計(東京測器社製、KM-100BT)を設置しひずみの計測を行った。

2.3 使用材料及び調合

表 - 2 に使用材料一覧を、表 - 3 に調合表を示す。L は低熱ポルトランドセメント、N は普通ポルトランドセメントを使用し、骨材は同じ種類の骨材を使用した。水セメント比は 45%、単位

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメントコンクリート研究所 グループリーダー 工博 (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) セメントコンクリート研究所 研究員 (正会員)

水量は 165kg/m³ とし, L にのみ膨張材 20kg/m³ をセメントの内割りとして混入した。フレッシュ性状の目標値は,スランプ 18cm,空気量 4.5% とした。

2.4 実験結果

図 - 2 に乾燥収縮実験結果, 図 - 3 に試験体内部温度を示す。本実験で使用した埋め込みひずみ計は 11.7 μ/ の線膨張係数で自動的に温度ひずみを省いた値を出力する。本実験では, 温度ひずみを除いたひずみを実験結果とするため, 埋め込みひずみ計の出力値を実験結果とした。図 - 2 から V/S が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる事が確認できる。また, 図 - 2 及び図 - 3 から V/S が大きいほど L の材齢初期の膨張

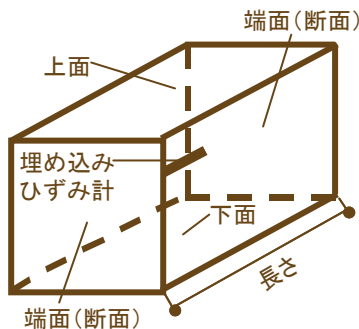


図 - 1 乾燥収縮試験体図
表 - 1 実験要因と水準

調査	試験体記号	V/S mm	試験体形状		シール面	測定位置
			断面(mm×mm)	長さ(mm)		
N	N25	25	100×100	400	端部	中央
	N100	100	200×200	400	端部	中央
	N125	125	500×500	1000	上下面	中央
	N200中	200	800×800	1000	端部	中央
	N200上					上面から 200mm
L	L25	25	100×100	400	端部	中央
	L100	100	200×200	400	端部	中央
	L125	125	500×500	1000	上下面	中央
	L200中	200	800×800	1000	端部	中央
	L200上					上面から 200mm

表 - 2 使用材料一覧

項目	種類等
セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³)
	低熱ポルトランドセメント (密度: 3.22g/cm ³)
膨張材	低添加型膨張材 (密度: 3.16g/cm ³)
細骨材	茨城産陸砂 (密度: 2.60g/cm ³)
	栃木産砕砂 (密度: 2.70g/cm ³)
粗骨材	茨城産硬質岩碎石 (密度: 2.65g/cm ³)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

量が大きく, 試験体内部温度が高い事が確認できる。膨張コンクリートの膨張量は養生温度が高いほど, 急な勾配で大きく膨張する事が報告されており⁴⁾, V/S が大きくなるほど内部温度が上昇し膨張量が大きくなったと考えられる。

2.5 考察

(1) 普通コンクリート

図 - 4 に N の乾燥収縮試験結果と土木学会の普通強度用の乾燥収縮推定式(以下, 土木学会式)の算定値⁵⁾を示す。なお, 基点は乾燥開始である材齢 7 日とした。算定式は式(1)の通りである。式(1)は μ 単位で表記し, 乾燥収縮ひずみがマイナス側に増大するように式を修正している。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108 \times (t - t_0)^{0.56}\}] \times \varepsilon'_{sh}$$

$$\varepsilon'_{sh} = -10 \times \{-50 + 78 \times [1 - \exp(RH/100)] + 38 \times \log_e W - 5 \times [\log_e(V/S)/10]^2\} \quad (1)$$

ここに, $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t 日までの収縮ひずみ(μ), ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値(μ), RH : 相対湿度(%), W : 単位水量(kg/m³), V/S : 体積表面積比(mm, 適用範囲 100 < V/S < 300), V : 体積(mm³), S : 外気に接する表面積(mm²), t, t_0 : 乾燥期間中のコンクリートの有効材齢であり, 式(2)で補正(日)

