

報告

[1122] 各種骨材を用いたコンクリートの耐久性

正会員 依田 彰彦 (足利工業大学工学部)

正会員 ○横室 隆 (足利工業大学工学部)

1. はじめに

現在、我が国で使用されている種々の骨材を組み合わせたコンクリートについて目標とする材令28日圧縮強度 (F_{28}) を225kgf/cm²、スランブを18cm、空気量を4%とした材令3年までの耐久性、すなわち圧縮強度、ヤング係数をはじめ、屋外自然暴露と10%CO₂促進試験による中性化深さと鉄筋の発錆状況、凍結融解作用に対する抵抗性、長さ・重量の変化率、耐熱性の程度を知ることがを目的として実験研究したので報告する。

2. 使用材料

- 2.1 セメント : 普通ポルトランドセメント (C社製品)、記号「N」
高炉セメントB種 (Y社製品)、記号「BB」、高炉スラグの分量47%
- 2.2 細骨材 : 砂 (鬼怒川産)、記号「川砂」
高炉スラグ細骨材 (KO社製品)、記号「スラグ砂」
人工軽量細骨材 (M社製品)、記号「人軽細」
- 2.3 粗骨材 : 砂利 (鬼怒川砂利)、記号「川砂利」
石灰岩質碎石 (YO社製品)、記号「碎石」
高炉スラグ碎石 (S社製品)、記号「スラグ碎石」
人工軽量粗骨材 (M社製品)、記号「人軽粗」
- 2.4 水 : 足利工業大学自家用水
- 2.5 化学混和剤 : 主成分が天然樹脂酸塩のAE剤 (YA社製品)
- 2.6 鉄筋 : D19 (TO社製品)
- 2.7 使用材料の品質 : 表-1~4に示す。いずれも JASS 5 の規定値を満たしている。

表-1 使用セメントの品質

セメントの種類	化学成分 (%)				比重	比表面積 (ブレン法) (cm ² /g)	凝結 (h-m)		安定性	圧縮強さ (kgf/cm ²)		
	ig.loss	MgO	SO ₃	R ₂ O			始	終		3日	7日	28日
N	0.6	1.4	2.1	0.68	3.16	3 2 9 0	2-30	3-35	良	158	263	417
BB	0.9	3.6	2.0	0.41	3.03	2 7 2 0	3-10	4-20	良	107	190	415

表-2 使用骨材の品質

骨材種類	絶乾比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	粘土塊量 (%)	洗い損出量 (%)	有機不純物	f.m.又は最大寸法 (mm)	ふるいを通るものの重量百分率 (%)										
								ふるいの呼び寸法 (mm)										
								25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材	川砂	2.52	2.3	63.9	0.20	0.7	うすい	2.8	—	—	—	—	100	90	67	41	16	2
	スラグ砂	2.60	2.6	61.8	0.00	0.8	うすい	2.8	—	—	—	—	100	97	71	35	14	3
	人軽細	1.62	15.5	—	—	—	うすい	2.6	—	—	—	—	100	97	69	41	23	10
粗骨材	川砂利	2.57	1.8	63.5	0.05	0.2	—	20	100	100	63	39	5	0	—	—	—	—
	碎石	2.64	1.3	60.4	0.00	0.1	—	20	100	96	79	30	5	1	—	—	—	—
	スラグ碎石	2.40	3.9	61.7	0.00	0.7	—	20	100	95	64	37	5	1	—	—	—	—
人軽粗	1.33	27.0	—	—	—	—	15	100	100	98	63	13	—	—	—	—	—	

表-3 使用水質

色度	濁度	水素イオン濃度 (ppm)	蒸発残留物 (ppm)	塩素イオン (ppm)	過マンガン酸カリウム消費量 (ppm)
0	0	6.5	1 9 2.5	1 5.3	0.6

表-4 使用鉄筋の品質

No.	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	伸び (%)	記号
1	3 6.6	5 5.8	2 6.1	SD30A
2	3 6.6	5 5.6	2 5.6	

