論文　銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートに関する実用化研究

新村　亮[*1]・後藤広治[*2]・山下 徹[*3]・片野啓三郎[*4]

要旨：地下構造物の浮き上がり防止への使用を目的に，銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を併用した重量コンクリートの実用化のため実験的研究を行った。本研究の結果，銅スラグ細骨材と山砂・鉄粉等の混合，粉体量の増加，増粘型高性能減水剤の使用等によりワーカビリティーが改善されることがわかった。また，このコンクリートは施工性にも優れ，長期的な品質も良好であること明らかとなった。

キーワード：銅スラグ細骨材，電気炉酸化スラグ粗骨材，重量コンクリート，構造物浮上り防止

1. はじめに

重量コンクリートは主に大きな密度を必要とする放射線（γ線）遮蔽用コンクリートや重量が必要な消波ブロックなどの港湾構造物に使用されてきた [1)]。近年，地下構造物の設計の合理化の観点から，浮き上がり防止のための必要性が増している。

重量コンクリートに使われる代表的な重量骨材としては鉄（密度 7～8t/m^3），磁鉄鉱・砂鉄・赤鉄鉱・バライト（重晶石）（密度 4～5t/m^3），渇鉄鉱（密度 3～4 t/m^3），玄武岩・蛇紋岩（密度 2.7～3.1 t/m^3）などがある [2)]。しかし，国産の磁鉄鉱が枯渇していることから，黄鉄鉱の使用や，海外産赤鉄鉱の適用も検討されてきた [3) 4)]。

一方，従来の鉄鉱石重量骨材の代替として，電気炉酸化スラグ骨材（密度約 3.7 t/m^3）[5)]，銅スラグ細骨材（密度約 3.5 t/m^3）を使用したコンクリートに関する研究も行なわれている [6)]。産業副産物である銅スラグ細骨材，電気炉酸化スラグ骨材はコンクリート用骨材として JIS 化されており，従来の重量骨材に比べて，供給量，コストとも実用上有利と考えられる。

本研究では都市部高速道路地下構造物の浮き上がり防止を目的に，銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートの配合検討を行い，材料分離抵抗性の改善試験，施工性確認試験を行い，実施工時の品質変動の確認，長期品質の試験を行ったので，その結果を報告する。

2.重量コンクリートの配合試験

2.1 使用材料・配合・試験方法

(1) 使用材料

配合検討で使用した材料を**表－１**に，骨材の粒度分布を**図－１**に，スラグ骨材を**写真—１**に示す。銅スラグは製造時に微粒分が取り除かれるため粗粒であり，表面が平滑なガラス質の粒子である。銅スラグ細骨材，電気炉酸化スラグ粗骨材とも JIS 適合品である。混合用の細骨材には微粒分が比較的多い山砂と，比較的少ない砕砂，鉄粉（鉄鋼製品副産物である圧延スラッジ）も使用した。

(2) コンクリートの試験配合

試験を行った配合を**表－２**に示す。

(a) 配合シリーズ１では粗骨材に砕石を使用し，細骨材には銅スラグと山砂を混合し，銅スラグの混合率とセメント量を変化させた。

(b) 配合シリーズ２ではコンクリート単位容積質量をさらに増すため粗骨材の全量に電気炉酸化スラグを使用した。

(c) シリーズ３ではコンクリート単位容積質量を増すために鉄粉を混合使用した。

(d) 本研究の対象は地下構造物であり凍結融解の影響を受けないので，コンクリートの単位容積質量を上げるため消泡剤を使用した。配合シリーズ４では空気量を通常の AE コンクリートレベルまで混入させた。

(e) シリーズ５では微粒分が比較的少ない砕砂を銅スラグに混合使用した。

(f) シリーズ１～５ではセメントに普通ポルトランドセメントを使用したが，シリーズ６では高炉セメント B 種を使用した。

(3) 試験方法

フレッシュコンクリートの状態を目視で観察するとともに，スランプ，空気量，単位容積質量の試験を行った。材齢 28 日で圧縮強度，単位容積質量の測定を行ったが，標準水中養生の他に，材齢７日まで標準水中養生し，その後気中養生した供試体の試験も行い，乾燥による質量減少を測定した。

