論文　軽量型枠法を用いた膨張コンクリートの性能評価における自己収縮の影響

栗原　勇典[*1]・半井　健一郎[*2]

要旨：軽量型枠法により簡便に計測される膨張コンクリートのひずみは，JIS A6202 の附属書 2 に示された A 法一軸拘束供試体の膨張ひずみと近い値を示すことから，実務での活用が期待されている。これまでに著者らは，両者の関係性を，拘束条件と養生条件の違いに由来する仕事量の関係から理論的に考察してきた。本研究では，特に養生条件に着目し，新たに低水結合材比(W/B)の配合を追加して適用性を検討した。その結果，封緘養生における自己収縮に及ぼす W/B や単位膨張材量の影響を考慮することで，軽量型枠法と A 法のひずみの関係性を説明できた。

キーワード：膨張コンクリート，性能評価，簡易法，仕事量，拘束条件，養生，自己収縮

1．はじめに

近年，コンクリートの収縮量の増大や高性能化の観点から，収縮補償やケミカルプレストレスの付与が可能な膨張コンクリートの有用性があらためて注目されている。膨張材を有効に使用するためには，膨張性能の評価が重要である。現在，JIS A 6202 の附属書 2 に示された，A 法一軸拘束供試体を用いたコンクリートの拘束膨張試験が広く使用されている。しかし，専用の拘束器具が必要であることなど，十分に簡便な試験ではない。今後のさらなる膨張材の普及には，生コン工場や現場での簡便な品質管理手法もあわせて必要となると考えられる。

辻埜らは，軽量鋼製型枠を利用した簡易な拘束膨張試験方法（以下，軽量型枠法）を提案している [1), 2), 3)]。軽量鋼製型枠中央部における円周方向の膨張ひずみと A 法の水中ひずみは，材齢 7 日で同程度になることなどが示されている。本手法は，JCI の高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会でも検討され，共通試験が実施されたほか，試験方法試案 [4)]が提案されている。

この中で筆者らは，仕事量の概念に基づく理論的考察を行い，A 法一軸拘束器具と軽量鋼製型枠という拘束方法の違いと，水中養生と封緘養生という養生の影響の両者を考慮することによって，軽量型枠法で計測されるひずみと A 法一軸拘束供試体のひずみの関係性を説明できることを示した [5)]。養生の影響に関しては，水中養生によって高まる膨張材の効果によって膨張ひずみが大きくなり，その影響は水結合材比（W/B）が小さくなるほど顕著になるとした。

一方，松本らの研究 [6)] では，膨張材の効果を水中養生と封緘養生のそれぞれにおいて比較すると，膨張材の使用による膨張ひずみの発現は養生方法によらず同程度であることを報告しており，同配合の膨張コンクリートを封緘養生すると水中養生よりも膨張ひずみが小さくなるのは，自己収縮の影響によるものであるとしている。このことは，先の著者らの考察とは異なるものであった。

そこで本研究では，W/B=40%の配合のコンクリートの実験を追加し，養生条件の違いによる膨張ひずみへの影響を，自己収縮や単位膨張材量に着目して整理し直した。これによって，軽量型枠法と A 法で計測される膨張ひずみの関係性についての理論的考察を深めることとした。

2．実験概要

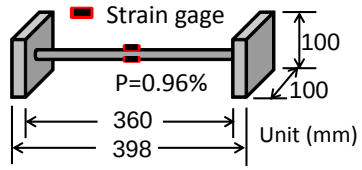
使用したコンクリートの配合を**表－1** に示す。膨張コンクリートの W/B を，著者らの既往の研究 [5)]における 50%，60%の 2 水準に 40%を加えた計 3 水準とし，膨張材(EX)の置換率を変化させた。セメントには普通ポルト