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (2)$$

ここに, Δt_i : 温度が T () である期間の日数(日), T_0 : 1 ()

図 - 4 から, V/S の小さい N25, N100 では概ね良い精度で予測できている事が分かる。それに対して V/S の大きい N125, N200 では有効材齢 500 日での値は近い値を示しているが, その収縮する過程の値は一致していない事が分かる。

このような現象は過去の論文においても確認されており, V/S の影響については Rush 式の方が実現象に即しているとの報告もある⁶⁾。

V/S の小さい N25 については土木学会式で予測できるものとし, それ以外の試験体については Rush 式⁷⁾中の V/S の影響を与える ks 値を用いて土木学会式を修正した(以下, 土木学会修正式)。土木学会修正式を式(3)に示す。過去の文献⁷⁾で

は材齢と k_s 値の一覧しか掲載されていないため数式で表した。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = k_s(t, t_0) \times \varepsilon'_{sh} \quad (3)$$

V/S=100mm の場合

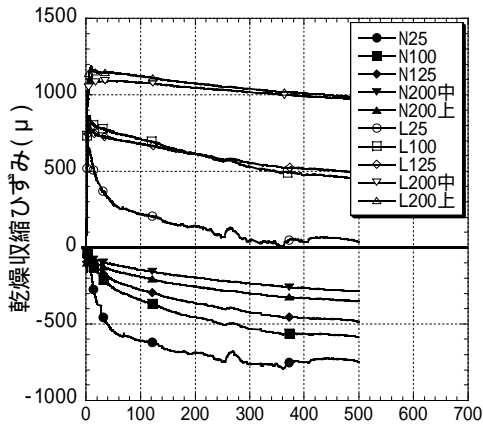
$$k_s(t, t_0) = 0.89 \times \{1 - \exp[-0.12 \times (t - t_0)^{0.53}]\}$$

V/S=125mm の場合

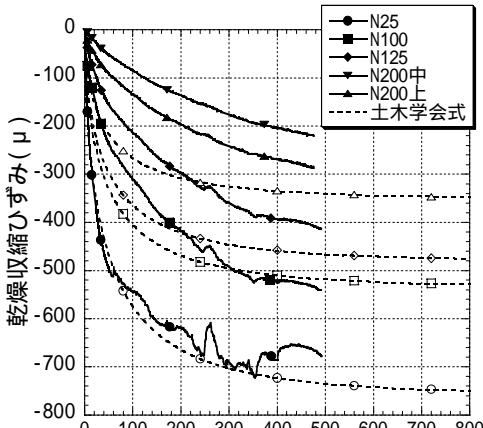
$$k_s(t, t_0) = 0.82 \times \{1 - \exp[-0.02 \times (t - t_0)^{0.63}]\}$$

V/S=200mm の場合

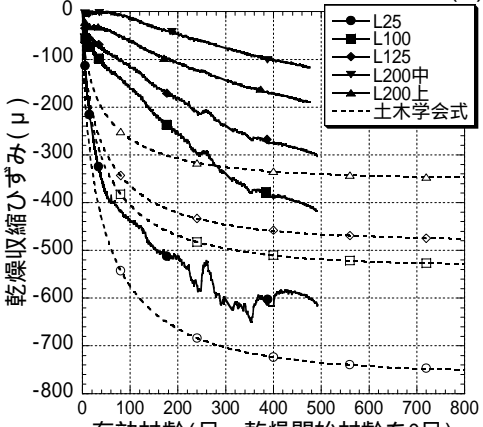
$$k_s(t, t_0) = 0.79 \times \{1 - \exp[-0.01 \times (t - t_0)^{0.67}]\}$$



