論文　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

井上和政*1・三井健郎*2・大野定俊*3・岩清水隆*4

要旨：乾燥収縮により発生する引張応力を予測していくために，単位水量や混和剤の使用，使用骨材種などコンクリートの調合によって乾燥収縮量が異なるコンクリートを用いて，有効部材厚さ 50～400mm の範囲で乾燥収縮量に及ぼす部材厚さの影響を実験的に調べた。その結果，引張応力発生の原因となる各部材厚間の収縮量の差は乾燥収縮量によって異なり，時間の経過に従って減少傾向を示すことがわかった。また，乾燥収縮量が異なっても，部材厚による収縮ひずみの比率はほとんどかわらない。これらの傾向は，補正した Rusch 式の ks 値を用いて比較的良好に予測できることがわかった。

キーワード：コンクリート，乾燥収縮，部材厚，予測式

１．はじめに

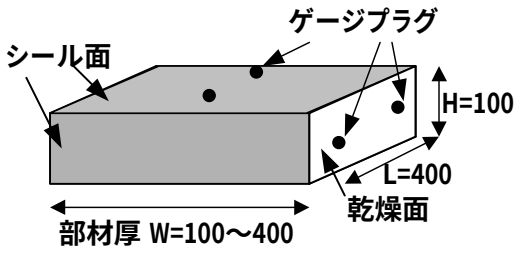
近年，ストック型社会への移行と地球環境問題から、コンクリート構造物およびコンクリート材料の耐久性や品質に関する関心が再び高まっている。特にコンクリートのひび割れ低減・抑制が再注目されている。

本報では、乾燥収縮により発生する引張応力を予測していくために、調合および使用材料などにより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さの影響を実験的に調べた結果と、既往[1～5]の各種乾燥収縮量予測式と比較検討した結果について報告する。また、これらの既往の予測式に対する検討から、本実験結果を比較的良好に推定できる補正した予測式についての検討結果について述べる。

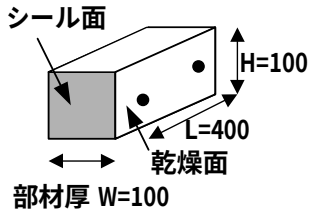
２．実験概要

２．１　試験体の概要

試験体の概要を**図－１**および**表－１**に示す。試験体は長さ 400mm，高さ 100mm とし、部材厚を実験要因の 100mm，200mm，400mm とした。そして、シール位置を**表－１**のように設定することで、有効部材厚[3]を 50～400mm とした。



1)有効部材厚 100～400㎜ の場合



2)有効部材厚 50㎜ の場合

図－１　試験体の形状・寸法

表－１　試験体の概要

有効部材厚 (mm)	V／S	試験体の大きさ (mm×mm×mm)	シール位置
50	2.5	100×100×400	端面
100	5	100×100×400	上下面，端面
200	10	100×200×400	上下面，端面
400	20	100×400×400	上下面，端面

注）有効部材厚：2×（乾燥断面積）／（乾燥断面の周長）
V／S：（乾燥部材の体積）／（乾燥部材の表面積）

*1　(株)竹中工務店　技術研究所　研究員　博士（工学）　（正会員）
*2　(株)竹中工務店　技術研究所　主任研究員　（正会員）
*3　(株)竹中工務店　技術研究所　主任研究員　ph.D.　（正会員）
*4　(株)竹中工務店　大阪本店技術部　（正会員）

表－３　コンクリートの調合表

No.	骨材種類	W/C (%)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S1	S2	G	Ad (C* %)	収縮低減剤 (kg/m^3)
1	α	50	18	4.5	45.0	190	380	370	370	927	0.2	－
2			8		48.9	160	320	433	433	927	0.8	－
3	β	50	18	4.5	48.0	170	340	832		972	0.2	－
4			18	2.0	49.8			897		972	0.2	5.0