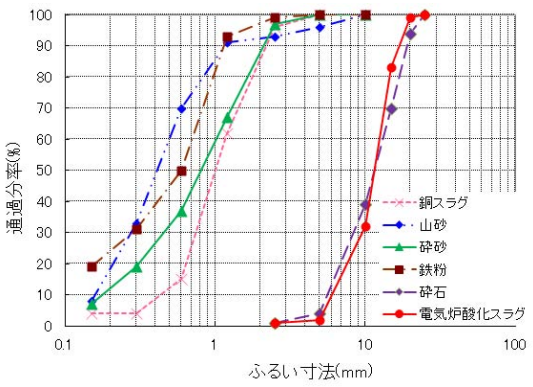
2.2 試験結果

試験結果を**表－３**に，代表的なスランプの状態を**写真**

*1 株式会社大林組　生産技術本部基盤技術部　工修　(正会員)
*2 東京都第二建設事務所　品川線建設事務所
*3 株式会社大林組　URUP 大井工事事務所　工修
*4 株式会社大林組　技術研究所生産技術研究部　工修　(正会員)

表－1　使用材料

記号	材料	銘柄・仕様	密度 (g/cm^3)
OPC	普通ポルトランドセメント		3.16
BB	高炉セメント B 種		3.04
S1	銅スラグ細骨材	小名浜精錬所，粗粒率 3.30	3.52
S2	山砂	千葉県富津市，粗粒率 2.10	2.60
	砕砂（砂岩）	福島県白河産，粗粒率 2.75	2.64
	鉄粉	圧延スラッジ(1.7mm 以下)	5.04
G1	電気炉酸化スラグ粗骨材	星野産商，実績率 60.0%	3.76
G2	砕石（石灰石）	青森県八戸市，実績率 61.0%	2.69
WR	減水剤	高機能タイプ減水剤	
SP	高性能減水剤		



図－１　骨材の粒度分布

表－２　配合試験のコンクリートの配合　　*体積比

記号	細骨材混合率*		粗骨材混合率*		セメント種類	細骨材 S2 種類	消泡剤使用	減水剤種類	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m^3)					
	重量細骨材 *S1*	細骨材 *S2*	重量粗骨材 *G1*	粗骨材 *G2*						水 *W*	セメント *C*	重量細骨材 *S1*	細骨材 *S2*	重量粗骨材 *G1*	粗骨材 *G2*
1-1	100	0	0	100	OPC	－	有	WR	54.9	158	288	1241	0	0	1020
1-2	80	20	0	100	OPC	山砂	有	WR	44.9	158	352	936	172	0	1020
1-3	50	50	0	100	OPC	山砂	有	WR	40.0	158	395	561	413	0	1020
2-1	50	50	100	0	OPC	山砂	有	WR	40.0	158	395	561	413	1429	0
3-1	60	40	0	100	OPC	鉄粉	有	WR	49.7	215	433	722	689	0	769
4-1	50	50	100	0	OPC	山砂	無	WR	42.0	170	405	490	361	1429	0
4-2	80	20	100	0	OPC	山砂	無	WR	42.0	170	405	855	157	1429	0
5-1	50	50	100	0	OPC	砕砂	有	SP	39.3	157	400	561	438	1421	0
5-2	30	70	100	0	OPC	砕砂	有	SP	40.5	162	400	331	578	1421	0
6-1	57	43	100	0	BB	山砂	有	WR	47.5	179	377	595	360	1390	0
6-2	57	43	50	50	BB	山砂	有	WR	47.5	179	377	595	360	695	497

銅スラグ細骨材　　電気炉酸化スラグ粗骨材

写真－１　スラグ骨材の性状

－２に示す。

配合シリーズ１では銅スラグ細骨材を 100%使用した場合には流動性が全く得られなかったが，50%山砂を混合し，セメント量を 395kg/m^3 まで上げることにより良好なワーカビリティーが得られた。配合シリーズ２では，電気炉酸化スラグ粗骨材を全量使用することで，多少プラスティシティーが低下したが，ほぼ良好なワーカビリティーが得られた。配合シリーズ３で鉄粉を銅スラグと混合使用しても良好なワーカビリティーが得られた。配合シリーズ４で空気量を十分に混入させた場合，銅スラグ混合率を 80%まで上げても良好なワーカビリティーが得られた。硬化後の質量は大幅に増加したが，これはエントラップトエアが抜けたためと考えられる。配合シリーズ５で微粒分の少ない砕砂を混合使用した場合，銅スラグ混合率を 30%まで低下させても，十分なワーカビリティーが得られなかった。配合シリーズ６でセメントに高炉セメントを使用した場合でも，良好なワーカビリティーが得られた。空気量が少ない場合，細骨材の合成粗粒率を 2.8 程度以下にする必要があることがわかった。

