

論文 脱型時期がコンクリートの品質に及ぼす影響

佐藤 幸恵^{*1}・丸山 一平^{*2}・榎田 佳寛^{*3}

要旨： 混和材や低発熱系セメントを使用したコンクリートは、水和速度が普通ポルトランドセメントよりも遅いため、脱型時期によっては水分蒸散による水和不足を引き起こすことが想定され、かぶりコンクリートの品質に影響をもたらすものと考えられる。本研究では、脱型時期が強度や収縮に及ぼす影響を把握するため、結合材と化学混和剤、脱型時期をパラメータとした実験的検討を行った。その結果、中庸熱セメントや高炉セメントでは、材齢3日より早い脱型は、標準供試体に対して大きな強度低下を起こし、7日脱型であっても、若干の強度低下が起こることが認められた。

キーワード： 強度発現, 湿潤養生条件, 高炉スラグ微粉末, 中庸熱ポルトランドセメント

1. はじめに

近年、地球環境問題の観点から高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの産業副産物をコンクリートへ有効利用することの重要性がますます高まりつつある。また、マスコンクリートや高強度コンクリートには低発熱系のセメントを用いることが多く、最近では建築分野における中庸熱ポルトランドセメントの使用量が増加している。コンクリートの組織形成や強度発現は、養生中の温度や水分の条件の影響を受けるが、産業副産物や中庸熱ポルトランドセメント等の水和反応速度が普通ポルトランドセメントと比較して遅いセメント系材料は、長期間の湿潤養生が重要であるとされ、普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントに比べて早期脱型の影響を受けやすい。しかし、養生方法や養生期間に関して、実際の建築物のコンクリート工事に適用できるような定量的な知見は不足しており、せき板脱型時期やその後の養生方法とコンクリート

の組織形成、強度発現、耐久性の関係は明らかになっていない。

本研究は、普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末などの産業副産物を用いるコンクリートの湿潤養生条件や型枠脱型時期を変えた場合のコンクリートの組織形成、強度発現性および乾燥収縮試験について実験を行い、養生条件がコンクリートの品質に及ぼす影響評価を目的とした。

表－1 実験の要因と水準

要因	水準	
	シリーズI	シリーズII
セメント種類	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント 中庸熱ポルトランドセメント
混和材種類	-	高炉スラグ微粉末
水結合材比	55%	55%
BS添加率	-	42.5%
混和剤種類	AE減水剤+AE剤 高性能AE減水剤	AE減水剤+AE剤(銘柄A,B, C)
養生条件	標準水中(W), 封かん(S), 気中養生(材齢1, 3, 7日脱型)	
材齢	3, 7, 28, 91日	7,28,91日
供試体寸法	φ10×20cm	圧縮強度用: φ10×20cm
		乾燥収縮試験用: 10×10×40cm

*1 東京理科大学 理工学部土木工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

表－１に、実験の要因と水準を示す。

シリーズⅠでは、結合材を普通ポルトランドセメント 1 種類とし、混和剤無し、AE 減水剤および高性能 AE 減水剤の混和剤を使用し、各化学混和剤の特性と脱型時期が強度発現、ヤング係数、質量変化および割裂引張強度に及ぼす影響について検討を行った。シリーズⅡでは、結合材種類を普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 42.5%置換した 3 種類の結合材に、銘柄の異なる AE 減水剤をそれぞれ 3 銘柄用いて強度発現、質量変化、乾燥収縮を測定し、銘柄による特性および相性についても検討対象とした。なお、乾燥収縮試験は、コンタクトゲージ法（JISA1129-2）で行った。

脱型時期はいずれも 1 日、3 日、7 日および 28 日とし、供試体は打込み後、材齢 1 日から養生室内で養生を開始した。養生室の環境は、養生期間中の平均養生温度が 18.6℃、平均養生湿度が 67.9%RH であった。