注）No.1，No.2には高性能ＡＥ減水剤を、No.3，No.4にはＡＥ減水剤を使用した。

２．２　使用材料および調合

使用材料を**表－２**に、コンクリートの調合を**表－３**に示す。No.1，No.3 および No.4 は、目標スランプが 18±2.5cm となるように調合と混和剤量を調整した。No.2 の目標スランプは 8±2.5cm とした。No.1～No.3 の目標空気量は、4.5±1.0%、No.4 では 2.0±1.0%とした。いずれのコンクリートも、容量 100ℓの強制練りパン型ミキサを用いて、全材料一括投入後 90 秒間練混ぜた。これら No.1～No.4 の調合の各コンクリートは、単位水量の違い，混和剤の使用，および使用する骨材種類の違いによって、目標とする乾燥収縮量が 400～800×10^{-6} 程度に異なることを目標とした。

表－２　使用材料

セメント	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ（密度3.16g/cm^3）
細骨材	α：S1：瀬戸内海産海砂（密度2.54g/cm^3,FM=2.39） S2：赤穂産砕砂（密度2.55g/cm^3,FM=3.19） β：君津産山砂（密度2.62g/cm^3,FM=3.01）
粗骨材	α：赤穂産砕石（密度2.62g/cm^3,実積率58%） β：秩父産石灰砕石（密度2.70g/cm^3,実積率60%）
高性能ＡＥ減水剤	T社製ポリカルボン酸系
ＡＥ減水剤	T社製リグニン系標準形Ｉ種
収縮低減剤	F社製ｸﾞﾘｺｰﾙｴｰﾃﾙ系耐久性改善剤

２．３　実験の因子と水準

実験の因子・水準は、最終収縮量が異なるコンクリート４種類（**表－３**中の調合 No.1～No.4）と有効部材厚４種類（**表－１**中の 50mm，100mm，200mm，400mm）とした。

２．４　実験方法

練上り直後にスランプ試験と空気量試験を行った後、試験体を作製した。試験項目と準拠した試験方法を**表－４**に示す。圧縮強度試験およびヤング係数の測定は標準養生供試体を用いて行った。乾燥収縮用試験体は、材齢１週まで脱型せずに湿潤養生室で湿布養生を行った。試験体の打設面は材齢６日で、他の箇所は材齢７日の脱型後に、エポキシ樹脂を用いてピンホールがないようにシールした。その後に基長を取り、20℃，ＲＨ60%の恒温恒湿養生室にてコンタクトゲージ法で長さ変化率を測定した。なお、有効部材厚 400mm の試験体のみ**図－１**に示すように試験体の端部および中央部の２箇所で、他の試験体は端部１箇所で長さ変化率を測定した。

表－４　試験項目および試験方法

試験項目	試　験　方　法
スランプ	JIS A 1101に従って測定。
空気量	JIS A 1128に従って測定。
圧縮強度	φ10×20cmの供試体を用いJIS A 1108 に従って測定。
ヤング係数	ｺﾝﾌﾟﾚｯｻﾒｰﾀにより圧縮強度試験時に測定。
乾燥収縮	JIS A 1129 のｺﾝﾀｸﾄｹﾞｰｼﾞ方法に準じて測定(N=3)。 温度＝20±3℃，湿度＝60±5%の恒温恒湿室で実施。

注）強度，ヤング係数試験の供試体は、標準水中養生を行った。

３．実験結果

３．１　コンクリートの試験結果

実験に使用したコンクリートのスランプ，空気量および強度試験結果を**表－５**に示す。ほぼ所定の目標値を有するコンクリートが得られた。圧縮強度およびヤング係数には、使用骨材種類の違いの影響がみられたが、単位水量の違いや混和剤の使用の影響はみられなかった。

表－５　スランプ，空気量および強度試験結果

試験体名	スランプ (cm)	圧縮強度(N/mm^2) 材齢1週	材齢4週	材齢26週	材齢52週
No.1	18.5	－	43.1	50.4	53.3
No.2	6.0	－	45.4	51.2	55.1
No.3	19.7	31.1	38.6	46.9	48.1
No.4	20.4	29.3	38.2	47.7	48.9
試験体名	**空気量 (%)**	**ヤング係数(×10^4 N/mm^2) 材齢1週**	**材齢4週**	**材齢26週**	**材齢52週**
No.1	5.0	－	3.37	3.65	3.74
No.2	4.5	－	3.68	3.76	3.88
No.3	5.0	3.41	3.60	4.03	3.99
No.4	1.4	3.93	3.86	4.31	4.28

