

[27] 下水汚泥焼却灰を原料とした軽量骨材及び軽量コンクリートの研究

山 本 稔 (東京都立大学 工学部)

橋 本 定 雄 (東京都 下水道局)

松 崎 茂 樹 (東京都 下水道局)

正 会 員 ○ 横 山 昌 寛 (三井金属 建材事業部)

1 ま え が き

下水処理場から発生する汚泥焼却灰を原料として製造された軽量骨材の構造用コンクリートへの適用に関しての実験・研究について述べる。東京都は昭和56年度より、汚泥焼却灰を利用した人工軽量骨材及びそれを使用した軽量コンクリートの用途開発を、日本トンネル技術協会へ委託してきた。¹⁾²⁾特に昭和56年度に実施した下水道トンネル二次覆工用コンクリートでは、同時に施工した普通コンクリートに比較して、東京都試作軽量骨材コンクリートの方がひび割れの発生

が、すくないという知見も得た。³⁾これらの原因の解明及び二次覆工コンクリートとしての合理的な型枠脱型時期と適正配合の検討の為に、早期材令を含む強度・弾性・クリープ及び熱的特性について、配合及び養生条件を変化させて実験した。対象骨材は東京都試作軽量骨材を主とし、比較の為に良質な河川産普通骨材と市販人工軽量骨材(膨張頁岩)とを用いた。

2 実験概要

(1) コンクリートの配合 表-1に実験に用いたコンクリートの配合を示す。養生は20及び30℃の2種類で行い、所要スランブを得る為の単位水量は、試し練りによって決定した。目標とした空気量は、普通コンクリートは5%, 軽量コンクリートは4%とした。

(2) 使用材料 セメントは早強及び普通ポルトランドセメントとを使用した。使用した骨材の品質を表-2, 3に示す。試作軽量粗骨材は、汚泥焼却灰と頁岩とを混合・造粒し、現在実験中のロータリーキルンで焼成し、試作軽量細骨材は焼却灰を粉碎・造流し、気流焼成炉で製造したものである。混和剤は、標準型のAE減水剤をセメント100kgに対し250cc使用した。

表-1 コンクリート配合

練上り養生温度(℃)	配合率(%)	セメントの種類	スランブ(cm)	空気量(%)	骨材の組み合わせ		水セメント比(%)	細骨材率(%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					(a)粗骨材	(b)細骨材			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	(c)
20	1	早強ポルトランドセメント	15±2.5	4	G	S	51.3	4.44	320	164	795	1001	800	
	2			5	LG	S	50.6	4.45	320	162	787	585	800	
	3				LG	LS	50.6	4.71	320	162	578	557	800	
	4				LG	S	48.1	4.66	360	173	795	545	900	
	5				LG	LS	50.6	4.61	360	182	546	536	900	
	6				MG	MS	50.6	5.01	360	182	611	544	900	
	7	普通ポルトランドセメント	15±2.5	4	G	S	50.0	4.44	320	160	800	1011	800	
	8			5	LG	S	49.4	4.45	320	158	792	591	800	
	9				LG	LS	49.7	4.71	320	159	582	562	800	
	10				LG	S	44.7	4.66	360	161	812	554	900	
	11				LG	LS	48.9	4.61	360	176	544	548	900	
	12				MG	MS	48.6	5.01	360	175	619	551	900	
30	1	早強ポルトランドセメント	15±2.5	4	G	S	53.4	4.50	320	171	797	980	800	
	3			5	LG	LS	52.8	4.75	320	169	576	564	800	
	6				MG	MS	52.2	5.05	360	188	611	534	900	
	7	普通ポルトランドセメント	15±2.5	4	G	S	52.2	4.50	320	167	802	991	800	
	9			5	LG	LS	51.9	4.75	320	166	580	553	800	
	12				MG	MS	50.5	5.05	360	182	617	541	900	

注) (a) 粗骨材 G : 普通骨材(天然砂利) LG : 試作軽量骨材 MG : 市販人工軽量骨材
(b) 細骨材 S : 普通骨材(川砂) LS : 試作軽量骨材 MS : 市販人工軽量骨材
(c) 混和剤 AE減水剤

