

論文 各種測定方法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの信頼性

松村 仁夫*1・黒井 登起雄*2・宮澤 伸吾*2

要旨：本研究は、JIS法の長さ変化測定方法におけるコンパレータ方法およびコンタクトゲージ方法（表面のひずみ）とダイヤルゲージ方法（全体のひずみ）の同一性を確認すること、および、再接続の繰り返し測定方法による埋め込みゲージの長期間の測定値の安定性を、ダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法との比較検証することを目的とした。その結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンタクトゲージ方法、コンパレータ方法およびダイヤルゲージ方法において若干の差異がある。埋め込みゲージは、8週以降のひずみが著しく大きくなるものもあり、長期間の使用の場合に注意が必要である。

キーワード：硬化コンクリート、乾燥収縮、コンタクトゲージ方法、ダイヤルゲージ方法、埋め込みゲージ

1. はじめに

JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) 第1部から3部は、2001年6月に制定された。モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法には、コンパレータ方法、コンタクトゲージ方法およびダイヤルゲージ方法の3つの方法がある。しかし、埋め込みゲージもコンクリートの早期から硬化コンクリートのひずみ測定と幅広く利用できることなどから自己収縮ひずみの測定などに使用されている。さらに、埋め込みゲージを用いたときの測定結果、特に長期データの信頼性に対する検証は、ほとんど行われていない。そこで、本研究では、乾燥環境におけるコンクリートの収縮ひずみ変化を実験供試体で測定し、コンパレータ方法、コンタクトゲージ方法およびダイヤルゲージ方法による測定値の同一性の検証をした。また、埋め込みゲージ（2銘柄）およびひずみゲージ（表面収縮）について、コンタクトゲージ方法およびダイヤルゲージ方法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定と比較・検証した。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画および実験要因

実験は、次に示すように、2つのシリーズに分けて行った。

- シリーズ 1；モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定における3種類の測定方法の検証
- シリーズ 2；埋め込みゲージの長期測定における信頼性の検証

実験要因は、シリーズ1の場合、測定方法と水セメント比とし、水準は、コンタクトゲージ方法、コンパレータ方法およびダイヤルゲージ方法の3種類の測定方法と、高強度領域から普通・低強度領域の広範囲なコンクリートの圧縮強度レベルに対応するために、W/C=35, 40, 50, 60 および 65%の5水準の水セメント比を組み合わせ

(表-1参照)。なお、コンクリートは、スランブ 10±1cm, 空気量 (5±1) %の AE コンクリートとした。また、モルタルの場合は、W/C=40, 50 および 60%の3水準とした (スランブフロー 210±10mm)。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質は、表-2に示すとおりである。シリーズ2の場合、実験要因は、2種類の埋め込みゲージ、メタルベースゲージ、コンタクトゲージ方法、およびダイヤルゲージ方法の5種類の測定方法と、W/C=40, 50 および 60%の3水準の水セメント比を組み合わせさせた (表-1参照)。コンクリートは、スランブ 10±1cm, 空気量 (5±1) %の AE コンクリートとした。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質は、表-3に示すとおりである。

2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm³) を使用した。細骨材は、粒度の良い鬼怒川産川砂 (密度：2.61～2.65g/cm³, 吸水率：2.16～2.25%, 粗粒率：2.72～2.89) を使用した。粗骨材は、品質の良い硬質砂岩砕石 (葛生町産, 最大寸法：20mm, 密度：2.58～2.66 g/cm³, 吸水率：0.54～0.94%, 粗粒率：6.73～6.86) を使用した。また、一部実験において、電気炉酸化スラグ砕石 (中部鋼板製砕石, 最大寸法：20mm, 密度：3.37g/cm³, 吸水率：3.30%, 粗粒率：6.53) も使用した。混和剤は、一般的な AE 減水剤, AE 剤を用いた。

2.3 実験方法

(1) モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定における3種類の測定方法の検証 (シリーズ1)

本実験では、ダイヤルゲージ方法、コンタクトゲージ方法およびコンパレータ方法の測定結果の信頼性を実験的に検証することを目的とした。モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験用供試体は、それぞれ 40×40×160mm (3連型枠) および 100×100×400mm の型枠を用いて、それぞれ3個の供試体を1組として作製した。

*1 足利工業大学 工学部都市環境工学科助手 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験要因と水準