3. 実験計画

3.1 実験の項目と方法

- a. スランブ : JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験方法) によった。

- b. 空気量：JIS A 1128(まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法))によった。
- c. ワーカビリチー：スランプしたコンクリートの形状やタッピングしたときのくずれ方から判断した。
- d. 圧縮強度：JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)によった。材令は7日、28日、91日、1年、3年。供試体は直径10cm、高さ20cmのものを用い、養生方法は材令7日まで20℃水中養生した後、材令28日まで温度20℃・湿度80%の恒温室に封かん状態にして放置し、材令28日から20℃水中養生した場合と表一5に示すごく普通の屋外に自然暴露した場合の圧縮強度をS社製100トン電子管式万能試験機を用いて測定した。
- e. ヤング係数：圧縮強度試験時にコンプレッソメーターを用いて圧縮歪を測定し、最大圧縮強度の1/3におけるヤング係数を算出した。
- f. 中性化深さと鉄筋の発錆状況：直径10cm、高さ20cmの中にD19、長さ10cmの鉄筋を1本、真ん中に入れた供試体を上記d.と同じ材令7日まで20℃水中養生した後、材令28日まで温度20℃・湿度80%の恒温室に封かん状態にして放置し、材令28日から温度20℃・湿度60%・CO₂濃度10%の促進槽内に2カ月間及び4カ月間放置した場合と表一5に示すごく普通の屋外に材令1年及び3年自然暴露した場合の平均中性化深さの測定と鉄筋の発錆状況を肉眼で観察した。なお、平均中性化深さは測定時に100トン電子管式万能試験機を用いて割裂し、その割裂面の塵埃を取り除いた後、1%濃度のフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、紫赤色にならなかった部分を中性化したものと断定し、供試体の高さ方向の中心部とその上下1cm間隔に、それぞれ2点の計5点、その両側で合計10点の深さをmm単位のノギスを用いて測定し、最終的に平均した。
- g. 凍結融解作用に対する抵抗性：供試体は10×10×40cmを用い、ASTM C 290(Standard Method of Test for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing in Water)によって相対動弾性係数を求めた。
- h. 長さ変化率：供試体は10×10×40cmを用い、その長手方向の真ん中にD19を1本挿入した場合(拘束)と、しない場合(自由)、前養生は上記d.と同じとし、材令28日から20℃・60%の雰囲気中と表一5に示すごく普通の屋外(地盤面より30cmのところ)で2点支持)に放置した場合の長さをJIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ試験方法)に示すコンパレーターを用いて測定し、その変化率を算出した。なお、基長は材令28日とした。
- i. 重量変化率：上記hの供試体について長さを測定した0.1gまで測定できる直示天秤を用いて重量を測定し、その変化率を算出した。なお、基長は材令28日とした。

表一5 3年間屋外自然暴露したところの気象条件

年	1986				1987								1988					
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	.12	1	2
気温(℃)	22.3	14.9	9.4	5.4	3.0	4.0	7.4	12.8	18.2	21.5	25.7	25.7	21.8	17.8	9.2	4.5	4.8	2.5
湿度(%)	80.3	74.3	68.8	64.5	59.7	64.6	63.6	61.4	68.2	71.5	79.7	81.8	82.7	77.9	73.2	74.0	63.2	51.8
風速(m/s)	1.76	1.85	1.88	2.26	2.56	2.48	2.67	2.37	2.10	2.07	1.92	1.94	1.68	1.65	1.92	1.75	2.29	2.62
降水量(mm)	148.0	67.5	15.0	54.5	11.5	30.5	68.5	11.0	77.0	95.5	221.0	119.0	243.5	85.5	57.5	28.5	14.5	4.5
年	1988				1989													
月	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
気温(℃)	6.7	12.3	17.0	21.3	21.7	25.8	21.6	15.0	8.3	5.2	5.6	5.1	7.6	13.7	16.3	19.8	23.2	25.9
湿度(%)	62.1	64.2	67.5	77.3	83.0	82.1	85.1	74.0	64.6	57.3	64.0	66.7	63.3	61.5	76.0	74.1	81.6	79.1
風速(m/s)	2.46	2.23	2.42	2.24	1.80	1.98	1.44	1.73	1.96	2.41	2.48	2.33	2.45	2.74	1.82	2.06	1.98	1.91
降水量(mm)	93.5	73.5	170.0	161.0	153.5	252.5	322.5	65.0	12.0	0	38.0	76.0	57.5	126.0	180.0	223.5	280.0	196.5

[注] 本表の数値を平均すると気温は14.0℃、湿度は70.7%、風速は2.20m/s、降水量1280mm/年である。

j. 耐熱性：直径10cmの供試体を用い、上記d.と同じ前養生を施した後、材令28日から110℃の電気乾燥炉へ1年間放置したときの圧縮強度とヤング係数を測定し、同じ期間20℃水中養生した場合の値と比較した。なお、温度の昇降勾配は2℃/hrとした。