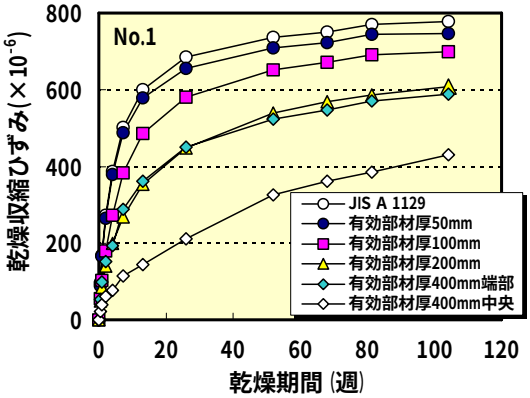
３．２　乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験結果を**図－２**に示す。調合 No.1 および No.2 において、JIS A 1129 に準じた試験結果と有効部材厚さ 50mm の試験結果に大きな違いはみられなかった。これらの実験結果によると、乾燥収縮量は No.1 で約 800×10^{-6}, No.2 で約 700×10^{-6}, No.3 で約 450×10^{-6}, No.4 で約 350×10^{-6} であり、コンクリートの調合と使用材料の組合せによって、$350\sim800\times10^{-6}$ の範囲の乾燥収縮量を有するコンクリートが得られた。

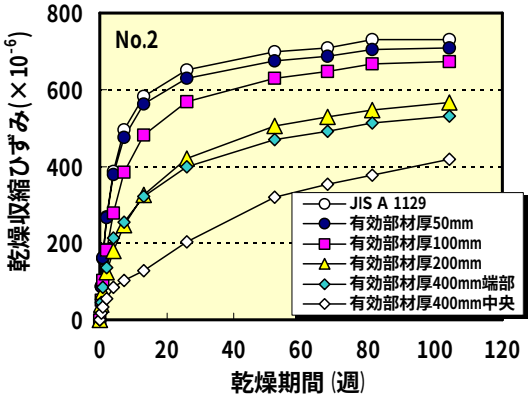
いずれの調合のコンクリートにおいても、有効部材厚さが厚くなるに従って乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示した。特に、有効部材厚さが 200～400mm 程度になると、乾燥収縮量はいずれの調合の場合も、有効部材厚さが 50mm の場合に比べてかなり小さくなる。また、乾燥期間 50 週以上になると、有効部材厚さが 50～100mm の場合には乾燥収縮がほぼ収束傾向を示すのに対して、有効部材厚さ 200～400mm の乾燥収縮量の増加率は、有効部材厚さ 50～100mm に比べて大きい傾向にあり、乾燥収縮量がまだ増大することが予想される。

３．３　質量変化率

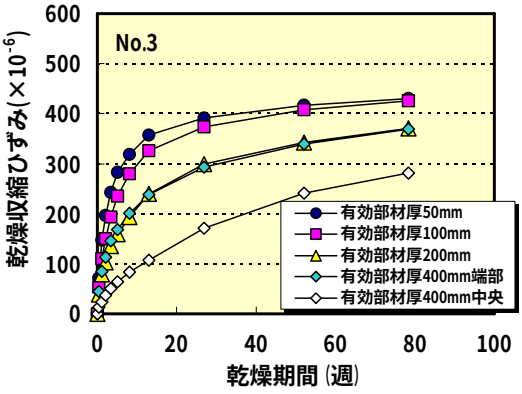
乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を**図－３**に示す。同一調合でも有効部材厚さによって質量減少率が異なった。このことから各有効部材厚さによる乾燥収縮量の違いは、質量減少率の違いによって生じたものと推測される。No.1～No.4 の調合によっても質量減少率に違いがみられた。特に、使用した骨材の種類が調合 No.1, No.2 と No.3, No.4 とで異なると質量減少率は、同じ有効部材厚さの場合でも異なった。