種類/実験シリーズ	W/C(%)	実験水準など
(1) 3種類のコンクリートの長さ変化測定方法 (JIS 規定) の測定結果の信頼性	35, 40, 50 60, 65	コンタクトゲージ方法 (表面収縮) コンパレータ方法 (表面収縮) ダイヤルゲージ方法 (全体収縮)
(2) 埋め込みゲージの長期測定の信頼性	40, 50, 60	2種類の埋め込みゲージ (IGA, IGB) メタルベースゲージ方法 (MGA: 表面収縮) コンタクトゲージ方法 (表面収縮) ダイヤルゲージ方法 (全体収縮)

表-2 モルタルおよびコンクリートの配合 (シリーズ 1)

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュコンクリートの性質			
			W	C	S	G		AE 減水剤	AE 剤	スランブ [*] (cm)	空気量 (%)	
						CG	EFG					
普通コンクリート (RS+CG)	35	41.3	175	500	665	956	----	2.000	0.150			
	40	42.3	180	450	693	956	----	1.800	0.180			
	50	44.6	168	336	787	988	----	1.008	0.067	11.0	4.2	
	60	47.5	171	285	854	955	----	0.855	0.057	10.5	4.5	
	65	47.3	185	285	833	939	----	0.855	0.057	11.0	5.0	
スラグ [△] コンクリート (RS+EFG)	50	46.4	175	350	807	----	1200	1.050		9.5	4.2	
普通モルタル (RS)	40	1.0 [*]	364	910	910	----	----	-----		202 ^{**}	----	
	50	1.8 [*]	332	664	1196	----	----	-----		210 ^{**}	----	
	60	2.4 [*]	326	544	1308	----	----	-----		210 ^{**}	----	

* S/C を示す。 ** フロー(mm)を示す。 スランブ^{*}: 10±1cm, フロー値: 210±10mm, 空気量: (5±1)%

表-3 コンクリートの配合 (シリーズ 2)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュコンクリートの性質		
		W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤	スランブ [*] (cm)	空気量 (%)	
40	42.4	176	440	713	973	1.76	0.110	10.4	5.6	
50	44.4	165	330	801	1007	1.32	0.083	10.5	5.8	
60	46.4	160	267	867	1005	1.068	0.053	9.2	5.2	

スランブ^{*}: 10±1cm, 空気量(5±1)%

供試体は、材齢 7 日まで水中養生 (20±2℃) とし、基長は材齢 7 日で測定した。基長測定後の保存環境は、温度 20±2℃、湿度 (60±5) %RH の恒温室内とした。また、試験結果の確認のために、長さ変化試験と同時に、供試体の質量測定も実施した。乾燥による自由収縮ひず

み (長さ変化) は、保存期間 7 日, 14 日, 28 日, 3 ヶ月, 6 ヶ月および 1 年に測定した。なお、コンタクトゲージ方法の基長は、モルタルの場合に 100mm, コンクリートの場合に 300mm とした。また、圧縮強度試験は、材齢 28 日 (水中養生) に、モルタルの場合、JIS R 5201 で、コンクリートの場合、φ100×200mm の円筒型枠を用い