表－1　コンクリートの配合

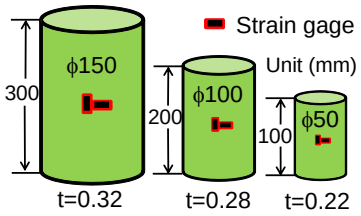
W/B (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)					
		W	C	EX	S	G	AE減水剤
40	4.5	186	448	20	733	1008	1.2
			438	30			
			428	40			
			418	50			
			408	60			
			398	70			
50	4.5	187	356	20	804	1041	0.8
			346	30			
			336	40			
			326	50			
			316	60			
			306	70			
60	4.5	191	298	20	816	1043	0.8
			288	30			
			278	40			
			268	50			
			258	60			
			248	70			

W:水，B:結合材(C+EX)，C:セメント，EX:膨張材，S:細骨材，G:粗骨材

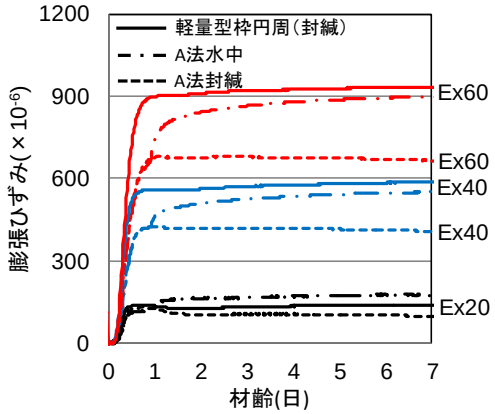
*1　群馬大学大学院　工学研究科社会環境デザイン工学専攻　(学生会員)
*2　群馬大学大学院准教授　工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (正会員)



図－1　A 法一軸拘束器具の形状寸法



図－2　軽量鋼製型枠の形状寸法



図－3 膨張ひずみの経時変化

(W/B=40%，Ex=20，40，60kg/m^3)

ランドセメントを用いた。膨張材にはエトリンガイト・石灰複合系の低添加型を用い，単位膨張材量(Ex) を各 W/B で 20~70kg/m^3 の 6 種類とした。

まず，**図－1** に示すように，JIS A 6202 の A 法に相当する試験体として，拘束棒(呼び名 11mm，鋼材比 0.96%)と拘束端板(厚さ 19mm)からなる拘束器具を用いた角柱(100mm×100mm×360mm) の供試体(以下，A 法供試体)を作製した。一軸拘束膨張ひずみは，拘束棒の中央に貼付した 2 枚のひずみゲージ(長さ 5mm)により計測した。ダイヤルゲージではなくひずみゲージによって膨張ひずみを計測しているため，厳密には JIS の A 法とは異なるが，JIS 法に相当するひずみが得られる。

また，軽量型枠法として，試験方法試案 [4]を参考に，**図－2** に示すように，ϕ100×200mm(胴板厚さ t=0.28mm)の軽量鋼製型枠を使用した円柱供試体(以下，軽量型枠供試体と称す)を作製した。加えて，W/B=40%における Ex=20，40，60kg/m^3 および W/B=50%における Ex=30，50，70kg/m^3 の配合については，ϕ50×100mm (t=0.22mm)，ϕ150×300mm (t=0.32mm) の軽量型枠供試体を作製した。

ひずみゲージ(長さ 5mm)は，繋ぎ目部から 180°の位置に円周方向と軸方向に貼付した。

打込み後，すべての供試体は材齢 1 日まで封緘養生とした。軽量型枠供試体は，材齢 1 日後も脱型せずに計測終了まで封緘養生とした。一方の A 法供試体は，材齢 1 日ですべての供試体を脱型後，封緘養生または水中養生とした。養生および測定は，室温 20℃程度で温度の日変動の少ない室内で行った。いずれの供試体においても，膨張ひずみの計測は，打込み時から 1 時間の間隔で，材齢 7 日目まで行った。なお，同一条件で各 3 体の測定を行い，考察では平均値を用いた。

なお，本論文では，水中および封緘養生した A 法供試体の一軸拘束膨張ひずみを「A 法水中ひずみ」および「A 法封緘ひずみ」，封緘養生した軽量型枠供試体の円周方向および軸方向の膨張ひずみを「軽量型枠円周ひずみ」および「軽量型枠軸ひずみ」と称する。