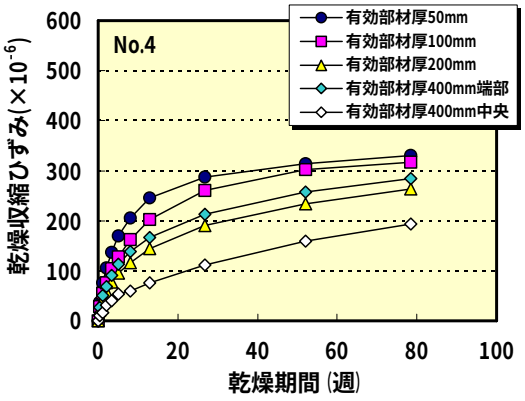
(1)調合 No.1 の場合



(2)調合 No.2 の場合

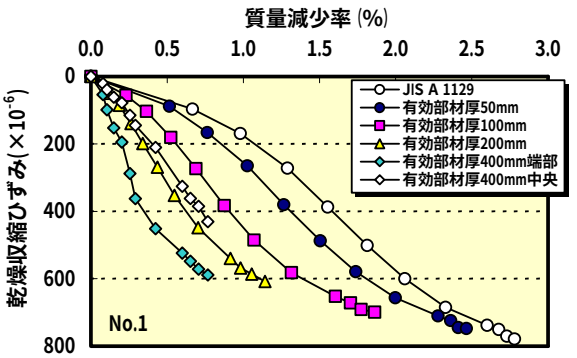


(3)調合 No.3 の場合

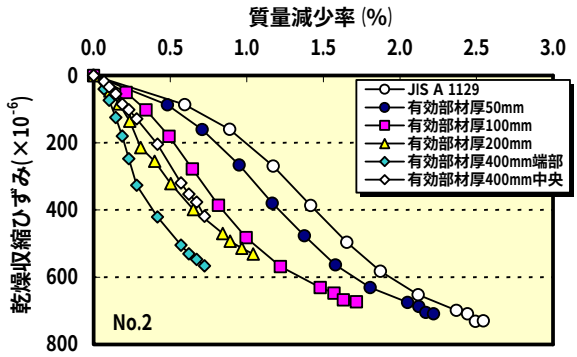


(4)調合 No.4 の場合

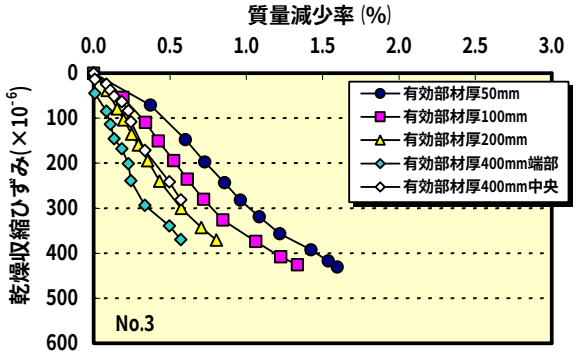
図－２　乾燥収縮試験結果



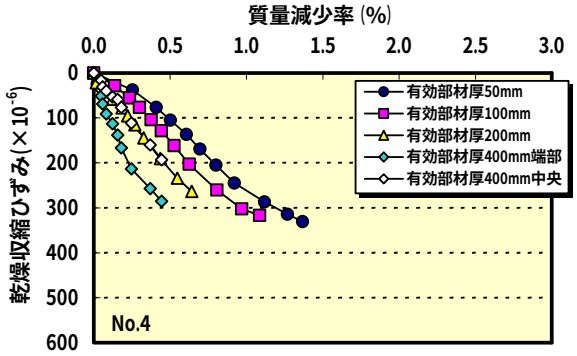
(1) 調合 No.1 の場合



(2) 調合 No.2 の場合



(3) 調合 No.3 の場合

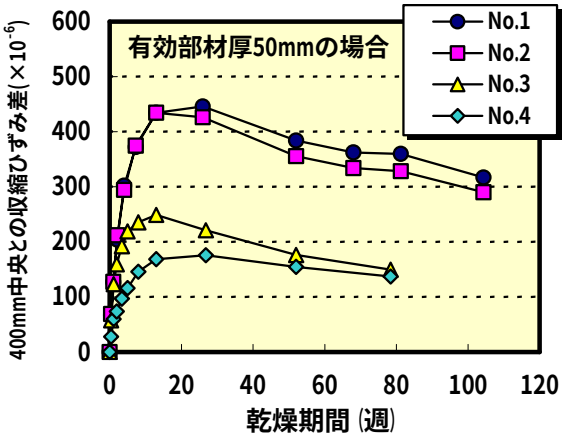


(4)調合 No.4 の場合

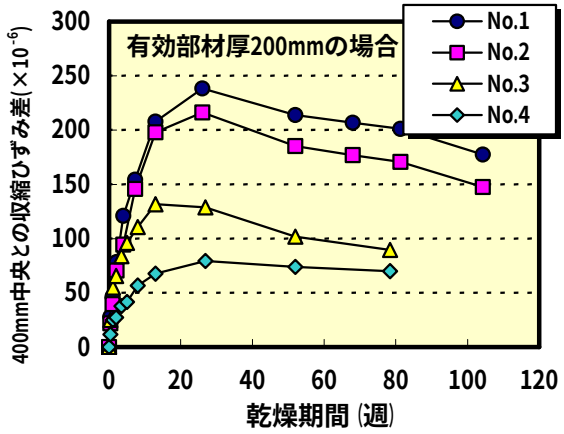
図－３　乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

３．４　各種部材厚さによる収縮量の差と比

有効部材厚 400mm に対する有効部材厚 50mm の場合の収縮量の差と，有効部材厚 400mm に対する有効部材厚 200mm の場合の収縮量の差を**図－４**に示す。乾燥収縮量が異なると部材厚さによる収縮量の差は異なる。このことから、使用材料や調合などによりコンクリートの乾燥収縮量を小さくすることで、引張応力発生の原因となる部材厚さによる乾燥収縮量の差を小さくすることができると考えられる。