写真-1 埋め込みゲージの配置



写真-2 埋め込みゲージのひずみ測定

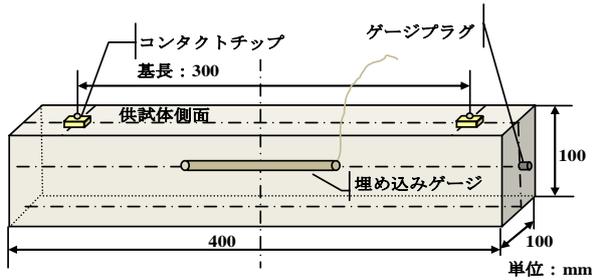


図-1 供試体の形状寸法およびゲージ等の配置

て JIS A 1108 に従って実施した。圧縮強度の結果は、3 個の供試体の平均値、標準偏差（または、変動係数）を算出して評価した。

(2) 埋め込みゲージの長期測定における信頼性の検証（シリーズ 2）

本実験では、埋め込みゲージ（IGA, IGB）およびメタルベースゲージ（表面収縮：MGA）の長期材齢における測定値の信頼性について、コンタクトゲージ方法およびダイヤルゲージ方法による測定値との比較によって実験的に検証することを目的とした。2 種類の埋め込みゲージは、供試体中心の長さ方向に埋設し（写真-1 参照）、乾燥による自由収縮ひずみの変形量は、データログを用いて（写真-2）、シリーズ 1 と同様に、保存期間 7 日、14 日、28 日、1 ヶ月、2 ヶ月 3 ヶ月、6 ヶ月および 1 年間で測定した。供試体の形状寸法および埋め込みゲージ、コンタクトチップおよびゲージプラグの配置は、図-1 に示すとおりとし、同一供試体で自由収縮ひずみの変形量が検証できるようにした。また、保存環境、基長の測定およびコンクリートの圧縮強度試験も、シリーズ 1 と同様に、管理、試験した。メタルベースゲージの基長の測定は、1 日延ばし、材齢 8 日とした。接着剤は、常温で 5~6 時間で硬化するが、供試体表面の接着の際の測定値の安定のために、基長測定を 1 日延ばした。

3. 測定方法の違いによる乾燥収縮ひずみの相関

3.1 コンクリートの圧縮強度および変動係数

図-2 は、シリーズ 1 の実験に用いたモルタルおよびコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度および変動係数の結果を示したものである。図-2 より、モルタルおよびコンクリートの圧縮強度は、モルタルの場合、40.0~60.3N/mm²、コンクリートの場合も、31.0~61.7N/mm²の普通・高強度の領域に分布している。また、圧縮強度の変動係数は、モルタルの場合、6~9%程度、コンクリートの場合、2~5%程度であり、健全なモルタルおよびコンクリートが対象になっていると考えられる。なお、スラグコンクリート（W/C=50%）の圧縮強度は、普通コンクリート（W/C=50%）の場合に比べ約 20%大きい傾向が認められる。以上より、本実験において対象にしたモルタルおよびコンクリートは、圧縮強度が広範囲に分布し、

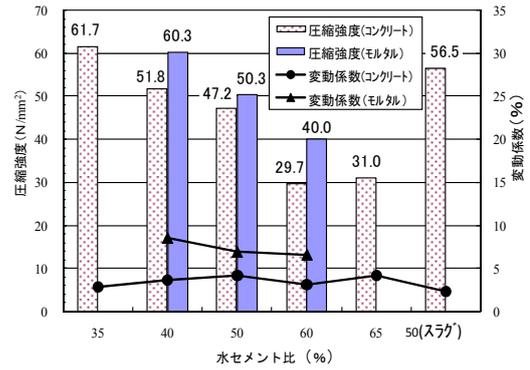


図-2 圧縮強度試験結果（材齢 28 日）

品質の良いものであることが確認できた。

3.2 コンタクトゲージ方法とダイヤルゲージ方法との相関^{1), 2)}

図-3 および図-4 は、モルタルおよびコンクリートにおけるコンタクトゲージ方法とダイヤルゲージ方法の測定方法の違いによる乾燥収縮ひずみの相関を示したものである。図-3 より、モルタルの乾燥による収縮ひず