表-2 粗骨材の試験成績

種 類	表 乾 比 重	吸水率(%)	洗い試験損失量(%)	単位容積量(kg/L)	実積率(%)	フルイ通過率(重量%)						粗 粒 率 F. M.
						25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	
試作軽量粗骨材	1.54 ※ (1.32)	1.65	—	0.792	59.9	100	100	100	45	9	0	6.46
市販人工軽量骨材	1.67 ※ (1.30)	2.80	—	0.784	60.1	100	100	97	63	13	0	6.24
天然砂利 (鬼怒川産)	2.60 ※ (2.57)	1.32	0.64	1.570	60.4	98	82	54	16	1	0	7.01

※ 絶対比重

(3) 実験項目及び方法 まだ固まらないコンクリートについては、スランブ、空気量、単位容積重量、ブリージング量、コンクリート温度を、硬化コンクリートについては、圧縮・引張強度、弾性係数（ポアソン比）、圧縮クリープ及び長さ変化率とを測定した。又熱的性質及び断熱温度上昇とを測定した。

圧縮及び引張強度と弾性係数の測定は、材令 6, 12, 14, 16, 18, 24 h, 2, 3, 7,

28, 91 日で全配合について各 3 本ずつの供試体について行い、圧縮クリープは、配合 No. 1, 2, 3 について、材令 10, 12, 18 及び 24 h の時点で、それぞれ 0.5 σ_c の応力水準で载荷し、全歪と弾性歪の測定からクリープを算定した。クリープ係数は、载荷後 48 h の時点での測定値から算定した。クリープ試験は気中で行った。

熱的性質については、配合 No. 1, 2, 3 及び 6 について線膨張係数、熱伝導率、比熱及び熱拡散係数とを測定した。

3. 実験結果と考察

(1) まだ固まらないコンクリートの性質

表-4 に実験結果を示す。コンクリート温度の単位水量に与える影響では、10℃で温度が上昇することにより、約 7 kg/m^3 増大し、セメント種類の影響では単位セメント量 320 kg/m^3 の場合、早強の方が普通ポルトランドセメントより約 4 kg/m^3 , 360 kg/m^3 の場合では約 8 kg/m^3 増大し、又セメント量の影響では、早強セメント及び軽量細骨材を使用した場合に特に単位水量の増加が著しい傾向を示した。普通ポルトランドセメントを使用した場合、同一セメント量では普通コンクリートと軽量コンクリートの単位水量には、差が認められなかった。

ブリージングの傾向は、これ迄の知見と同様であり、早強ポルトランドセメント使用の方が、普通ポルトランドセメント使用の場合の約 $1/2$ で、又温度 30℃のコンクリートの方が 20℃の場合の約 $1/2$ の値を示した。

(2) 硬化コンクリートの性質 材令と圧縮強度との関係を、図-1 に示す。短期材令では軽量

表-3 細骨材の試験成績

種類	表乾比重	吸水率(%)	洗い試験損失量(%)	有機不純物	単位容積重量(kg/L)	実収率(%)	フルイ通過率(重量%)						粗粒率 F. M.
							100	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
試作軽量骨材	1.79 ※ (1.58)	13.6	—	—	1.002	63.6	100	98	61	34	23	11	2.75
市販人工軽量骨材	1.87 ※ (1.58)	18.0	—	—	0.990	62.5	100	96	64	36	20	10	2.74
普通砂 (鬼怒川産)	2.58 ※ (2.52)	2.2	3.68	合格	1.690	66.9	100	88	70	45	19	6	2.72