表－２に使用材料の品質を示す。

表－２ 使用材料の品質

セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
混和材	中庸熱ポルトランドセメント 密度3.21g/cm ³ 高炉スラグ微粉末 密度2.90g/cm ³
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度2.58g/cm ³ 吸水率1.81%, F.M. 2.41
粗骨材	山梨産碎石 表乾密度 2.71g/cm ³ 実積率 58.8%, F.M. 6.73
混和剤	シリーズⅠ AE剤(アルキルエーテル系) AE減水剤(リグニンスルホン酸系) 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系) シリーズⅡ AE剤(樹脂酸塩系, アニオン系, アルキルエーテル系) AE減水剤(リグニンスルホン酸とオキシカルボン酸塩, ヒドロキシ系複合体とリグニンスルホン酸誘導体, リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体)

3. 実験結果及び考察

3.1 計画調合およびフレッシュ試験

表－３に計画調合とフレッシュ性状の試験結果を示す。混和剤の使用量は、目標空気量の範囲になるように銘柄ごとに調整した。また、混和剤を用いないプレーンコンクリートの場合は、計画調合で目標空気量を 1%とし、AE コンクリートの調合をベースに、容積比が同一になるように調合を定めた。

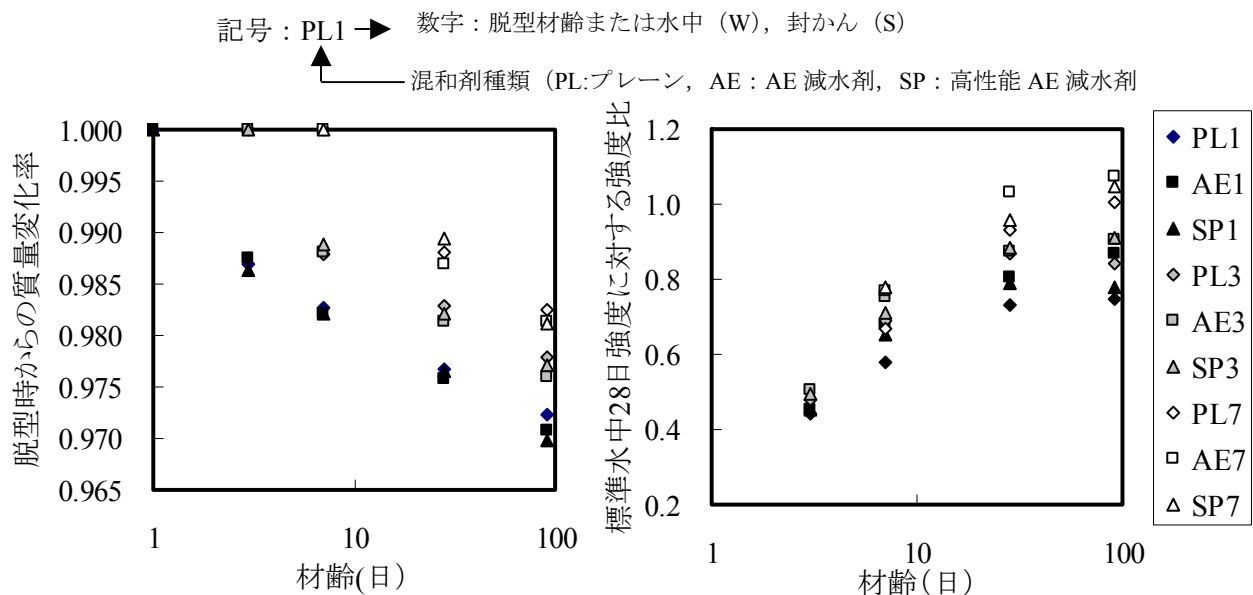
3.2 強度発現性状

(1) シリーズⅠ

図－１に材齢と各脱型時からの質量変化率の関係を示す。図より、脱型時期が早いほど、質

表－３ 計画調合とフレッシュ性状

シリーズ	セメント種類	水セメント比 (%)	記号	細骨材率 (S/a)%	単位水量	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	質量(kg/m ³)				化学混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
							セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材	Adl			
シリーズⅠ	OPC	55	PL	42.8	190	0.66	345	-	763	1072	0	2.6	1.1	14.0
	OPC	55	AE	42.8	183	0.64	333	-	736	1034	C*0.25%	14.7	6.3	13.0