3.2 目標とした調査

a. W/C：材令28日圧縮強度が225kgf/cm²になるように筆者らのデータ¹⁾よりW/Cを案出し、試し練りを行い、最終的にW/Cを定めた(表-6)。

b. スランプ：18±2.5cmとした。

c. 空気量：4±1%とした。

3.3 コンクリートの練り混ぜ、その他の条件

a. 打ち込み日 1986年8月18日(月)

b. ミキサは容量100ℓの強制攪拌式ミキサ、骨材は表乾状態のものを、それぞれ用い、3分間練り混ぜた。

c. 練り上げたフレッシュコンクリートはミキサから速やかに練り板に受け、練り直しを行ってからスランプ及び空気量を測定した。その後各供試体の型わくへ打ち込み直ちに20℃・80%の恒温室に入れ、翌日キャッピングを施した。

4. 結果と検討

表-6及び図-1～12に示し以下に検討する。

a. 打ち込んだコンクリートは目標としたスランプ及び空気量が得られ、ワーカビリティはすべて良好であった(表-6)。

b. 材令28日圧縮強度を225kgf/cm²程度とした場合の圧縮強度の発現傾向は次の通りである。

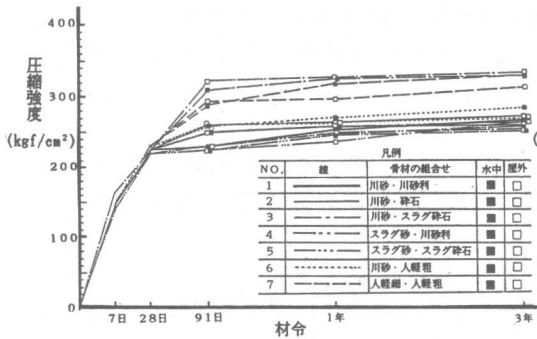


図-1 材令と圧縮強度との関係(セメント:N)

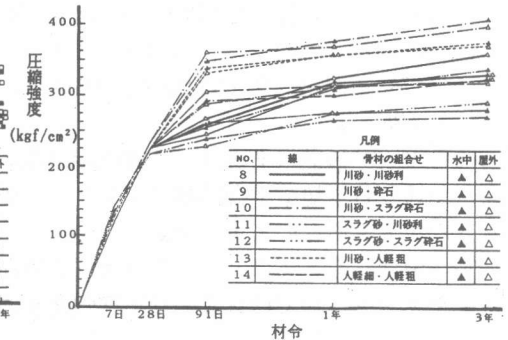


図-2 材令と圧縮強度との関係(セメント:BB)

表-6 実際に得られたコンクリートの調査と材令28日圧縮強度(F₂₈)

セメント種類	No.	細骨材	粗骨材	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	フレッシュコンクリート単重 (t/m ³)	ワーカビリティ	F ₂₈ (kgf/cm ²)
N	1	川砂	川砂利	6.0	2.0	5.0	4.23	161	2.284 (2.2)* ²	良	225
	2	川砂	碎石	6.4	1.9	4.9	4.44	162	2.303 (2.2)* ²	良	225
	3	川砂	スラグ碎石	6.4	1.85	4.9* ¹	4.37	161	2.229 (2.1)* ²	良	224
	4	スラグ砂	川砂利	5.8	1.75	4.7	4.08	161	2.304 (2.2)* ²	良	224
	5	スラグ砂	スラグ碎石	5.9	1.65	4.8* ¹	4.28	164	2.245 (2.1)* ²	良	219
	6	川砂	人軽粗	5.8	2.0	4.7* ¹	4.90	186	1.934 (1.7)* ²	良	228
	7	人軽細	人軽粗	5.7	2.0	4.7* ¹	4.93	179	1.708 (1.5)* ²	良	229
BB	8	川砂	川砂利	5.8	2.0	4.7	4.08	158	2.282 (2.2)* ²	良	225
	9	川砂	碎石	6.2	1.9	4.6	4.29	159	2.301 (2.2)* ²	良	225
	10	川砂	スラグ碎石	6.2	1.85	4.1* ¹	4.21	157	2.228 (2.1)* ²	良	233
	11	スラグ砂	川砂利	5.6	1.8	4.2	3.91	158	2.300 (2.2)* ²	良	217
	12	スラグ砂	スラグ碎石	5.7	1.7	3.9* ¹	4.13	161	2.240 (2.1)* ²	良	223
	13	川砂	人軽粗	5.6	2.0	4.1* ¹	4.74	183	1.925 (1.7)* ²	良	224
	14	人軽細	人軽粗	5.5	2.0	4.1* ¹	4.77	176	1.707 (1.5)* ²	良	223