３．　実験結果

３．１　A 法水中および封緘ひずみと軽量型枠円周ひずみ(ϕ100㎜)

（１）膨張ひずみの経時変化

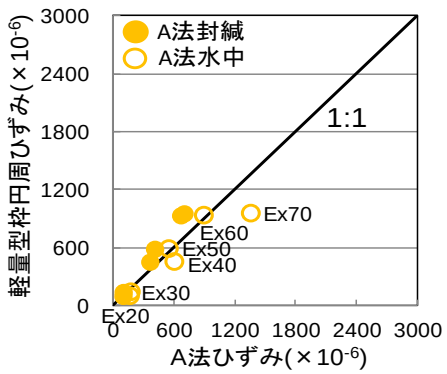
図－3 に，本研究で新たに追加した W/B=40%における，Ex=20，40，60kg/m^3 の軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)と A 法水中および封緘ひずみの経時変化を示す。

Ex=20kg/m^3 の軽量型枠円周ひずみについては，材齢 1 日付近から膨張ひずみの減少が見られることから，膨張材の反応が収束したのちに自己収縮の影響があらわれたものと考えられる。また，A 法では，材齢 1 日で水中養生を開始したが，その際に，大きな膨張ひずみの増加が生じ，その増加は特に Ex が大きくなるほど顕著であった。これは水中養生開始までの封緘養生中の自己収縮によるものと考えられた。なお，W/B=50，60%においては，封緘養生における膨張ひずみの減少や水中養生開始時の大幅な膨張ひずみの増加はほとんど見られなかった [5]。

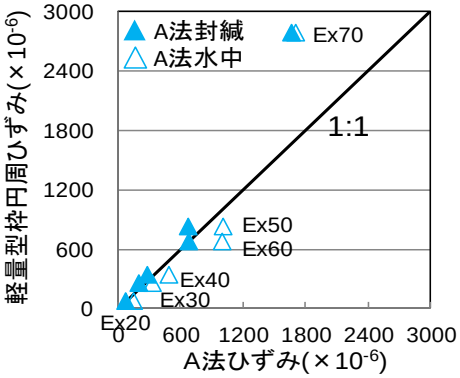
（２）A 法封緘ひずみまたは A 法水中ひずみと軽量型枠円周ひずみの関係(ϕ100㎜，材齢 7 日)

図－4，**図－5** および**図－6** に，材齢 7 日における，A 法封緘ひずみまたは A 法水中ひずみと軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)との関係を，W/B ごとに示す。A 法水中ひずみが JIS 法相当，軽量型枠円周ひずみが軽量型枠法での評価対象である。

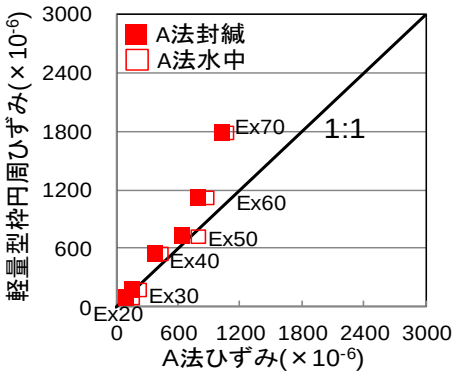
W/B=40%においても，W/B=50，60%と同様に，膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度までの場合，A 法封緘ひずみまたは A 法水中ひずみと軽量型枠円周ひずみは 1：1 に近い範囲で一定の相関性が認められる。このうち，A 法水中ひずみと軽量型枠円周ひずみの関係は，W/B によって傾向が異なり，W/B=60%では両者はほぼ同等，W/B=40，50%では A 法水中ひずみが軽量型枠円周ひずみよりも大きくなった。



図－4 軽量型枠円周ひずみ（ϕ100mm）と A 法水中および封緘ひずみの関係(W/B=40%，材齢 7 日)



図－5 軽量型枠円周ひずみ（ϕ100mm）と A 法水中および封緘ひずみの関係(W/B=50%，材齢 7 日)[5)]