※() 数値は絶乾比重を示す。

表-4 まだ固まらないコンクリートの性質

養生温度(℃)	配合 No.	セメントの種類	骨材の組み合わせ	スランブ (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	単位容積重量 (kg/m^3)	ブリージング量 (cm^3/cm^3)
20	1	早強ポルトランドセメント	G S	16.0	4.2	21.0	2,275	0.14
	2		LG S	13.0	6.3	20.0	1,856	0.13
	3		LG LS	16.0	6.5	19.0	1,620	0.17
	4		LG S	15.0	6.3	19.0	1,880	0.11
	5		LG LS	16.0	6.5	21.0	1,647	0.15
	6		MG MS	17.0	5.6	19.5	1,739	0.08
	7	普通ポルトランドセメント	G S	15.5	4.4	20.0	2,315	0.25
	8		LG S	15.0	6.5	20.0	1,921	0.27
	9		LG LS	16.5	6.5	20.5	1,695	0.33
	10		LG S	12.5	5.8	20.8	1,908	0.14
	11		LG LS	15.0	5.9	19.0	1,651	0.36
	12		MG MS	14.5	6.5	19.5	1,703	0.16
30	1	早強ポルトランドセメント	G S	15.0	4.4	29.5	2,211	0.07
	3		LG LS	15.0	6.5	29.5	1,596	0.09
	6		MG MS	16.0	5.4	29.0	1,688	0.06
	7	普通ポルトランドセメント	G S	16.0	4.2	30.0	2,282	0.13
	9		LG LS	14.5	6.5	30.0	1,601	0.12
	12		MG MS	15.5	5.6	30.0	1,749	0.10

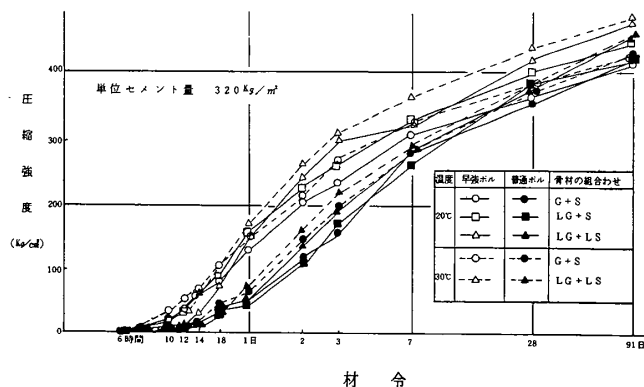


図-1 材令と圧縮強度との関係

コンクリートの方が低い傾向にあるが、24 h以降の材令では強度差はほとんどなくなる。単位セメント量 320 kg/m^3 で、材令 15 ~ 18 h の軽量コンクリートの圧縮強度は早強セメント使用の場合 $45 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ であり、普通ポルトランドセメントでは $15 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ の値を示した。この値はトンネル二次覆工コンクリートの型枠脱型時強度としては、十分満足し得るものである。

若材令コンクリートの圧縮強度に与える養生温度の影響では、 30°C の方が 20°C より約 1.0 ~ 1.3 程度増加する。

引張強度と圧縮強度との関係は、 $\sigma_t = 1.8 + 0.075 \sigma_c$ ($R = 0.989$) で示され、材令、温度及び配合の差による影響はほとんど認められなかった。

圧縮強度と弾性係数との関係は、下式で示された。

- (a) $G+S$: $E_c = (-1.48 \times 10^{-5} \cdot \sigma_c^2 + 1.23 \times 10^{-2} \cdot \sigma_c + 0.41) \times 10^5$
- (b) $LG+S$: $E_c = (-9.00 \times 10^{-6} \cdot \sigma_c^2 + 7.93 \times 10^{-3} \cdot \sigma_c + 0.32) \times 10^5$
- (c) $LG+LS$: $E_c = (-7.32 \times 10^{-6} \cdot \sigma_c^2 + 6.72 \times 10^{-3} \cdot \sigma_c + 0.15) \times 10^5$

ここに、 E_c : コンクリートの弾性係数 (kg/cm^2)

σ_c : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm^2)

圧縮強度とポアソン比との関係は

$\nu = 0.00012 \sigma_c + 0.152$ ($R = 0.748$) で示され、若材令のコンクリート程ポアソン比は低い値を示した。

若材令におけるクリープひずみの実験結果の 1 例を図-3 に示す。載荷 48 h 後のクリープ係数は、若材令のコンクリート程大きい値を示し、軽量コンクリートの値は、普通コンクリートより小であり、材令に応じ 0.79 ~ 0.54 倍の値を示した。

硬化乾燥に伴うコンクリートの長さ変化の測定値を図-4 に示す。材令 1 年目における普通コンクリートの長さ変化率が 7.2×10^{-4} であるに対し、軽量コンクリートではその値の 54 ~ 67 % の低い値を示した。 (20°C , $RH=60\%$ 気中)