	OPC	55	SP	42.8	183	0.64	333	-	736	1034	C*0.50%	14.4	4.2	13.3
シリーズⅡ	OPC	55	NP	41.0	185	0.64	336	-	740	1127	0	11.8	1.5	21.0
	OPC	55	NA	41.0	178	0.64	324	-	713	1087	C*1.00%	20.6	4.5	20.5
	OPC	55	NB	41.0	178	0.64	324	-	713	1087	C*0.25%	20.0	3.6	20.6
	OPC	55	NC	41.0	178	0.64	324	-	713	1087	C*0.25%	20.0	4.4	20.1
	M	55	MP	41.1	185	0.64	336	-	744	1122	0	8.5	1.5	16.5
	M	55	MA	41.1	178	0.64	324	-	717	1083	C*1.00%	20.3	6.0	17.0
	M	55	MB	41.1	178	0.64	324	-	717	1083	C*0.25%	19.5	4.1	17.0
	M	55	MC	41.1	178	0.64	324	-	717	1083	C*0.25%	19.3	5.7	17.0
	BB	55	BP	41.9	182	0.63	190	141	754	1105	0	8.7	1.6	16.0
	BB	55	BA	41.9	176	0.63	184	136	727	1066	C*1.00%	18.7	4.5	15.5
	BB	55	BB	41.9	176	0.63	184	136	727	1066	C*0.25%	7.4	4.7	15.0
	BB	55	BC	41.9	176	0.63	184	136	727	1066	C*0.25%	9.4	5.9	15.0



図－１ 材齢と質量変化率の関係

図－２ 材齢と標準水中 28 日強度に対する強度比

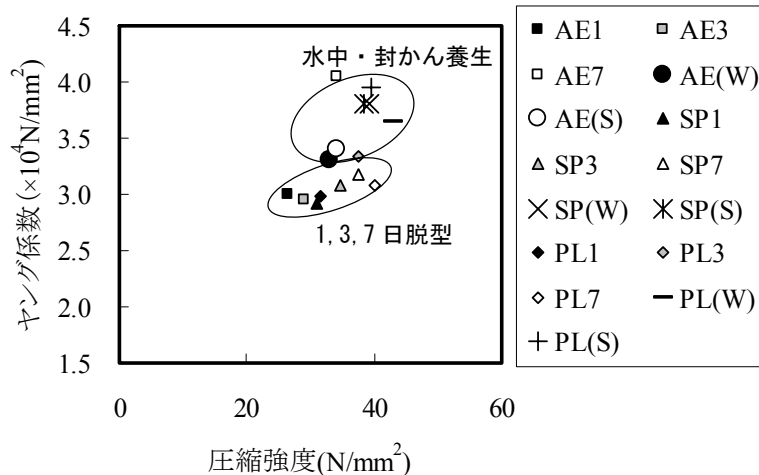
表－４ 圧縮強度結果（シリーズ I）

材齢 (日)	PL1	PL3	PL7	PL(W)	PL(S)	AE1	AE3	AE7	AE(W)	AE(S)	SP1	SP3	SP7	SP(W)	SP(S)
3	19.1	20.7				14.9	16.7				17.9	19.5			
7	24.9	29.6	28.9			22.4	24.9	25.5			25.7	28.0	30.7		
28	31.5	37.4	40.2	43.1	39.6	26.6	28.9	34.2	33.1	34.2	31.0	34.8	37.7	39.4	38.3
91	32.1	36.2	43.4	53.9	42.0	28.7	30.0	35.5	42.1	41.0	30.6	35.8	41.3	48.3	42.3