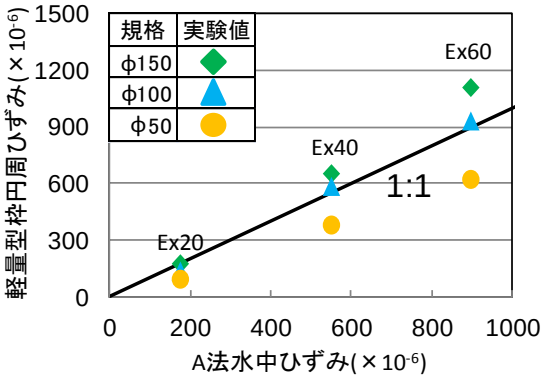


図－6 軽量型枠円周ひずみ（ϕ100mm）と A 法水中および封緘ひずみの関係(W/B=60%，材齢 7 日)[5)]

一方，W/B=50，60%における膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度以上では，A 法封緘ひずみまたは A 法水中ひずみと比べ，軽量型枠円周ひずみが大きくなった。なお，辻埜らによると，軽量鋼製型枠の弾性範囲は 700×10^{-6} 程度までで，それよりも大きなひずみ領域では塑性化することが報告されており [2)]，膨張ひずみが大きくなると軽量型枠円周ひずみが大きくなった本実験結果と合致する。

３．２　軽量型枠円周ひずみに及ぼす寸法の影響

図－7 に，W/B=40%おける Ex=20，40，60kg/m^3 の，直径が 50，100，150mm と異なる軽量鋼製型枠を用いて作製した軽量型枠供試体の軽量型枠円周ひずみと A 法水中ひずみとの関係(材齢 7 日)を示す。直径 100mm については，３．１で掲載した結果と同じものである。



図－7　軽量型枠円周ひずみ(ϕ=50，100，150mm)と A 法水中ひずみの関係 (W/B=40%，Ex=20，40，60kg/m^3)

直径 100mm の軽量型枠円周ひずみと比較し，直径 50mm のひずみは減少し，直径 150mm のひずみは増加した。軽量鋼製型枠の鋼材比(=胴板厚さ/供試体半径)は，直径 100mm の型枠では 0.56%であるのに対し，直径 50mm では 0.88%と大きく，直径 150mm では 0.43%と小さい。この鋼材比の違いによる拘束の大小によって，軽量型枠の円周ひずみが増減したといえる。

４．仕事量の概念に基づく考察

４．１　考察の方法

軽量型枠法で計測される「軽量型枠円周ひずみ」と JIS 法に相当する「A 法水中ひずみ」の関係性の理論的考察では，著者らのこれまでの検討 [5)]と同様に，軽量鋼製型枠と A 法一軸拘束器具という拘束条件の違いと，封緘と水中という養生条件の違いを仕事量により分析する。A 法供試体および軽量型枠供試体における円周方向および軸方向の仕事量の算出は文献 7)，8)，9)を参照した。

以降では，水中養生した A 法供試体の仕事量を「A 法水中仕事量」，封緘養生した A 法供試体の仕事量を「A 法封緘仕事量」とする。また，軽量鋼製型枠の円周方向の仕事量を「軽量型枠円周仕事量」，軸方向の仕事量を「軽量型枠軸仕事量」とする。