有効材齢(日, 始発を材齢0日)
図 - 2 乾燥収縮実験結果

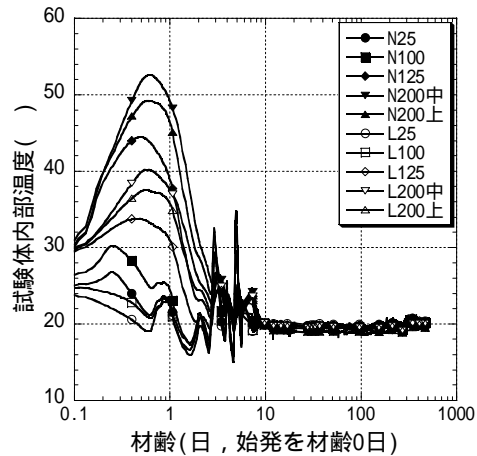


有効材齢(日, 乾燥開始材齢を0日)
図 - 4 土木学会式との比較(N)

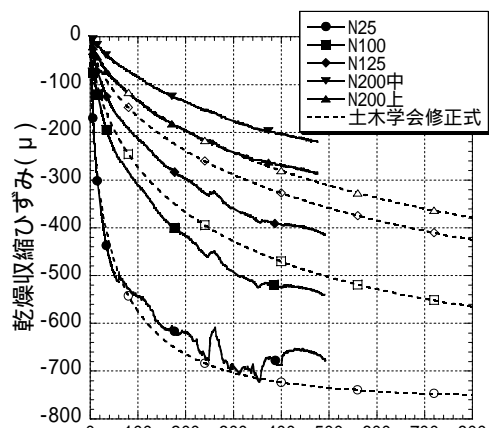


有効材齢(日, 乾燥開始材齢を0日)
図 - 6 土木学会式との比較(L)

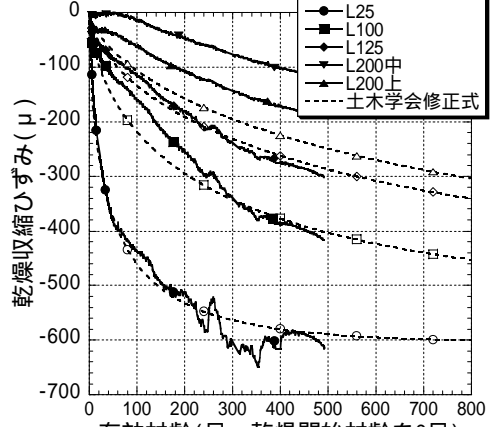
図 - 5 に普通コンクリートの乾燥収縮試験結果と土木学会修正式の算定値を示す。図 - 5 から、V/S の大きな試験体においても、土木学会修正式は実験値を概ね良い精度で予測している事が確認できる。現在、有効材齢 500 日まで計測を行なっているが、N25 のひずみはほとんど勾配がないのに対して、V/S の大きい試験体のひずみはまだ勾配が急であり、今後の挙動変化を計測していく必要がある。



材齢(日, 始発を材齢0日)
図 - 3 試験体内部温度



有効材齢(日, 乾燥開始材齢を0日)
図 - 5 土木学会修正式との比較(N)



有効材齢(日, 乾燥開始材齢を0日)
図 - 7 土木学会修正式との比較(L)

(2) ひび割れ低減コンクリート

図 - 6 に L の乾燥収縮試験結果と土木学会式算定値を示す。N と同様に、基点は乾燥開始である材齢 7 日とした。図 - 6 から、乾燥収縮試験結果は V/S の大小によらず土木学会式の算定値に対して小さい傾向を示している。図 - 4 から、N25 の乾燥収縮ひずみは 700 μ であるのに対して、L25 は 600 μ 程度であり乾燥収縮ひずみを 15%程度低減している。これは同一骨材、同一調合である事から、低熱ポルトランドセメントと膨張材の影響で乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる。既往の実験においても、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに対して、低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは 100 μ 程度小さい事からセメント種類の影響によるものと思われる。¹⁾