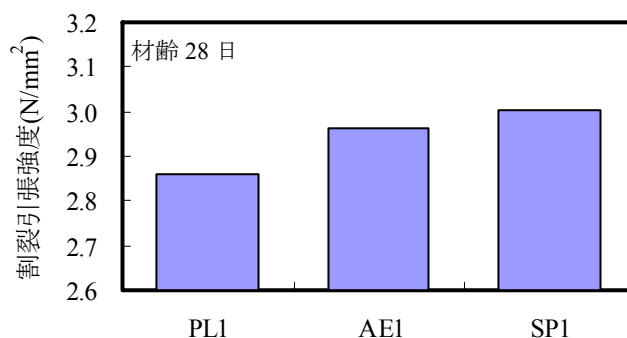
量変化率は大きいことがわかる。また、混和剤の有無で比較すると、混和剤を使用した方が質量変化が大きい傾向にあり、初期乾燥による水分の逸散によってコンクリートの品質が影響を受けやすくなることを示唆している。

図－２に材齢と各調合の標準養生 28 日強度に対する強度比の関係を示す。また、表－４に圧縮強度試験結果の一覧を示す。

これらの結果より、混和剤を使用した場合は、水分逸散量が多いにもかかわらず標準水中養生強度に対する強度比が高くなる傾向にあった。混和剤を使用した場合には、AE 減水剤や高性能 AE 減水剤のセメント粒子の分散効果などによってプレーンの場合よりも水和反応が良好に進行



図－３ 圧縮強度とヤング係数の関係



図－４ 割裂引張強度の関係（1 日脱型）

し、質量減少に対して強度発現がそれほど停滞しなかったと考えられる。

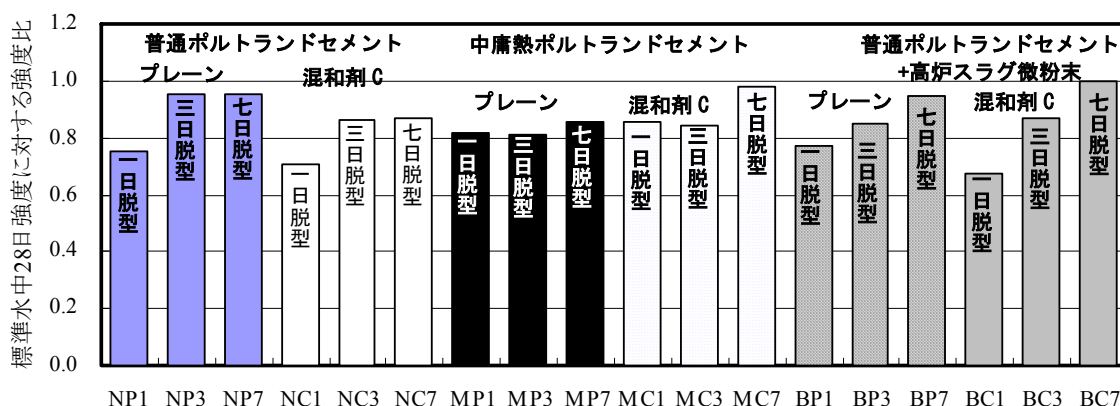
図－3に、材齢28日における圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図より、圧縮強度が高い方がヤング係数も大きい傾向にあるが、同程度の圧縮強度に対しては、湿潤養生期間の長期化に従いヤング係数が大きく、また、AE減水剤を使用した場合においてヤング係数が高くなる傾向があった。

図－4に割裂引張試験の結果を示す。材齢1日で脱型した場合の材齢28日割裂引張強度は、圧縮強度に対する強度比ではプレーンで0.091（約1/11）、AE減水剤で0.111（約1/9）、高性能AE減水剤で0.097（約1/10）となった。

(2) シリーズII

図－5に、各結合材のプレーンとAE減水剤銘柄Cの場合の材齢28日における水中養生強度に対する強度比を示す。表－5に強度比の一覧を示す。記号A,B,Cは使用した混和剤の銘柄を意

味し、Aはリグニンスルホン酸とオキシカルボン酸塩を主成分とするAE減水剤および樹脂酸塩系AE剤、Bはヒドロキシ系複合体とリグニンスルホン酸誘導体を主成分とするAE減水剤およびアニオン系AE剤、Cはリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とするAE減水剤およびアルキルエーテル系AE剤とした。普通ポルトランドセメントを用いた場合は、材齢3日と材齢7日に脱型した場合の強度発現にはほとんど差がなかった。中庸熱ポルトランドセメントの場合は、プレーンでは脱型時期による強度比に大差がなかったが、混和剤を使用した場合、3日脱型と7日脱型に差が生じており、材齢3日以前の初期の脱型は強度増進に影響を与えられられる。なお、これは、表－5より、混和剤の銘柄に関係なく、同様の傾向が見られる。また、高炉スラグ微粉末を使用した場合の強度発現は、脱型時期1日、3日、7日においてそれぞれ差が生じており、高炉スラ