硬化後の単位容積質量はフレッシュ状態よりもシリーズ 4 を除くと最大 75 kg/m^3 大きくなった。これはエントラップトエアが抜けたためと考えられる。また，硬化後の乾燥による質量減少は最大 30kg/m^3 と軽微であった。

3.材料分離抵抗性の改善試験

銅スラグ細骨材および電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートは，普通コンクリートと比較して骨材の密度が大きいこと，細骨材中の微粒分が少ない

表－3　コンクリートの配合試験結果

記号	細骨材混合率		粗骨材混合率		セメント種類	細骨材S2種類	細骨材の合成粗粒率	消泡剤使用	フレッシュコンクリート試験結果				硬化コンクリート試験結果（材齢28日）			
													標準水中		水中7日，以後気中	
	重量細骨材 *S1*	細骨材 *S2*	重量粗骨材 *G1*	粗骨材 *G2*					スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)	性状	圧縮強度 (N/mm^2)	単位容積質量 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	単位容積質量 (kg/m^3)
1-1	100	0	0	100	OPC	－	3.30	有	0.0	5.2	2595	流動性無	26.8	2634	22.2	2602
1-2	80	20	0	100	OPC	山砂	3.06	有	2.0	2.8	2624	流動性不良	59.0	2660	57.4	2632
1-3	50	50	0	100	OPC	山砂	2.70	有	7.0	2.6	2546	良好	61.3	2598	65.1	2571
2-1	50	50	100	0	OPC	山砂	2.70	有	5.1	2.5	2954	ほぼ良好	69.1	3030	67.5	2971
3-1	60	40	0	100	OPC	鉄粉	2.81	有	13.0	4.2	2808	良好	54.5	2859	－	－
4-1	50	50	100	0	OPC	山砂	2.70	無	12.5	5.2	2856	良好	61.2	2956	63.8	2935
4-2	80	20	100	0	OPC	山砂	3.06	無	11.0	7.3	2877	ほぼ良好	76.9	3247	76.5	3216
5-1	50	50	100	0	OPC	砕砂	3.03	有	17.0	2.7	2943	分離	－	－	－	－
5-2	30	70	100	0	OPC	砕砂	2.92	有	14.5	2.1	2909	分離	67.9	2942	57.8	2931
6-1	50	50	100	0	BB	山砂	2.78	有	18.0	1.5	2967	ほぼ良好	61.8	2991	－	－
6-2	50	50	50	50	BB	山砂	2.78	有	19.5	1.0	2754	良好	59.0	2767	－	－

ことから，プラスティシティーの低下，骨材の沈降，ブリーディングの増加など材料分離の発生が懸念される。そこで，フレッシュコンクリートの粘性を高めることによる材料分離低減対策を検討した。

配合試験での 6-1 配合をベース配合 a とし，材料分離低減対策として b.単位セメント量を約 30kg/m^3 増加したもの, c. 石灰石微粉末を細骨材置換で 15%使用したもの, d. 減水剤の代わりに増粘型高性能減水剤を使用したものの 4 ケースを試験した。各ケースの配合および品質試験結果を**表―4** に示す。

3.1 プラスティシティー

写真－3 より，石灰石微粉末を使用した c は，a，b および d にみられる崩れや割れが特に少なく，プラスティシティーが改善されたとみなすことができる。これは，石灰石微粉末で細骨材の一部を置換することで粘性が増加したためと考えられる。

3.2 ブリーディング

ブリーディング量の経時変化を**図－2** に示す。セメントを増量した b および石灰石微粉末を使用した c は，ブリーディング量がベース配合 a と比較して約 10%低減された。これは，セメントあるいは石灰石微粉末のような粉末を添加することによってフレッシュコンクリートの保水性が増したものと考えられる。一方，増粘型高性能減水剤を使用した d は，増粘剤の効果によって水分がフレッシュコンクリート中に保持され，ブリーディング量はベース配合 a と比較して約 35%低減された。