(3) 熱的性質 表-5 に熱的性質の実験結果を示す。水中養生した試験体の測定結果であり、軽量コンクリートの比熱は、吸水率が大きである為、普通コンクリートより大なる値を示し、又熱伝導率も気乾状態に比べ、同一単位容積重量のコンクリートより大なる値を示した。軽量コンクリートの線膨張係数は普通コンクリートの値の 0.68 ~ 0.82 の範囲にあり、又熱拡散係数は 0.46 ~ 0.56 の範囲を示した。断熱温度上昇試験結果を表-6 に示すが、軽量コンクリートの方が、高い温度上昇を示した。

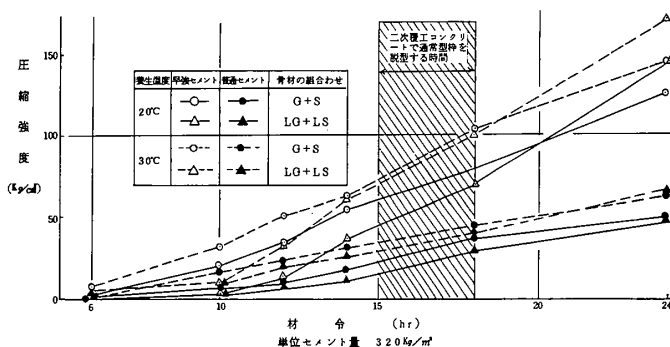


図-2 初期材令における圧縮強度

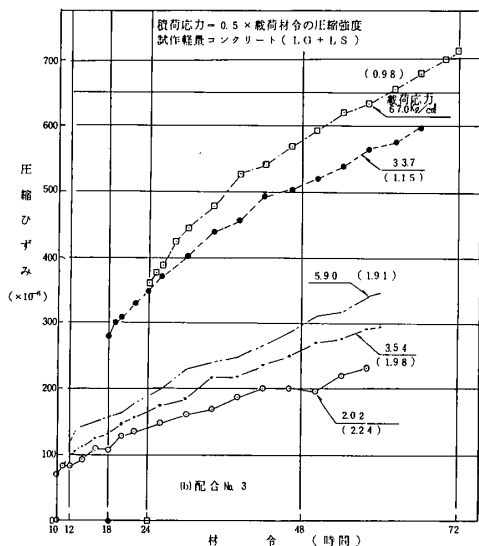
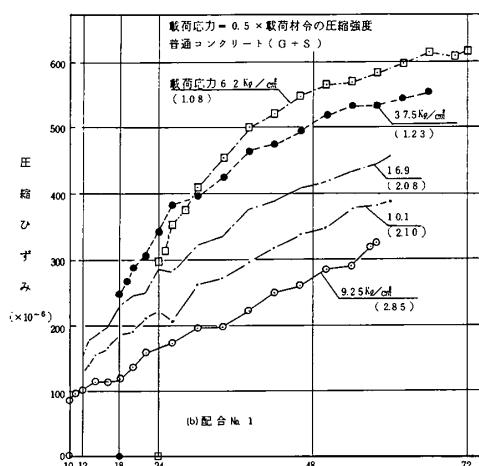


図-3 クリープひずみの試験結果
() 内数値はクリープ係数

4 まとめ

(1) まだ固まらないコンクリートの性質 同一のスランブを得る為の単位水量は、良質な河川産骨材及び市販軽量骨材と同等と考えてよい。ブリージング量は普通コンクリートより若干多くなる。

(2) 硬化コンクリートの性質 試作軽量骨材コンクリートの強度特性は、一般の軽量コンクリートとほとんど同等である。普通ポルトランドセメントを使用した軽量コンクリート ($C = 320 \text{ kg/m}^3$) の圧縮強度は、東京都仕様の脱型時及び設計基準強度 $\sigma_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (1 週) を十分満足させる。引張強度及び σ_t / σ_c の値も市販人工軽量骨材コンクリートと同様の傾向を示した。