図 - 7 に L の乾燥収縮試験結果と土木学会修正式算定値を示す。V/S の小さい L25 については、試験結果と土木学会式算定値との差が大きいため、土木学会式の収縮ひずみの最終値 ϵ'_{sh} を 0.8 倍に補正した式で表現した。それ以外の試験体については、N と同様に k_s 値を用いた土木学会修正式を用いた。図 - 7 から V/S の大きな試験体においても概ね良い精度で予測できている事が確認できる。これらの事から、本コンクリートにおいても、100 \times 100 \times 400mm(L25)の乾燥収縮ひずみを把握できていれば、 k_s 値を用いる事で V/S の大きな実部材レベルの乾燥収縮ひずみも予測できると考えられる。

3. 膨張量 1 次実験

3.1 実験概要

表 - 4 に実験要因と水準を示す。膨張コンクリートの膨張量は養生温度及び拘束度による影響が大きい事が報告されており³⁾、図 - 2 の結果においても膨張量に与える内部温度の影響は大きい結果となった。1 次実験では、L の調合について表 - 4 に示す養生温度 3 水準、拘束鋼材比 4 水準の計 12 種類の膨張量実験を行い、膨張量に与える養生温度

及び拘束鋼材比の影響について検討した。

3.2 実験方法

100 \times 100 \times 400mm の試験体に、中央部にひずみゲージを貼付した各種の鉄筋を埋設し膨張ひずみを計測した。拘束試験 B 法(JIS A 6202)に準じ、試験体端部に拘束端板を設けた。拘束鋼材比 0% (無筋)の試験体については、100 \times 100 \times 400mm の試験体に埋め込みひずみ計を埋設し膨張ひずみの計測を行った。計測は材齢 7 日まで行い、各養生温度で封緘養生とした。

3.3 使用材料及び調合

使用材料及び調合は 2.2 と同じものとした。

3.4 実験結果

図 - 8 に膨張ひずみ実験結果を示す。図 - 8 から、拘束鋼材比 0%では温度が高いほど材齢初期のひずみ勾配が急であり、最大膨張ひずみの差も最大 500 μ 程度もある事から、膨張量に与える養生温度の影響が大きい事と言える。しかし、拘束鋼材比が大きくなるに従い、養生温度による膨張量の差は小さくなった。特に、拘束鋼材比 0.0%と 0.1%では最大膨張量の差が 200 ~ 600 μ であり非常に大きい事から、全く拘束のない最大膨張ひずみ(以下、自由膨張ひずみ)と鋼材比 0.1%の最大膨張ひずみ(以下、微拘束膨張ひずみ)には大きな差がある事が分かった。

3.5 考察

図 - 9 に膨張ひずみに与える拘束鋼材比の影響を示す。図 - 9 から、拘束鋼材比が小さくなるに従い最大膨張ひずみは大きくなっており、特に自由膨張ひずみは非常に大きな値を示している。自由膨張ひずみは見掛け上非常に大きい

表 - 4 実験要因と水準

試験体記号	養生温度(°C)	拘束鋼材比(%)	内部鉄筋
30°C0.0%	30	0.0	-
30°C0.1%		0.1	D4
30°C1.0%		1.0	D13
30°C8.0%		8.0	D32
20°C0.0%	20	0.0	-
20°C0.1%		0.1	D4
20°C1.0%		1.0	D13
20°C8.0%		8.0	D32
10°C0.0%	10	0.0	-
10°C0.1%		0.1	D4
10°C1.0%		1.0	D13
10°C8.0%		8.0	D32

微小な拘束で急激に膨張量が減少する傾向にあるため、ケミカルプレストレスに寄与しない膨張量が含まれていると考えられる。このような現象は既往の文献でも報告されており、六車等は自由膨張ひずみと拘束された試験体のひずみが著しく違う値を示す事から、内部鋼材比 0.46%と 0.93%の最大膨張ひずみの 2 点から内部鋼材比 0%まで直線で外挿した値を有効膨張ひずみとする考え方を提示している⁸⁾。不安定である無拘束膨張ひずみの代わりに安定した値となる有効膨張ひずみを解析のインプットデータとする事は、実部材レベルにおける膨張コンクリートのケミカルプレストレス等を解析する上で、非常に有効な手段の一つである。しかし、2 種類の試験体の実験結果が必要であり、また 2 種類の鋼材比の設定で有効膨張ひずみの算定値が変化することも懸念されている。