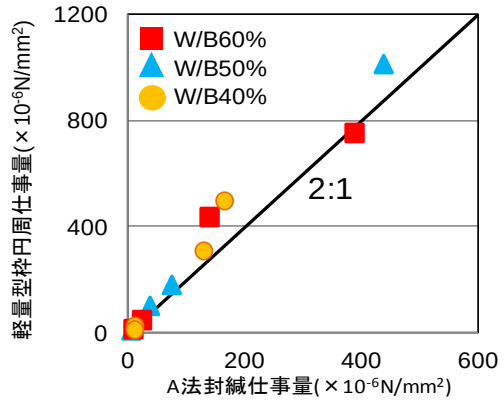
４．２　仕事量による拘束条件の考察

ここでは，養生条件を封緘養生に統一し，軽量鋼製型枠と A 法一軸拘束器具の拘束条件の影響を，仕事量から考察する。比較は材齢 7 日の時点のみで行った。

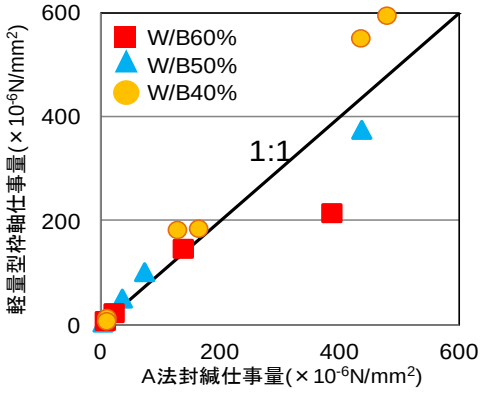
（１）軽量型枠円周および軸仕事量(ϕ100mm)と A 法封緘仕事量の関係(材齢 7 日)

図－8，図－9 にそれぞれ,軽量型枠円周および軸仕事量と A 法封緘仕事量の関係を示す。

W/B=40%においても，W/B=50，60%と同様に，軽量型枠円周仕事量は A 法封緘仕事量の約 2 倍，軽量型枠軸仕事量は A 法封緘仕事量とほぼ同じ値となった。これら



図－8　軽量型枠円周仕事量(ϕ100mm)と A 法封緘仕事量の関係(材齢 7 日)



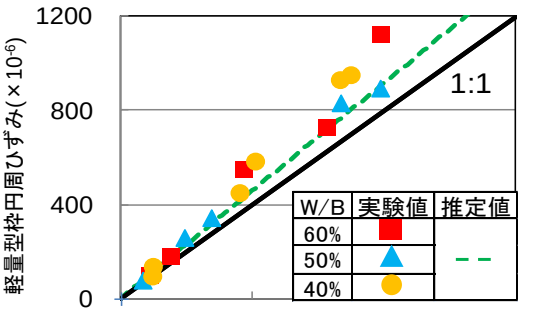
図－9　軽量型枠軸仕事量(ϕ100mm)と A 法封緘仕事量の関係(材齢 7 日)

は，軽量鋼製型枠による拘束が円周方向では二軸拘束，軸方向では一軸拘束であるのに対し，A 法では一軸拘束となっているためと言える。

（２）拘束条件を考慮した膨張ひずみの推定

軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)と A 法封緘ひずみの推定値と実験値の関係を**図－10** に示す。推定では，まず，一軸拘束状態の A 法封緘ひずみから A 法封緘仕事量を計算し[7),8)]，次に，**図－8** および**図－9** に示した拘束条件の異なる供試体の仕事量の関係を用いて軽量型枠円周および軸仕事量を計算し，最後に，薄肉円筒理論[3),9)]を用いて軽量型枠円周ひずみを算出した[5)]。なお，推定に用いた**図－8** および**図－9** に示した仕事量の関係は，軽量型枠の弾性範囲と考えられる，膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度を大きく超えない範囲までを検討対象としている。よって，以降においても，膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度以上の推定関係については，参考のために掲載するものとする。

膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度までは，W/B によらず推定値は実験値と良好に一致していることが分かる。つまり，軽量型枠円周ひずみと A 法封緘ひずみの関係は，拘束条件の違いを仕事量によって考慮することで説明された。



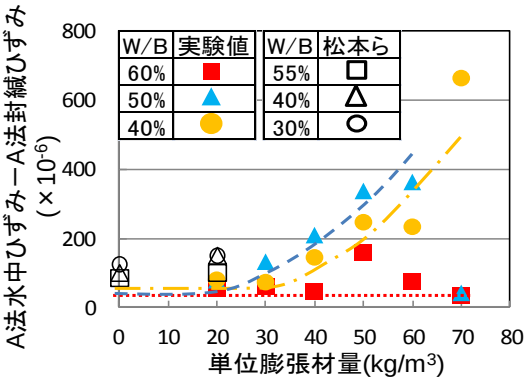
図－10　軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)と A 法封緘ひずみの実験値と推定値の関係(材齢 7 日)