そして、乾燥期間の経過に従って、この乾燥収縮量の差はピークを示した後に、減少する傾向を示す。本実験値におけるこれらの傾向を、乾燥期間の経過に対して乾燥収縮量の差が一定値となる阪田らの式[1)]で表現するのは難しく、むしろ CEB/FIP-90 式[2～4)]や Rusch 式[2),5)]による方が表現しやすい。なお、この収縮量の差が CEB/FIP-90 式のよ



(1)有効部材厚 50mm の場合

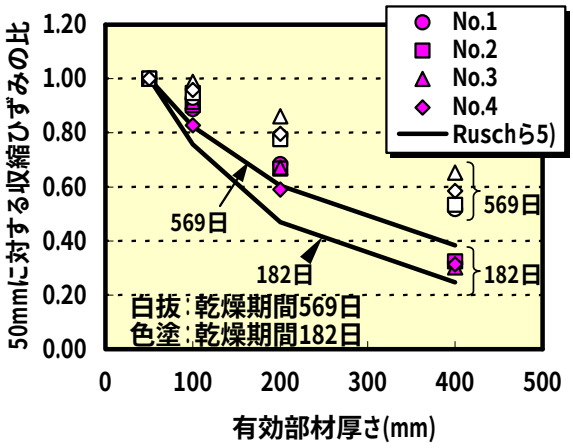


(2)有効部材厚 200mm の場合

図－４　有効部材厚 400mm 中央と各有効部材厚との乾燥収縮量の差

うに0に漸近するのか、Rusch 式のようにある値に収束するのかは現時点ではわからない。今後、乾燥収縮試験を継続して確認していく予定である。また、有効部材厚 400mm の端部と中央の収縮量の差については今後の検討課題である。

次に、有効部材厚 50mm 時の乾燥収縮量に対する各部材厚での収縮ひずみの比を**図－5**に示す。乾燥期間によって異なるものの、調合 No.1～No.4 のように乾燥収縮量が異なっても、収縮ひずみの比はほとんどかわらず、有効部材厚さによってほぼ一定値になるものとみなすことができる。これらのことから、JIS A 1129 によってコンクリートの乾燥収縮量が把握できれば、各有効部材厚さによる乾燥収縮量やその差を把握することができるものと考えられる。