図 - 9 から、自由膨張ひずみに与える養生温度の影響は最大 542 μ であるのに対して、微拘束膨張ひずみは最大 128 μ であり、膨張ひずみに与え

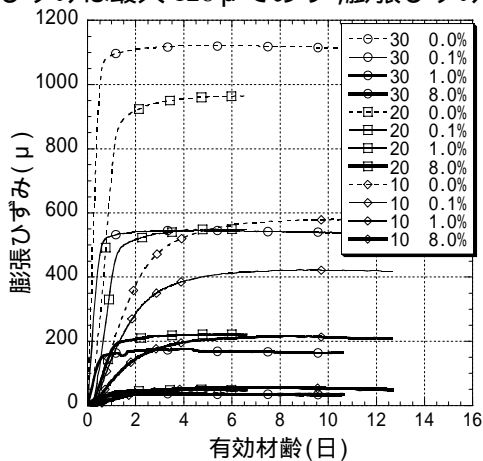


図 - 8 膨張ひずみ実験結果

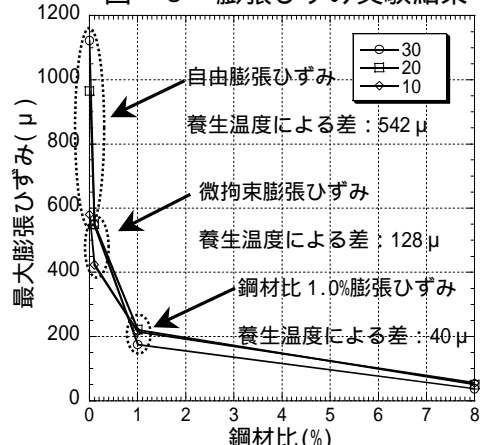


図 - 9 膨張ひずみに与える拘束鋼材比の影響

る養生温度の影響は非常に小さい事が分かった。微拘束膨張ひずみは膨張量に与える養生温度の影響や型枠等の微小な拘束の影響も小さい事から、解析のインプットデータとして有効膨張ひずみに適用できる可能性があると思われる。微拘束膨張ひずみを有効膨張ひずみとする事で、2 種類の試験体を作製する必要がなくなり、鋼材比の設定で膨張量が増える事もなくなると考えられる。

4. 膨張量 2 次実験

4.1 実験概要

2 次実験では、2 次実験の結果と 1 次実験の結果を比較し、拘束鋼材比 0.1%の微拘束膨張ひずみに再現性があるか確認する事で、微拘束膨張ひずみを有効膨張ひずみに適用できるかを確認した。表 - 5 に実験要因と水準を示す。養生温度は 20 一定とし、拘束鋼材比を 6 種類に変化させた試験体について膨張ひずみを測定した。

4.2 実験方法

実験方法は 3.2 と同様の実験方法とした。

4.3 使用材料及び調合

表 - 6 に使用材料一覧 表 - 7 に調合表を示す。骨材以外の材料については、1 次実験と同種のも

表 - 5 実験要因と水準

試験体記号	養生温度 (°C)	拘束鋼材比 (%)	内部鉄筋
20°C0.0%	20	0.0	-
20°C0.1%		0.1	M4
20°C0.4%		0.4	M8
20°C1.0%		1.0	M12
20°C4.0%		4.0	M24
20°C8.0%		8.0	M33

表 - 6 使用材料一覧

項目	種類等
セメント	低熱ポルトランドセメント (密度: 3.22g/cm ³)
膨張材	低添加型膨張材 (密度: 3.16g/cm ³)
細骨材	静岡産山砂 (密度: 2.56g/cm ³)
粗骨材	奥多摩産硬質岩砕石 (密度: 2.65g/cm ³)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表 - 7 調合表

調合種類	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	膨張材	砕砂	砕石
L	45.0	170	358	20	780	962