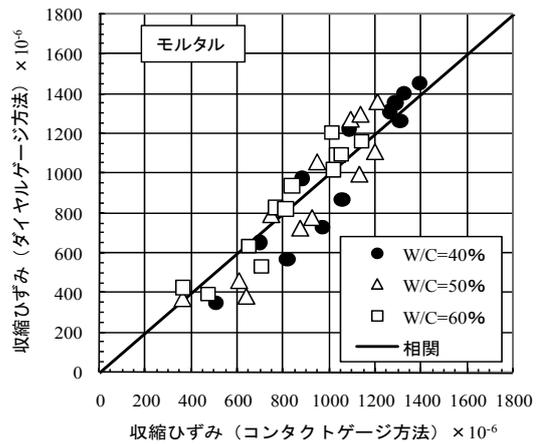


図-3 コンタクトゲージ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関（モルタル）

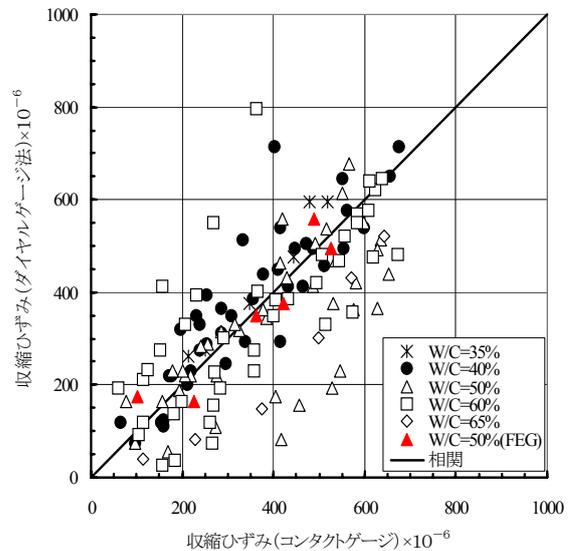


図-4 コンタクトゲージ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関（コンクリート）

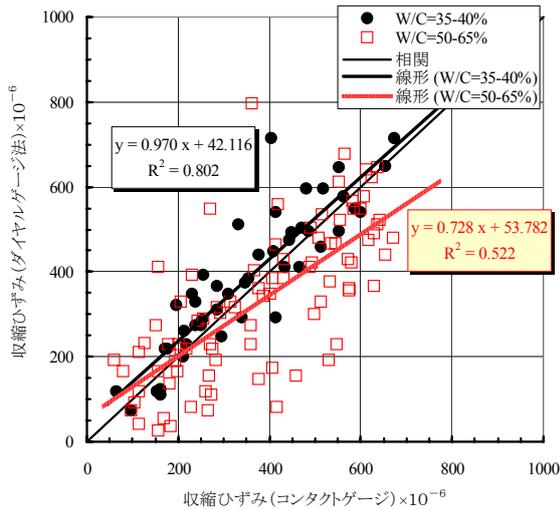


図-5 コンタクトゲージ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関（コンクリート）

みは、ダイヤルゲージ方法とコンタクトゲージ方法とも、水セメント比に関係なく同じ傾向が認められる。詳細に観察すると8週までのコンタクトゲージ方法の乾燥による収縮ひずみは、ダイヤルゲージ方法に比べ100~200 μ 程度大きくなる傾向にあるが、乾燥材齢13週以降においては、収縮ひずみの差が小さくなる傾向がある。また、図-4および図-5より、コンクリートの収縮ひずみの測定方法による相関は、水セメントによって若干の違いが認められた（データ個数；n=141）。すなわち、W/C=40%以下のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、ダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法ともに、同じ傾向が認められる。しかし、W/C=50%程度以上のコンクリートになると、コンタクトゲージ方法による乾燥収縮ひずみ（表面の収縮）は、ダイヤルゲージ方法（中心部分の収縮）の場合より100~250 μ 大きくなる傾向が認められる。その差異も、W/C=50%から65%と大きくなるに従って大きくなるようである。これは、コンクリート表面の水分の乾燥速度が供試体中心部分より大きく、中心部分と時間差があるためと考えられる。

3.3 ダイヤルゲージ方法とコンパレータ方法の相関^{1),2)}

図-6および図-7は、モルタルおよびコンクリートのダイヤルゲージ方法とコンパレータ方法との測定方法の違いによる乾燥収縮ひずみの相関を示したものである。図-6より、モルタル供試体の場合、コンパレータ方法の乾燥収縮ひずみは、ダイヤルゲージ方法に比べ、乾燥材齢8週までは100~400 μ 小さくなる傾向にあり、コンタクトゲージ方法（図-3）とは相違が認められる。しかし、乾燥材齢13週以降においては、コンタクトゲージ方法と同様（W/C=40%を除く）に、ダイヤルゲージ方法と同程度になる傾向が認められる。また、図-7より、コンクリートの場合のコンパレータ方法（表面の収縮）による乾燥収縮ひずみも、コンタクトゲージ方法と同様に、ダ