配合 2-1

配合 5-2

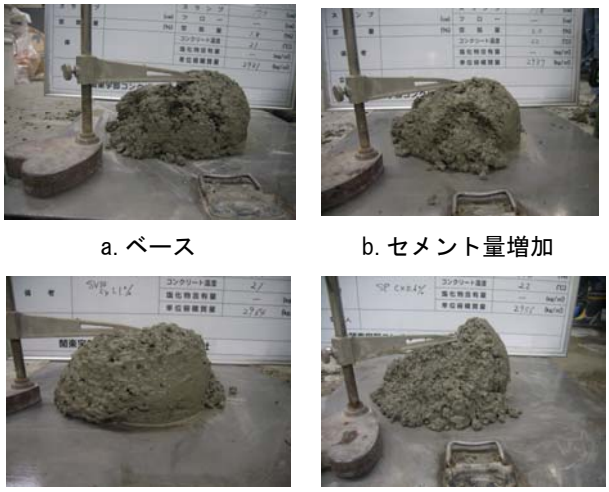
写真－2　配合試験でのスランプの性状

以上より，銅スラグ細骨材および電気炉参加スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートのプラスティシティーの改善には石灰石微粉末等の粉体量の増加が，ブリーディングの低減には増粘剤型の混和剤の使用が特に効果的

表―4　材料分離抵抗性試験での配合および品質試験結果

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)								試験結果		
			W	C	LS	S1	S2	G	WR	VA	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)
a.ベース配合	47.5	45.4	179	377	－	595	360	1390	3.77	－	17.5	1.8	2931
b.単位セメント量増加	43.9	44.6	178	406	－	577	349	1393	4.06	－	17.5	2.0	2937
c.石灰石微粉末 15%使用	36.1	43.4	179	377	119	484	292	1441	4.15	－	18.5	1.3	2964
d.増粘型高性能減水剤使用	47.5	45.4	173	364	－	604	365	1411	－	2.19	18.0	1.6	2956

LS:石灰石微粉末，S2:山砂，VA:増粘型高性能減水剤



a. ベース　　b. セメント量増加

c. 石灰石微粉末　　d. 増粘型高性能減水剤

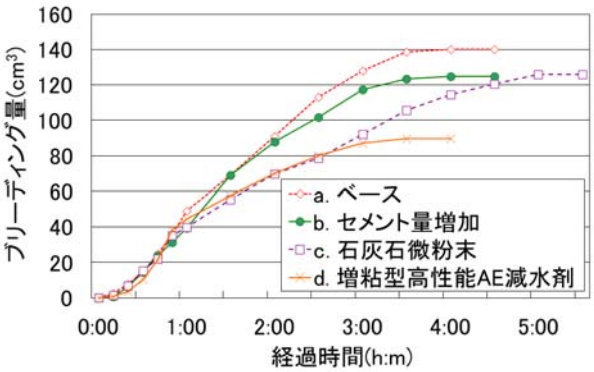
写真―３　材料分離抵抗性試験でのスランプの性状

であることがわかった。

4. 施工性・品質変動の確認

4.1 施工性の確認試験

銅スラグ細骨材は微粒分が少なく，表面が平滑でありポンプ圧送性に問題があると考えられた。また，電気炉酸化スラグ粗骨材はポーラスな組織であり，圧力吸水によるポンプ圧送時の品質変化が生じやすいと考えられた。



図―２　ブリーディング量の経時変化

そこで，重量コンクリートのポンプ圧送時の品質変化と圧送性の試験を行った。使用したコンクリートの配合を**表―５**に示す。市中の生コン工場（3m^3 強制二軸ミキサ）で各配合を 6.8m^3 製造し，生コン車２台に分けて運搬した。工場からの運搬時間は約 30 分である。ポンプ圧送では水平換算距離 150m，管径 125mm の配管を使用し，最大吐出圧力 10.6MPa のピストン式ポンプで圧送した。

ポンプ圧送時の品質変化試験は工場出荷時, 荷卸し時, ポンプ圧送後のフレッシュ性状（スランプ，空気量，単位容積質量，温度）の変化とポンプ圧送後の圧縮強度である。単位容積質量 2900kg/m^3 のコンクリートの圧送時