図－5 標準水中28日強度に対する強度比（材齢28日）

表－5 標準水中28日強度に対する強度比

材齢	NP1	NA1	NB1	NC1	NP3	NA3	NB3	NC3	NP7	NA7	NB7	NC7
7	0.64	0.65	0.68	0.51	0.72	0.77	0.79	0.67	0.68	0.73	0.78	0.71
28	0.75	0.88	0.87	0.71	0.95	1.01	1.03	0.87	0.95	1.04	1.06	0.87
91	0.90	0.89	1.00	0.77	0.99	1.04	1.04	0.90	0.96	1.09	1.06	0.92
材齢	MP1	MA1	MB1	MC1	MP3	MA3	MB3	MC3	MP7	MA7	MB7	MC7
7	0.52	0.52	0.52	0.52	0.54	0.57	0.56	0.50	0.48	0.55	0.57	0.55
28	0.82	0.87	0.81	0.86	0.81	0.86	0.91	0.84	0.86	0.96	0.96	0.98
材齢	BP1	BA1	BB1	BC1	BP3	BA3	BB3	BC3	BP7	BA7	BB7	BC7
7	0.54	0.56	0.49	0.62	0.61	0.58	0.58	0.65	0.63	0.64	0.57	0.69
28	0.77	0.70	0.75	0.68	0.85	0.93	0.82	0.87	0.95	0.97	0.97	1.00