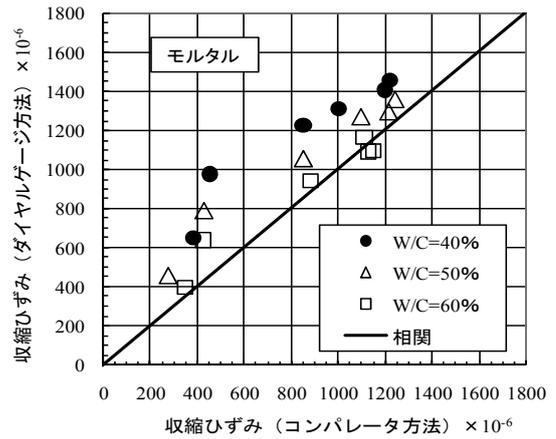


図-6 コンパレータ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関（モルタル）

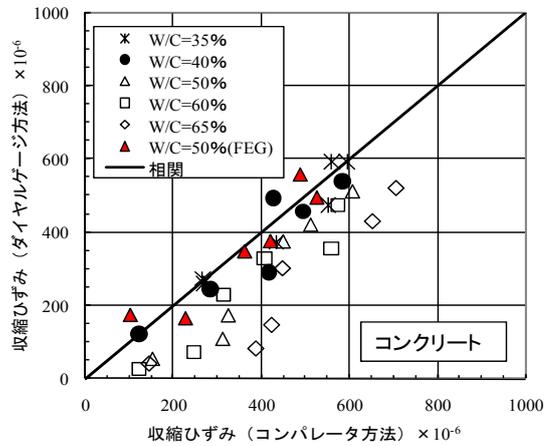


図-7 コンパレータ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関（コンクリート）

イヤルゲージ方法（中心部分の収縮）より若干大きくなる傾向がある。とくに、コンパレータ方法による収縮ひずみは、W/C=50%以上になるとダイヤルゲージ方法の値より大きくなる傾向がある。以上のように、断面が大きいコンクリートの場合や、水セメント比が大きい場合に、ダイヤルゲージ方法（中心部分の収縮）よりもコンパレータ方法およびコンタクトゲージ方法によるひずみ（表面の収縮）の方が大きくなる。既往の研究では、ダイヤルゲージ方法の乾燥収縮ひずみがホイットモアゲージ方法（コンタクトゲージ方法と同様の表面測定）に比べて大きくなるとの報告もある（W/C=60%のコンクリート³⁾）。これは、水セメント比の大きいコンクリートの場合に、収縮ひずみのバラツキが大きくなることに起因しているものと思われる。

3.4 コンタクトゲージ方法とコンパレータ方法の相関

コンタクトゲージ方法とコンパレータ方法（表面の収縮）の測定方法の違いによる乾燥収縮ひずみは、モルタルおよびコンクリートともに、同じ程度の大きさになる（図-3、図-4、図-6、図-7参照）。また、コンタクトゲ

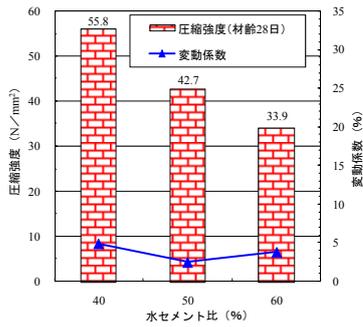


図-8 圧縮強度試験結果(材齢28日)

一ジ方法による場合の供試体の相対する面の収縮ひずみの差異 (A 面と B 面のひずみ差) は, W/C=50~60% 以上のコンクリートの場合, $\pm 50\mu$ 程度の範囲で大きくないが, モルタルおよび W/C が小さいコンクリート (W/C=50%以下) において $\pm 50\mu$ を超える傾向が認められる。これは, 供試体の保存方法などの影響を受け易いことを示唆している。

4. 長期間測定における埋め込みゲージの信頼性

4.1 コンクリートの圧縮強度

図-8 は, シリーズ 2 の実験に用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度および変動係数の結果を示したものである。図-8 より, コンクリートの圧縮強度は, $33.9\sim 55.8\text{N/mm}^2$ の範囲であり, また, 変動係数も 5% 以下であり, 健全で, 品質の良いコンクリートになっている。したがって, 本実験において対象にしたコンクリートも, 広範囲な圧縮強度で, 十分に健全なものであることが確認できた。

4.2 ダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法と埋め込みゲージ方法との相関^{1), 2)}

図-9 および図-10 は, 国産 2 種類の埋め込みゲージ方法による収縮ひずみとダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法による収縮ひずみの相関をそれぞれ示したものである。図-9 より, 埋め込みゲージ方法とダイヤルゲージ方法の収縮ひずみは, 乾燥材齢 4 週程度まで, 大きな差異が認められない。また, 再接続の繰り返しによって測定した埋め込みゲージ方法の乾燥収縮ひずみの経時変化は, ダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法のひずみの経時変化と比較しても連続的な変化を表し, 収縮ひずみの差異も小さいようである。しかし, 乾燥材齢 8 週以降になると, 埋め込みゲージ方法による収縮ひずみは $100\sim 200\mu$ 程度大きくなり W/C の増大とともに大きくなる傾向が認められる。とくに, 埋め込みゲージ IGB の収縮ひずみは, 乾燥材齢 24 週以降になるとダイヤルゲージ方法の値より著しく大きくなる。この傾向は, 図-10 のコンタクトゲージ方法との収縮ひずみの相関においても同様である。