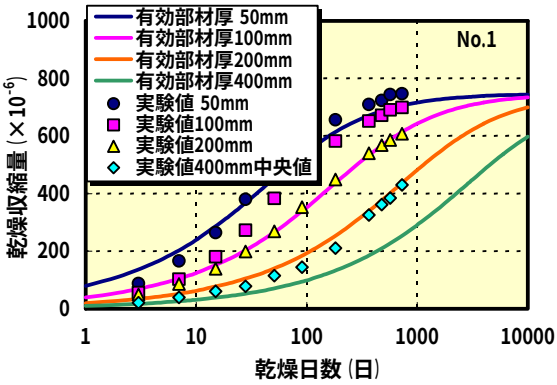
図－5　部材厚による収縮量の比

3．5　既往の各種予測式との比較

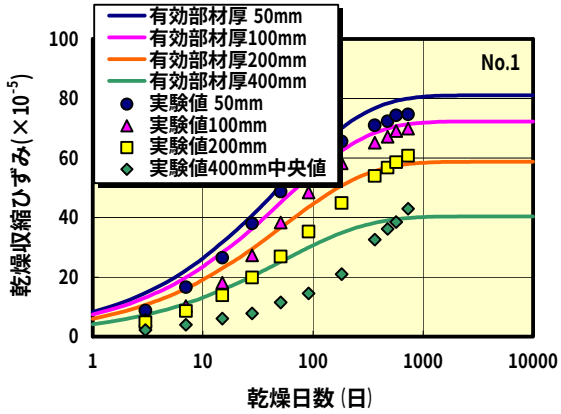
CEB/FIP-90 式と実験値の比較を**図－6**に示す。CEB/FIP-90 式では、コンクリートの種類の違いなどから、乾燥収縮量の収束値は日本国内のコンクリートの一般的な値に比べてかなり小さくなる。そこで、同式中の乾燥収縮の収束値 ε_{cs} を有効部材厚 50mm の乾燥収縮試験結果の収束値として同図に示した。同図によると、CEB/FIP-90 式は乾燥収縮実験値の推移と比較的良好に対応している。但し、各部材厚さにおける乾燥収縮量の絶対値との間には若干の差がみられ、乾燥収縮量を過小評価する傾向にある。

次に、阪田式と実験値の比較を**図－7**に示す。同図によると、今回の実験の範囲では、阪田式と乾燥収縮実験値の推移とは必ずしも良好に対応してはいない。しかしながら、乾燥日数 1000 日弱での各部材厚さにおける乾燥収縮量の絶対値と阪田式とは比較的良好に対応した。

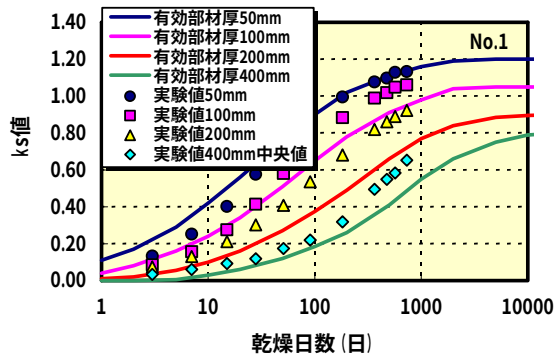
Rusch 式の ks 値と実験値の比較を**図－8**に示す。CEB/FIP-90 式と同様、乾燥日数と乾燥収縮