４．３　膨張ひずみによる養生条件の考察

ここでは，A 法供試体について，封緘と水中と異なる養生条件の影響を膨張ひずみから考察する。筆者らのこれまでの検討[5)]では仕事量を用いてきたが，本研究では自己収縮ひずみの影響を考慮するため，ひずみでの比較とした。

（１）単位膨張材量が A 法水中と A 法封緘ひずみの関係に及ぼす影響(材齢 7 日)

横軸に単位膨張材量（Ex），縦軸に材齢 7 日で測定した A 法水中ひずみと A 法封緘ひずみの差を，**図－11** に示す。養生方法が膨張ひずみに与える影響を分析するため，今回の検討で新たに整理した。なお，膨張材無混和を含む検討の参考として，松本ら[6)]が B 法を用いて計測した膨張材無混和および単位膨張材量 20 kg/m^3 の膨張および収縮ひずみの結果(温度 20℃)もあわせて示した。



図－11　単位膨張材量が膨張ひずみに及ぼす影響（材齢 7 日）

本実験の W/B=60%では，Ex=50kg/m^3 を除き，Ex によらずにひずみの差は概ね一定となった。W/B=50%においては，極端に膨張ひずみが大きかった Ex=70kg/m^3 を除けば，Ex の増加とともにひずみの差が大きく，つまり，封緘養生に対する水中養生の膨張ひずみが大きくなった。W/B=40%においては，Ex=20～30kg/m^3 ではほぼ同じ値であったが，それ以上に Ex が増加するとひずみの差が大きくなった。

松本らの実験結果[6)]では，Ex=20kg/m^3 における水中養

生と封緘養生のひずみの差は膨張材無混和(Ex=0kg/m^3)とほぼ同程度であったことから，膨張材の使用による膨張ひずみの発現は養生方法によらず同程度であるとしていた。A 法を用いた本研究においては膨張材無混和の実験を行っていないものの，松本らの実験結果を参考にすれば，図中の曲線のような関係を有していると考えられる。Ex の増加とともにひずみの差が大きくなる範囲は，松本らの検討よりも Ex が大きな範囲であり，本研究と松本らの考察は矛盾しない。

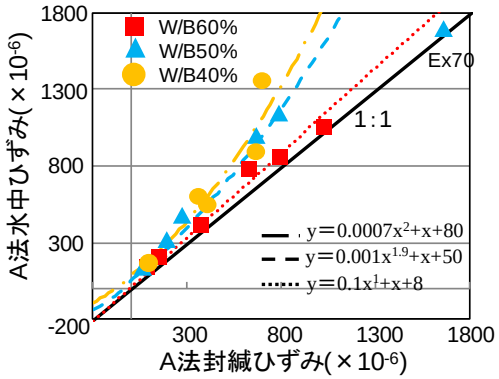
Ex の増加によってひずみ差が大きくなる理由には二つのことが考えられる。封緘養生における，Ex の増加による自己収縮の増加と膨張材の反応のための水分不足である。膨張材を混和することによって化学収縮が増加することは，盛岡らの研究[10]によって示されている。これにより，Ex が増加するほど，封緘養生における自己収縮が大きくなる事が考えられる。また，同じく盛岡らの研究[10]によれば，膨張材を混和したセメントペーストでは，無混和のペーストと比較し結合水量が増加することが報告されている。このため，W/B が小さく Ex が大きい膨張コンクリートを封緘養生した場合には，反応水が不足する可能性があると考えられる。つまり，膨張材を添加することによる自己収縮および結合水量の増加により，A 法封緘ひずみと比較し，十分に水分が供給される A 法水中ひずみとの差が大きくなったと考えられる。また，これらは W/B が小さくなるほど顕著になる現象であることから，W/B=60%と高い場合には影響がなく，ひずみの差は Ex によらずにほぼ一定となったといえる。