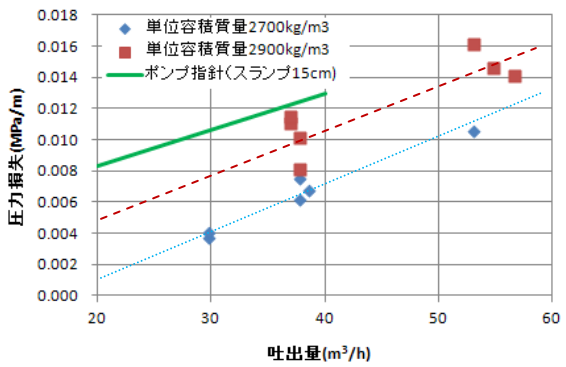
表―５　施工性確認試験のコンクリート配合

設計単位容積質量 (kg/m^3)	W/C	s/a	空気量 (%)	単位量（kg/m^3）					
				W	C	S1	S2	G1	G2
2700	47.5	45.5	2.0 以下	179	377	595	361	696	495
2900	43.9	44.6	2.0 以下	178	406	577	348	1391	―

C：高炉セメント B 種，S1 銅スラグ細骨材，S2 山砂，G1 電気炉酸化スラグ粗骨材，G2 石灰砕石 2005

表―６　施工性確認試験の品質管理試験結果

設計単位容積質量 (kg/m3)	車番	品質管理試験結果						
		試験時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)	温度 (℃)	材齢 28 日圧縮強度 (N/mm^2)	備考
2700	荷卸し時管理値		15±2.5	2.0 以下	2700 以上	―	―	
	1 車目	プラント出荷	20.0	0.8	2790	29	―	
		荷卸し	17.0	0.4	―	31	―	
		圧送後	21.0	0.7	―	30	43.7	
	2 車目	プラント出荷	18.0	1.3	2780	30	―	
		荷卸し	15.5	0.7	2760	33	―	
		圧送後	16.0	0.7	―	―	―	
2900	荷卸し時管理値		15±2.5	2.0 以下	2900 以上	―	―	
	3 車目	プラント出荷	17.5	1.0	2990	30	―	
		荷卸し	15.5	0.9	2970	31	―	
		圧送後	7.5	1.0	―	31	49.3	30 分圧送停止後
	4 車目	プラント出荷	18.0	0.9	2974	30	―	
		荷卸し	15.5	0.6	2960	31	―	
		圧送後	15.5	0.8	―	31	―	



図―３　吐出量と配管１m 当たりの圧力損失の関係

には圧送を 30 分間停止した。

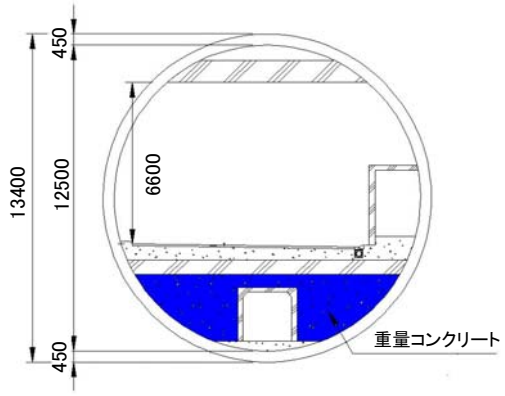
品質試験結果を**表―６**に示す。圧送にともなう品質変化は少なかったが, ポンプ圧送 30 分間停止間のスランプは 8cm 程度低下した。これは電気炉酸化スラグ粗骨材の圧力吸水の影響も考えられる。

吐出量と配管１m 当たりの圧力損失の関係を**図－３**に示す。単位容積質量 2900kg/m^3 の配合の方がやや圧力損失は大きいものの，標準値 [7]に比べて両配合とも小さい結果であった。30 分停止にともなう顕著な圧送圧力上昇は見られず，セメント量の増加，銅スラグと山砂の混合により良好なポンプ圧送性が得られることがわかった。