弾性係数は、市販人工軽量骨材コンクリートと同様で、軽量細骨材を用いた場合に普通コンクリートの 49 ~ 56 %、川砂使用の場合で 67 ~ 68 % の値を示した。ポアソン比は、材令 1 日以降で、0.15 ~ 0.22 の範囲にあり、若材令では幾分低い傾向にある。若材令での軽量コンクリートのクリープ係数は、普通コンクリートの 0.54 ~ 0.74 倍であった。

長さ変化は、軽量コンクリートの方が、普通コンクリートより低く、1 年目で約 5.4 ~ 6.7 % の範囲の値を示した。

(3) 熱的性質 試作軽量骨材コンクリートの熱的性質は、これ迄の市販人工軽量骨材コンクリートの実験結果と同様であり、コンクリート中の水分の及ぼす影響は、大である。

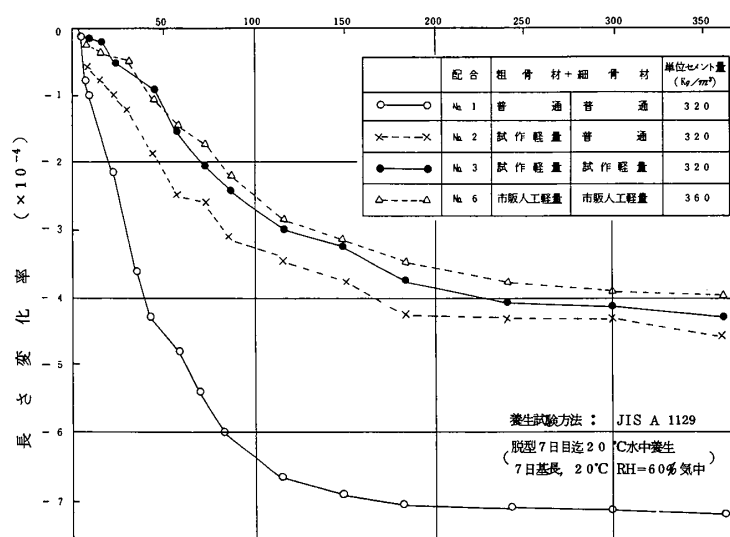


図-4 材令と長さ変化率

表-5 熱的性質

配合 No.	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		熱伝導率 ($\text{Kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{Kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	単位容積重量 ($\text{kg/}\ell\text{it}$)		熱拡散率 (m^2/h)
	7日	28日	28日	28日	7日	28日	28日
1	9.4	10.4	2.00	0.25	2.30	2.30	0.0035
2	7.9	8.5	1.37	0.38	1.86	1.86	0.0020
3	7.2	7.2	1.12	0.43	1.65	1.66	0.0016
6	6.4	7.1	1.14	0.41	1.74	1.74	0.0016

表-6 断熱温度上昇式

配合 No.	セメントの種類	骨材の組み合わせ		$T = K(1 - e^{-\alpha t})$	
		粗骨材	細骨材	K	α
1	早強ポルトランドセメント	G	S	4.341	1.400
2		LG	S	5.041	1.181
3		LG	LS	5.295	1.111
6		MG	MS	5.512	1.352
7	普通ポルトランドセメント	G	S	4.008	0.818
9		LG	LS	5.148	0.729
12		MG	MS	5.307	0.816

おわりに、本実験研究は日本トンネル技術協会に設置された「下水道覆工対策特別委員会(委員長 山本 総)」での研究結果(昭和57年度)の一部である。担当委員(敬称略)の峯村、田沢(鹿島建設)、吉沢、山本(熊谷組)、井坂、今井(清水建設)、龍澤、内藤(大成建設)、柳田(セメント協会)、三浦(石川島建機)、協力者の佐藤、中込(東京都下水道局)、事務局のトンネル技術協会の皆様及び三友エンジニアリングに対し、感謝の意を呈します。

参考・引用文献 1) 市街地における下水道シールド工法の覆工の効果的なあり方に関する実験的研究 その1
社団法人日本トンネル技術協会 昭和57年 3月
2) 市街地における下水道シールド工法の覆工の効果的なあり方に関する実験的研究 その2
社団法人日本トンネル技術協会 昭和58年 3月
3) 橋本 定雄, トンネル2次覆工コンクリートへの人工軽量骨材の適用, コンクリート工学, Vol. 20, No. 12, Dec. 1982, 日本コンクリート工学協会