一方，ひずみの差が増加した W/B=40，50%では，W/B=40%の方がひずみの差は小さくなる傾向を示し，その程度は，Ex の増加とともに大きくなった。これは，W/B の低下に加え，一軸拘束によってケミカルプレストレスが導入されることで，組織の緻密化が起こり，水中養生による水分供給が制限されたことで，A 法水中ひずみが小さくなったためと考えられる。

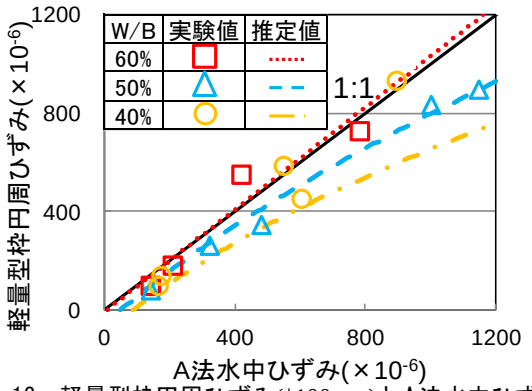
なお，以上の議論から乖離したデータに関しては，まず W/B=50%，Ex=70 kg/m^3 では，著者らの研究[5]でも示したように，膨張ひずみが非常に大きい範囲において，一軸拘束である A 法供試体では膨張を有効に拘束できず，A 法水中ひずみと A 法封緘ひずみの差が明確に表れなくなったためである。また，W/B=60%，Ex=50 kg/m^3 については測定誤差による影響も考えられるが，今後の検討課題としたい。

（2）A 法水中ひずみと A 法封緘ひずみの関係（材齢 7 日）

図－12 に，本実験における A 法水中ひずみと A 法封緘ひずみの関係および関係式を示す。本研究では，ひずみの実測値からの関係式を新たに与え，この関係式を後



図－12 A 法水中ひずみと A 法封緘ひずみの関係（材齢 7 日）



図－13 軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)と A 法水中ひずみの実験値と推定値の関係（材齢 7 日）

述する推定において用いることとした。関係式の関数型は，4．3（1）で示したように，膨張材添加に伴い，自己収縮ひずみが徐々に増加する事を表現するため，指数関数型を適用した。なお，前述したように，W/B=50%における関係式を与える際には，Ex=70 kg/m^3 のデータを，W/B=60%では Ex=50 kg/m^3 を除外した。

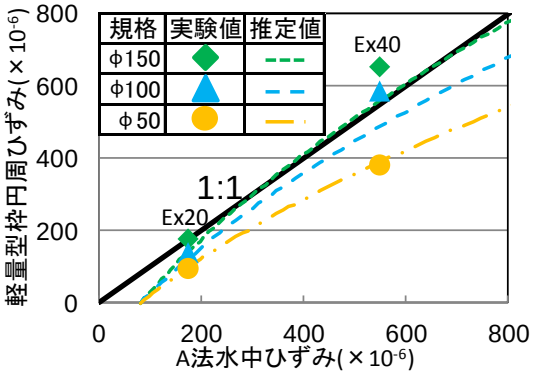
ここで，W/B ごとの関係式における x 軸切片を見てみると，W/B=60%では約 7×10^{-6}，W/B=50%では約 41×10^{-6}，W/B=40%では約 100×10^{-6} の収縮を示している。つまり，W/B が小さくなるとともに，A 法封緘ひずみが小さくなっている。これは，前述した自己収縮による影響によるものと思われる。

（3）拘束条件および養生条件を考慮した膨張ひずみの推定

軽量型枠円周ひずみ(ϕ100mm)と A 法水中ひずみの推定値と実験値の関係を図－13 に示す。

4．2（2）において，拘束条件の違いを考慮することによって得られた，「軽量型枠円周ひずみ」と「A 法封緘ひずみ」の関係の推定値(図－10)に加え，図－12 に示された「A 法封緘ひずみ」と「A 法水中ひずみ」の関係式を用いて養生の影響を考慮することにより，「軽量型枠円周ひずみ」と「A 法水中ひずみ」の関係を推定した[5]。

膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度までの範囲において，W/B



図－14　異なる規格（φ50，100，150㎜）の軽量型枠円周ひずみの推定値と実験値の関係（材齢 7 日）

ごとに，推定値は実験値と良好に一致していることが分かる。また，ひずみの推定値は自己収縮の影響を考慮した膨張ひずみの関係式(図－12)を用いることによって，原点を通らない曲線形となった。

（４）ひずみの推定手法の適用性の検討

図－14 に，φ50，100，150mm の軽量鋼製型枠を用いた供試体(W/B=40%)の軽量型枠円周ひずみと A 法水中ひずみの関係を示す。図中に示すφ50 mm およびφ150 mm の推定値は，**図－13** におけるφ100mm の供試体の「軽量型枠円周ひずみ」と「A 法水中ひずみ」の関係の推定値を元に，薄肉円筒理論 [3), 9)]における軽量鋼製型枠の鋼材比(=胴板厚さ/供試体半径)を変化させる事により求めた [5)]。

推定値は実験結果とおおよそ一致しており，このことは，寸法が異なる軽量鋼製型枠を用いた場合でも適用可能であることを意味し，本論文で提案した推定手法の一般性を示すものである。

５. まとめ

本実験では，養生条件の違いが膨張ひずみに与える影響を，W/B=40%の配合を新たに加え，自己収縮の影響や単位膨張材量に着目し整理し直した。その結果，本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

(1) W/B=40%の配合における膨張ひずみの経時変化から，封緘養生である軽量型枠円周ひずみの減少や，A 法の水中養生開始時における膨張ひずみの急増が確認され，自己収縮の影響と考えられた。

(2) W/B=40%の配合においても，膨張ひずみが 700×10^{-6} 程度までの場合，A 法封緘ひずみまたは A 法水中ひずみと軽量型枠円周ひずみは 1：1 に近い範囲で一定の相関性が認められた。

(3) W/B=40%の配合においても，軽量型枠円周および軸仕事量と A 法封緘仕事量の関係はそれぞれ 2：1，1：1 の関係となった。

(4) A 法水中ひずみは A 法封緘ひずみよりも大きくなるが，その差は単位膨張材量が多いほど大きくなった。これは，自己収縮と構造の緻密化による水分供給の不足から説明されると考えられた。

(5) (3)の拘束条件の影響と(4)の養生条件の影響を考慮することで，軽量型枠円周ひずみと A 法水中ひずみの関係性は，軽量鋼製型枠の寸法によらずに良好に説明することができた。

謝辞

本研究は，高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会（JCI-TC094）の WG1（材料性能 WG）の活動の一環として開始したものであり，手法を開発した橋田浩氏や辻埜真人氏（清水建設）をはじめ，委員会関係各位のご協力に感謝致します。

参考文献

1) 辻埜真人ほか：膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討(その 2 膨張コンクリートの品質管理方法)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，A-1，pp.925-926，2010.

2) 辻埜真人ほか：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.437-442，2011.

3) 辻埜真人ほか：軽量型枠法における膨張コンクリートの拘束試験に関する検討，「高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システム」に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学会，pp.373-380，2011.

4) 橋田浩：膨張コンクリートの封緘養生による拘束膨張および圧縮強度試験方法試案，「高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システム」に関する研究委員会，日本コンクリート工学会，pp.142-145，2011.

5) 半井健一郎・栗原勇典ほか：鋼製軽量型枠を用いた膨張コンクリートの簡易性能評価に関する仕事量による考察，セメント･コンクリート論文集，pp.209-216，No.65，2011.

6) 松本健一ほか：膨張材によるコンクリートの収縮低減，土木技術資料，2011.

7) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について，セメント技術年報，Vol.27，pp.340-344，1973.

8) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第 235 号，pp.111-124，1975.

9) 辻幸和：コンクリート工学における膨張エネルギーの評価方法，コンクリート工学，Vol.26，No.10，pp.5-13，1988.

10) 盛岡実ほか：膨張材を混和したセメントペーストの化学収縮と自己体積変化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，pp.157-162，1999.