4.2 製造時品質変動の確認

銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートを高速道路地下構造物築造工事において施工した際の品質変動を確認した。施工した工事は東京都発注の中央環状品川線大井地区トンネル工事であり，本工事ではＵＲＵＰ工法（地上発進・地上到達するシールド工法）によりトンネルを築造する。到達側で，土被りが小さくトンネルの浮上りに対する抵抗が十分に取れない区間に対し，道路下の埋戻しコンクリートに重量コンクリートを施工した。適用部位を**図－４**に示す。施工したコンクリートの配合は**表―６**に示した２配合である。施工した重量コンクリートは単位容積質量 2700kg/m^3 の配合が 1077m^3，単位容積質量 2900kg/m^3 の配合が 534m^3 である。

施工時のフレッシュコンクリートのスランプ，空気量，



図―４　重量コンクリートの適用部位

単位容積質量の確認結果を**図－５**に示す。スランプは管理範囲内に，空気量は上限以下に，単位容積質量は下限以上にいずれも管理できており，本コンクリートは通常の生コン工場で十分に品質管理が可能なことがわかった。

5. 長期品質の確認

5.1 自己収縮，自己膨張特性

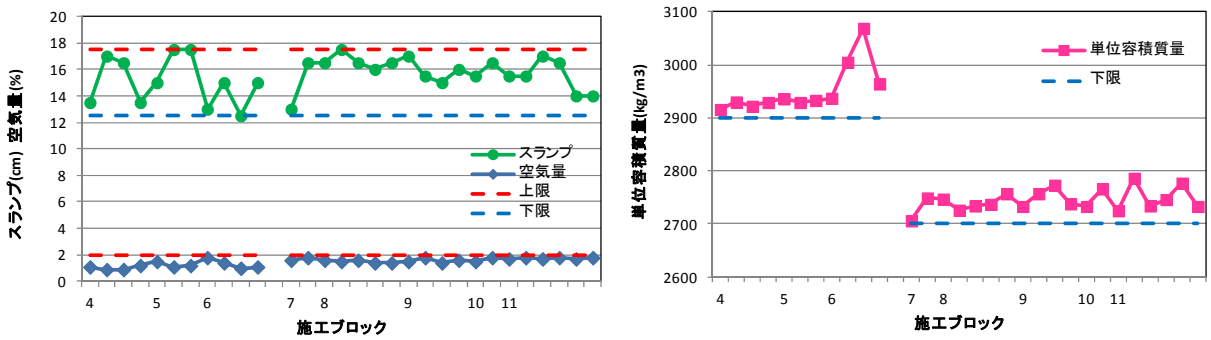
銅スラグ細骨材を使用したコンクリートは，普通コンクリートと比較して乾燥収縮や自己収縮が小さくなるという報告 [8] がある一方で，電気炉酸化スラグは潜在的に水浸膨張性を持つものがある [9]。そこで，銅スラグおよび電気炉酸化スラグを使用した重量コンクリートの長期の自己収縮，自己膨張試験を実施した。

コンクリートの配合は**表―５**の単位容積質量 2900kg/m^3 の配合とし，100×100×400mm の供試体の中央に設置した埋込型ひずみ計によってひずみを計測した。養生条件は，打設から材齢 28 日まで 20℃封かん養生，材齢 28 日以降は 20℃水中養生とした。

試験結果を**図―６**に示す。封かん養生を行っている間コンクリートは収縮挙動を示し，材齢 28 日までで 50×10^{-6} 収縮した。一方，水中養生を開始後にはコンクリートは急激に膨張した。しかし，その膨張量は 50×10^{-6} 程度であり，コンクリートの品質低下を生じるレベルではないことがわかった。

5.2 長期強度

表―５の 2 配合のコンクリートで 1000×1000×



図―５　重量コンクリートの施工時品質確認結果

1000mm のマスブロックを作製し，4.5 ヶ月間屋外暴露を実施した後にコアの圧縮強度と単位容積質量を測定した。

試験結果を**表―６**および**図―８**に示す。両ケースとも，上部において単位容積質量が設計値より小さくなった。密度が大きい電気炉酸化スラグ粗骨材が，コンクリートの打込み，締固めによってフレッシュコンクリート内で沈降した結果，単位容積質量が小さくなったものと考えられる。ただし，圧縮強度と静弾性係数は中部，下部と比較して大きな差は見られなかった。また，コアの圧縮強度は同じコンクリートを標準養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度を上回っており，長期間の暴露を行っても強度には悪影響を及ぼさないことが確認された。