図－6　CEB/FIP-90 式と実験値の関係



図－7　阪田式と実験値の関係

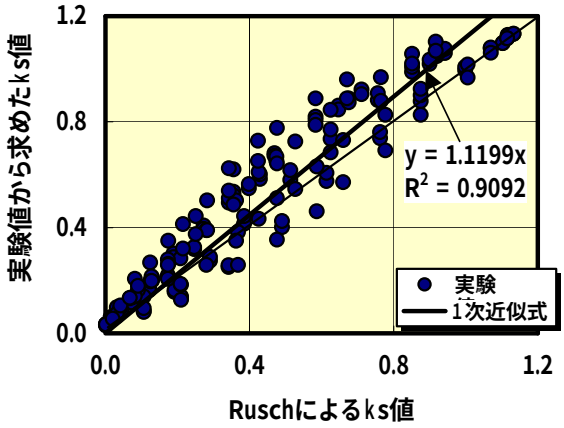


図－8　Rusch 式の ks 値と実験値の関係

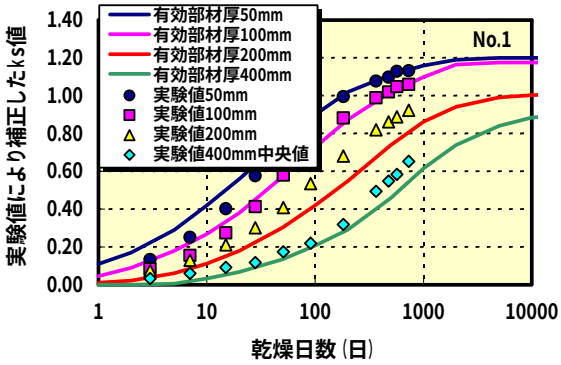
量実験値の推移の関係と良好に対応しており、各部材厚さにおける乾燥収縮量の絶対値ともCEB/FIP-90 式より比較的良好に対応している。

３．６　既往の予測式の補正

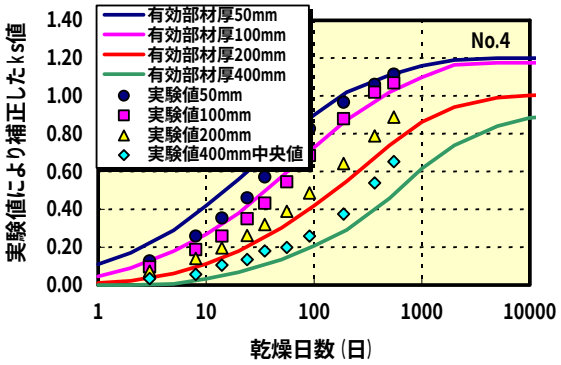
３．５に述べた各種既往の乾燥収縮予測式の特長と**図－５**に示した各種部材厚さと乾燥収縮ひずみの比との関係から、Rusch 式を補正することで、乾燥日数と各部材厚さごとの乾燥収縮量の本実験結果の関係を推定することを試みた。



図－９　Rusch 式の ks 値と実験値の比較



(1) 調合 No.1 の場合



(2)調合 No.4 の場合

図－10　補正した ks 値と実験値の関係

図－９は**図－８**に示したRusch式のks値と実験値の関係を示したものである。両者の関係を**図－９**に示すように１次近似することで、補正係数 1.12 を求めた。この補正係数を用いて補正した Rusch 式の ks 値と実験値の比較を**図－10** に示す。補正した ks 値は実験値と良好に対応しており、本実験結果による各部材厚さの乾燥収縮量を予測するのに有効であると考えられる。

４．まとめ

本研究によって得られた結果を以下に示す。

１）引張応力発生の原因となる各部材厚間の収縮量の差は、乾燥収縮量によって異なり、乾燥期間の経過に従って減少傾向を示す。

２）乾燥収縮量が異なっても、部材厚の違いによる収縮ひずみの比率はほとんどかわらない。

３）乾燥収縮量が異なるコンクリートの場合、部材厚による収縮量は補正した Rusch 式の ks 値で予測できる。

今後の課題

部材厚間の収縮量の差が０に漸近するか、ある値に収束するのか現時点ではわからないため、今後も乾燥収縮量の推移を観察する必要がある。

参考文献

１)阪田，綾野：コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.244-249，1989

２)コンクリートの調合設計指針・同解説，日本建築学会，pp.167-172，1999

３)CEB-FIP Model Code 1990，July 1991

４)プレストレストコンクリート設計施工規準・解説，日本建築学会，pp.114-118，1998

５)H.リュッシュ，D.ユンクビルト：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，鹿島出版会，百島祐信 訳，pp.117-118，1976.11