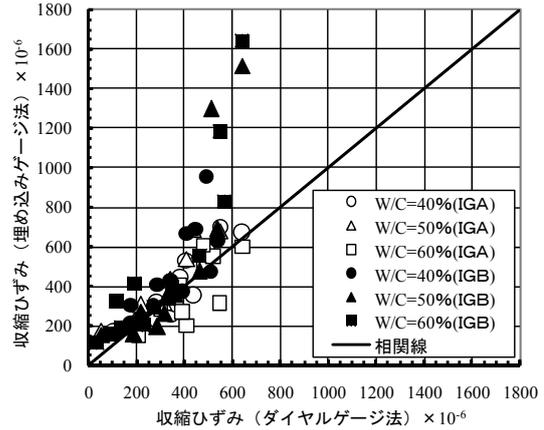


図-9 ダイヤルゲージ方法と埋め込みゲージ方法との収縮ひずみの相関

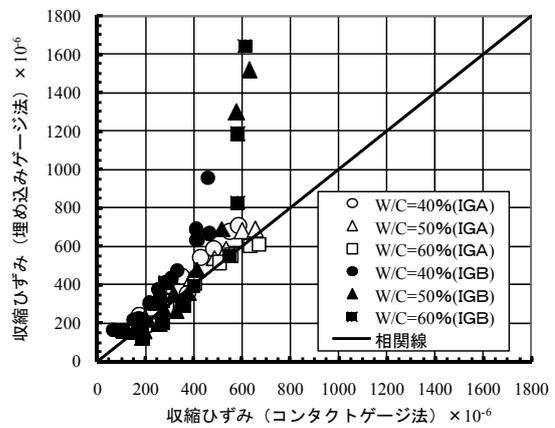


図-10 コンタクトゲージ方法と埋め込みゲージ方法との収縮ひずみの相関

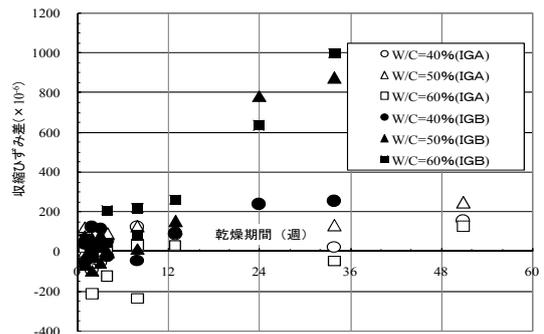


図-11 埋め込みゲージ方法の乾燥による収縮ひずみ差の長期経時変化 (ダイヤルゲージとの差)

4.3 埋め込みゲージ方法と他の測定方法と収縮ひずみ差

図-11 および図-12 は, 埋め込みゲージ方法に対するダイヤルゲージ方法およびコンタクトゲージ方法との収縮ひずみ差の長期間の経時変化を示したものである。図-11 および図-12 より, 乾燥材齢 4 週までの埋め込みゲージによるコンクリートの収縮ひずみ差は, $\pm 100\mu$ 程度 (コンタクトゲージ方法の W/C=60%を除く) であり,

比較的小さい。しかし、乾燥材齢 8 週以降のひずみ差は、 $-100\sim 250\mu$ 程度にもなる。とくに、埋め込みゲージ KEG の場合は、24 週以降になると著しく、 $300\sim 1000\mu$ 程度も大きくなる。この原因は、コンクリート中の水分のアルカリ環境に長期間置かれるために、埋め込みゲージの接着剤が劣化することとされている。このように、埋め込みゲージの場合、長期間測定における信頼性が損なわれる可能性があるため、注意する必要がある。