のを使用した。

4.4 実験結果

図 - 10 に膨張ひずみ実験結果を示す。自由膨張ひずみは 1 次実験の結果に比べて小さいが、拘束鋼材比 0.1%、1.0%、8.0%の膨張ひずみは前回の実験結果と同程度であった。自由膨張ひずみは、型枠等の拘束を受けるだけでも小さくなるため、今回も何らかの拘束を受けたために自由膨張ひずみが小さくなったと考えられる。

4.5 考察

図 - 11 に膨張ひずみに与える拘束鋼材比の影響を示す。微拘束膨張ひずみは 1 次実験では 550 μ 、2 次実験では 530 μ であり安定した膨張ひずみを示す事を確認した。また、算定した有効膨張ひずみは 450 μ であり、微拘束膨張ひずみと有効膨張ひずみは近い値を示した。

微拘束膨張ひずみが安定した値を示す事から、拘束鋼材比 0.1%の微拘束膨張ひずみを有効膨張

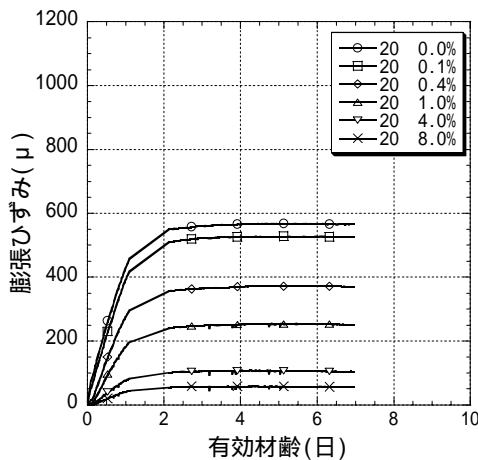


図 - 10 膨張ひずみ実験結果

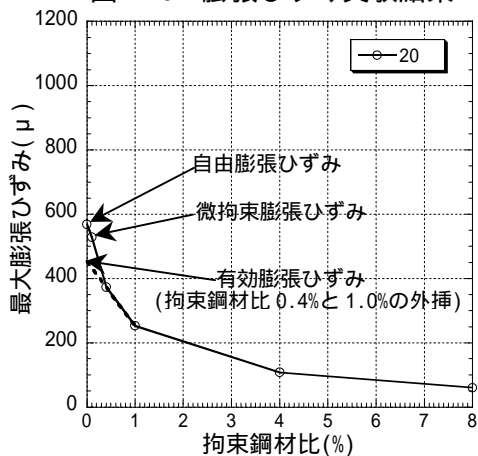


図 - 11 膨張ひずみに与える拘束鋼材比の影響

ひずみとして適用する事は可能である事が分かった。

5. まとめ

- (1) 低熱ポルトランドセメント及び膨張材を用いたコンクリートにおいて、100 × 100 × 400mm の乾燥収縮ひずみを把握できていれば、 k_s 値を用いる事で V/S の大きな実部材レベルの乾燥収縮ひずみも概ね予測できる。
- (2) 鋼材比 0.1%の微拘束膨張ひずみは、膨張ひずみに与える養生温度の影響も小さく安定した値を示している事から、微拘束膨張ひずみを有効膨張ひずみとして適用する事は可能である事が分かった。

参考文献

- 1) 稲葉洋平ほか：ひび割れ低減コンクリートの開発(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.169-170，2002.8
- 2) 百瀬晴基ほか：ひび割れ低減コンクリートの開発(その 4)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.109-110，2003.9
- 3) 三谷裕二ほか：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.155-160，2003.9
- 4) 岡村甫ほか：膨張コンクリートの膨張性状に及ぼす温度の影響，コンクリート工学年次講演集，pp.89-92，1979
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 - 構造性能照査編 - ，2002.3
- 6) 井上和政ほか：乾燥収縮量が異なるコンクリートの乾燥収縮量に及ぼす部材厚の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.453-458，2002
- 7) 鹿島出版会：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，1976.11
- 8) 朝倉書店：コンクリート工学ハンドブック，pp.666-667，1981.11