6. まとめ

地下構造物の浮き上がり防止を目的に，銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した重量コンクリートに関して実験的な研究を行い，以下の知見が得られた。

(1) 表面が平滑で微粒分が少ない銅スラグ細骨材を微粒分の多い山砂や微細鉄粉と混合して使用することで，合成粗粒率を 2.8 程度以下にし，セメント量を増加することにより，適切なワーカビリティーのコンクリートが得られる。

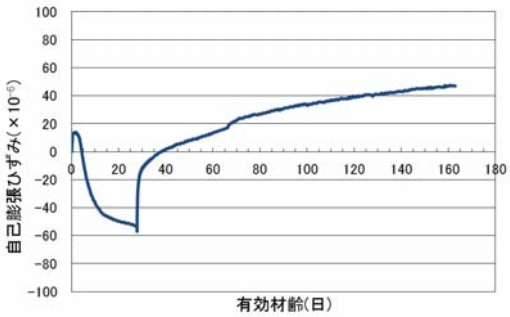
(2) 消泡剤を使用することで，単位容積質量 2900kg/m^3 のワーカビリティーの良好なコンクリート得られる。

(3) プラスティシティーの改善には石灰石微粉末等の粉体の添加，ブリーディング量の低減には増粘型高性能減水剤の使用が有効である。

(4) 銅スラグと山砂を混合使用し，セメント量を適切に選定したコンクリートは，一般の生コン工場でも安定した品質で製造可能である。また，ポンプ圧送性も良好であり，施工時の品質変動も少ない。

(5) 長期的な膨張性を若干示すが品質低下を生じるレベルではなく，また，躯体の長期強度も良好である。

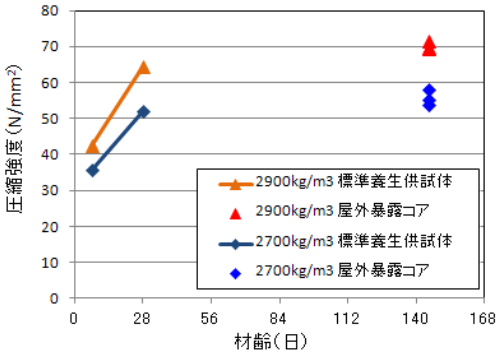
スラグ系骨材は従来の鉄鉱石重量骨材などに比べ安定的に低コストで供給可能であり，品質，施工性ともに良好である。このことから，今後，地下構造物の計画・設計の合理化に大いに寄与できるものと考えられる。



図―６　自己収縮，自己膨張ひずみ測定結果

表―６　コアの試験結果

設計単位容積質量 (kg/m^3)	採取位置	単位容積質量 (kg/m^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)
2900	上	2850	69.4	39.8
	中	3013	71.5	42.5
	下	3009	69.5	43.0
2700	上	2676	53.6	38.5
	中	2749	55.1	37.8
	下	2771	57.8	39.6



図―７　コアの圧縮強度試験結果

参考文献

1) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，技報堂出版，1996

2) 白山和久：特殊な材料を用いたコンクリート（その１３）Ⅲ－２重量骨材，コンクリート工学，Vol.24，No.12，pp.68-72．1986.12

3) 石井貴和，石村紀久雄，鈴木啓一，千田清寿，住田忠之，大上実，：重量コンクリートに関する調査研究　その１骨材の品質及びコンクリートの物性，日本建築学会大会学術講演概要集，　pp.825-826，1990.10

4) 神山行男，阿部富一，定歳道夫：チリ産磁鉄鉱石の重量コンクリート用骨材への適用について，日本建築学会大会学術講演概要集，　pp.71-72，1983.9

5) 森野奎二，渕上榮治，星野熊夫：電気炉酸化スラグ骨材の重量コンクリートへの有効利用，セメントコンクリート，No.54，pp.717-722，2000

6) 松田節男，川西政雄，錦織和紀郎：銅スラグを用いた高比重コンクリートの配合および強度特性，土木学会年次学術講演会，Ⅴ-463，pp.925-926，2003.9

7) コンクリートのポンプ施工指針，コンクリートライブラリー100，土木学会，2000.2

8) たとえば村上哲也ほか：副産物を使用した高密度コンクリートの調合及び基礎物性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 材料施工 2006，pp.755-756，2006.7

9) 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー110，土木学会，2003.3