4.4 貼り付け型のメタルベースひずみゲージの信頼性

図-13 は、ダイヤルゲージ方法、コンタクトゲージ方法およびメタルベースゲージ方法（表面収縮貼り付けゲージ；MGA）によるコンクリートの収縮ひずみの相関を示したものである。図-13 より、ダイヤルゲージ方法とコンタクトゲージ方法およびメタルベースゲージ方法の収縮ひずみは、乾燥材齢 4 週までダイヤルゲージ方法比 $\pm 50\mu$ 程度の差異で、ほぼ同等であると考えられる（W/C=60%を除く）。また、コンタクトゲージ方法およびメタルベースゲージ方法の A 面と B 面の収縮ひずみの差は、 $-28\sim +14\mu$ の範囲であり、ほとんど差異がなかった。しかし、メタルベースゲージ方法の収縮ひずみの信頼性については、今後、長期間測定（6 ヶ月または 1 ヶ年）を継続し、判断する必要がある。

5. まとめ

本研究は、3 種類の測定方法（JIS 規定）の違いによる自由乾燥収縮ひずみの同一性および埋め込みゲージの長期材齢における信頼性を実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) コンタクトゲージ方法とコンパレータ方法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみ（表面の収縮）は、ダイヤルゲージ方法による収縮ひずみ（中心部分の収縮）よりも、断面が大きいコンクリートの場合や、水セメント比が大きい場合に大きくなる。
- (2) コンタクトゲージ方法およびコンパレータ方法とダイヤルゲージ方法の収縮ひずみ差は、W/C=50%、60%、65%と大きくなるにしたがって大きくなるようである。この原因は、収縮ひずみのバラツキが大きくなることもその一つと考えられる。
- (3) 再接続の繰り返しによって測定した埋め込みゲージ方法とダイヤルゲージ方法の収縮ひずみは、乾燥材齢 4 週程度まで、大きな差異が認められない。また、埋め込みゲージ方法の乾燥収縮ひずみの経時変化は連続的な収縮ひずみを示すことが認められる。
- (4) 埋め込みゲージ方法の乾燥材齢 8 週以降のひずみ差

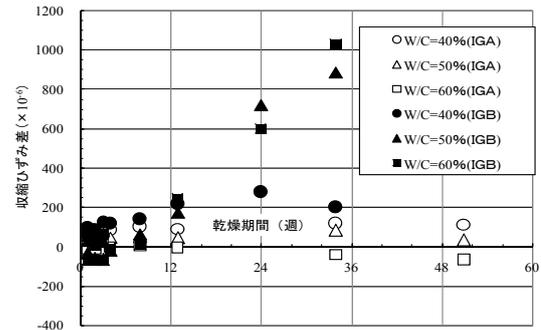


図-12 埋め込みゲージ方法の乾燥による収縮ひずみ差の長期経時変化（コンタクトゲージとの差）

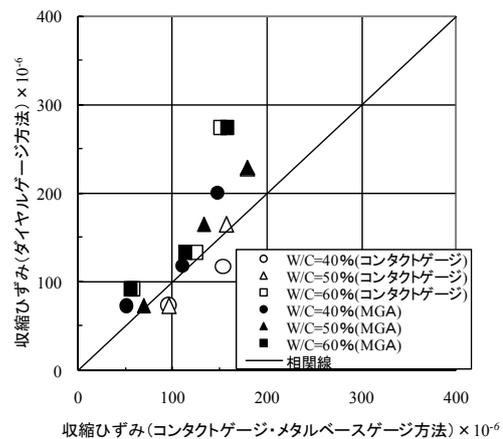


図-13 メタルベースゲージ方法とダイヤルゲージ方法との収縮ひずみの相関

- は、大きくなり、とくに 24 週以降になると $300\sim 1000\mu$ も大きくなるものもある。したがって、埋め込みゲージの場合長期間測定における信頼性が損なわれる可能性もあるので、注意する必要がある。
- (5) メタルベースゲージ方法の収縮ひずみは、乾燥材齢 4 週までダイヤルゲージ方法とほぼ同等であるがその収縮ひずみの長期間測定（6 ヶ月または 1 ヶ年）の信頼性は、今後、さらに継続測定が必要である。

参考文献

- 1) 松村・黒井・池；測定方法の違いがコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみに及ぼす影響，土木学会第 61 回年次学術講演会，2006.9
- 2) 松村・黒井・宮澤；コンクリートの長さ変化試験における測定値の信頼性に関する実験検証，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008.9
- 3) （社）セメント協会耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告；コンクリートの乾燥収縮率測定方法の検討，1990.10