記号：NP1 → 数字：脱型材齢または水中（W），封かん（S）

結合材種類：普通ポルトランドセメント（N），
中庸熱ポルトランドセメント（M），
高炉スラグ微粉末使用（B）

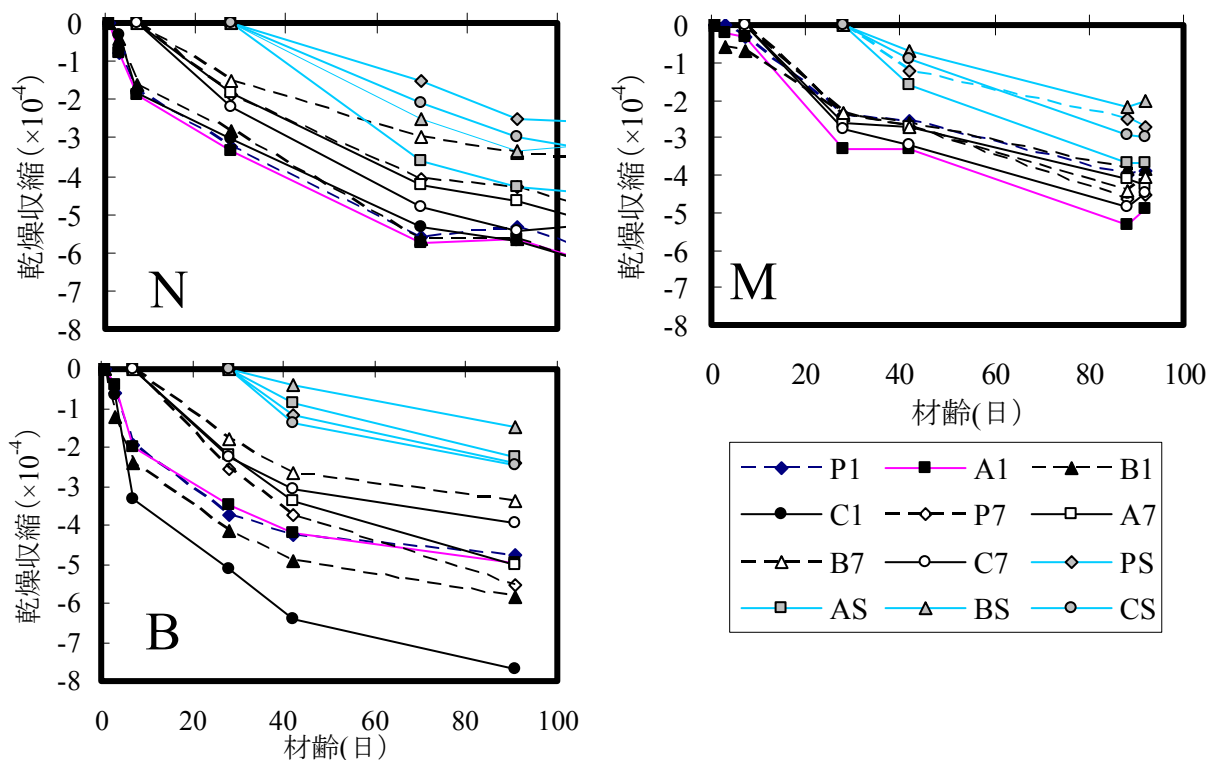
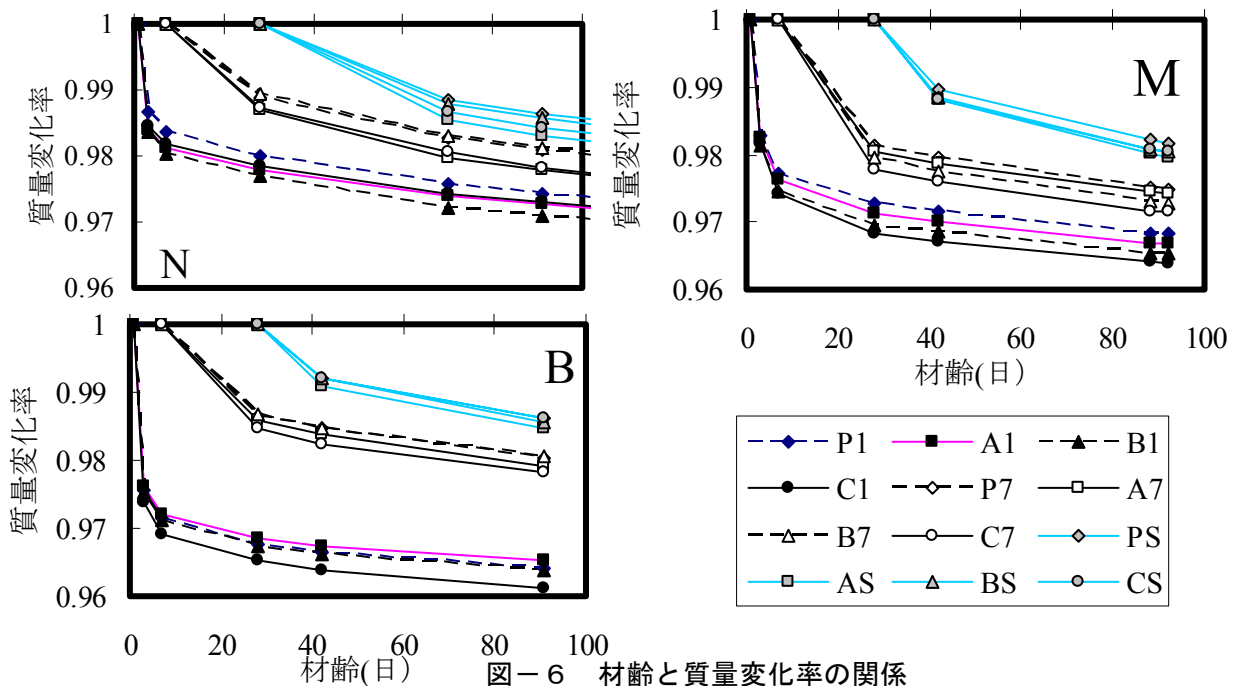
混和剤種類：プレーン（P），AE減水剤（銘柄A,B,C）

グ微粉末に関しては、養生期間を長くするほど良好な強度発現性が得られることがわかる。

シリーズ I, II の結果を検討した結果、化学混和剤を使用した場合には、水分逸散量は多くなるが、強度発現性状が大きく異なるという傾向は見受けられなかった。このことから、乾燥の影響を考慮する場合にもコンクリートの品質を圧縮強度で判定する方法は妥当であるといえる。

しかし、使用する混和剤や混和材、脱型時期の違いにより水分逸散量が異なることから、同程度の圧縮強度でも、かぶり部分のような表層部のコンクリート組織中の細孔が乾燥により水で満たされている場合とそうでない場合が生じ、物質浸透などに影響を及ぼすことが考えられる。

既往の研究では、水セメント比 40~60% のコンクリートでは、5 c m 程度の深さまで乾燥の影



響を受けるとの報告がある¹⁾ことなどを考慮すると、適切な養生期間の設定は、耐久性能を考慮した上で行うことが望ましいと考えられる。これらの影響を考慮してかぶりコンクリートの品質を評価するために、今後は中性化抵抗性などの耐久性能と組織構造、それを評価する簡易指標としての圧縮強度との相関性等について検討していく予定である。

3.3 乾燥収縮

図-6に質量変化率の経時変化を、図-7に乾燥収縮率の経時変化を示す。質量変化率は、普通ポルトランドセメントに比べて中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を使用した場合の方が脱型時からの減少が大きい傾向にあり、図-8に示す7日脱型の場合の質量減少量と乾燥収縮率の関係から、中庸熱ポルトランドセメントでは、質量減少量すなわち水分逸散量に対する乾燥収縮が普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末と比較して小さい傾向にあった。

普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した場合では、乾燥収縮率は質量減少率と対応していたが、中庸熱ポルトランドセメントでは、7日脱型の場合の乾燥収縮が全体的に大きく、材齢1日で脱型した場合との差があまりみられなかった。既往の文献²⁾では、同一条件下での乾燥収縮率は、高炉セメント>普通ポルトランドセメント>中庸熱ポルトランドセメントの順であり、今回の結果でも既往の文献と類似した結果となったが、今後は、組織構造、残存水分量、内部水分の表面張力、それに影響を及ぼす混和剤の種類、使用量等について検討する予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 化学混和剤を使用した場合、7日脱型までの範囲では、脱型による水分逸散量は大きくなるが、強度発現はプレーンコンクリートより

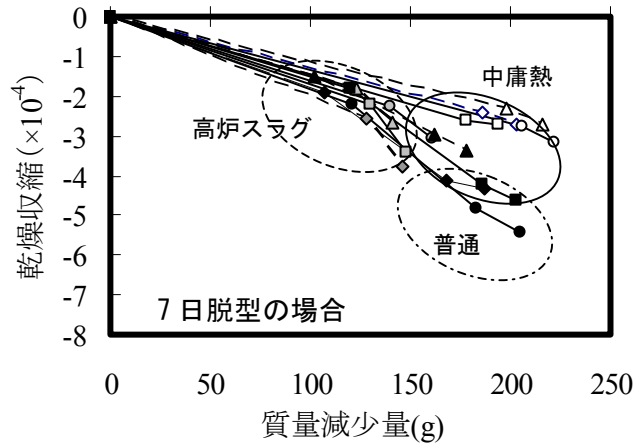


図-8 質量減少量と乾燥収縮率の関係

も大きい傾向にある。

- (2) AE 減水剤の銘柄の違いによる強度発現への影響は明確ではなかったが、結合材との関係において、中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合、脱型時期と強度発現の関係が異なる場合がある。
- (3) 中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合の乾燥収縮率は、他の結合材と比べて質量変化に対する乾燥収縮率が小さく、高炉で大きい傾向にあった。

謝辞

実験に際し、東京理科大学大学院生 長谷篤君、鈴木佑典君、卒論生 大桑和章君、島崎敬君、山田将士君の協力を得ました。また、本研究の一部は、(社)セメント協会研究奨励金の助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 湯浅昇ほか：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，No.509，pp.9-16，1998.7
- 2) 馬場明生：鉄筋コンクリート建物のひびわれと対策，井上書院，1982.5