[注] *¹骨材修正係数を差し引いた値を示す。*²()内の値は気乾単重を示す。

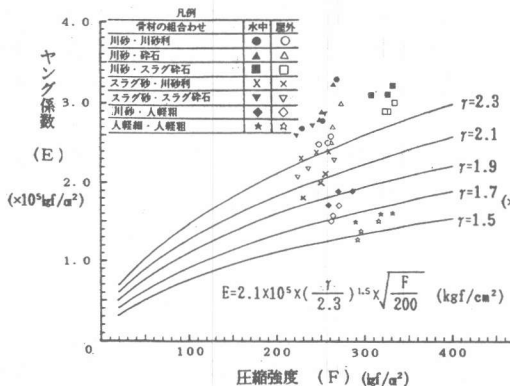


図-3 材令とヤング係数との関係(セメント:N)

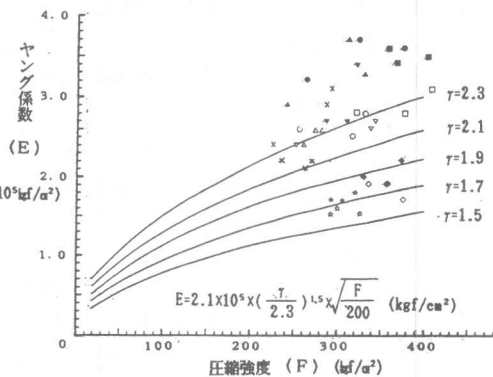


図-4 材令とヤング係数との関係(セメント:BB)

- ①セメントの種類によって発現が異なる。すなわち、材令28日の圧縮強度を100とすると、材令7日の圧縮強度比はセメントNが63~79(平均67)、セメントBBが53~64(平均57)で前者のセメントが従来より言われている通り大きい。材令91日ではNが102~145(平均116)、BBが105~155(平均128)、材令1年ではNが108~146(平均121)、BBが123~162(平均143)、材令3年ではNが114~149(平均126)、BBが126~176(平均152)で、いずれも後者のセメントが大きい(図-1~2)。
- ②骨材の種類によっても発現は異なる。すなわち人工軽量骨材や高炉スラグ砕石のように吸水率が大きい骨材の方が長期間にわたって強度が増進する(図-1~2)。
- ③材令28日以降の20℃水中養生と屋外自然暴露別では大きなちがいはない。すなわち、材令28日圧縮強度を100とすると、材令91日では水中が102~155(平均122)、屋外が102~151(平均122)、材令1年で水中が109~160(平均133)、屋外が108~162(平均131)、材令3年では水中が116~173(平均141)、屋外が114~176(平均137)である(図-1~2)。
- c. ヤング係数は上記b. 圧縮強度の発現傾向に似ている。これらは図-3~4に示した通り日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に用いている式によることができるといえよう(表-6)。
- d. 中性化深さについては次のような傾向が認められた。

①セメント種類では材令28日圧縮強度を同一にしたためか、いずれの場合も大差はない(図-5)。

- ②骨材種類では川砂・川砂利コンクリートは最も小さく、次が川砂・人軽粗コンクリートというように多少差違が認められた(図-5)。
- ③CO₂促進と屋外別では当然前者が大きい。これはCO₂濃度差(10%と0.03%)、温度差(20℃と14℃)、湿度差(60%と70.7%)が影響したためである(図-5)。

- e. 鉄筋の発錆はデータを示していないが、すべてのケースにおいて発錆は認められなかった。
- f. 凍結融解作用に対する抵抗性に

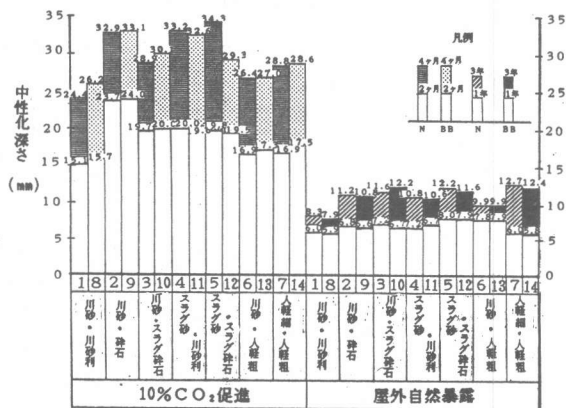


図-5 各種コンクリートの中性化深さ

ついて次のような結果を得た。

- ①セメントの種類では差違が認められない(図-6~7)。
- ②骨材種類ではNo.3と10、No.1と8、No.5と12、No.2と9のコンクリートは同程度で、差違が認められない。しかしNo.4と11は低下が多少大きくNo.6と13、No.7と14は低下が著しく大きい(図-6~7)。

g. 長さ変化率

屋外に放置した拘束供試体は膨張し、20℃・60%室に放置した供試体は収縮し、次のような傾向が見られた。

- ①屋外に放置した拘束供試体は期間が経つほど長さ変化率(膨張)は若干大きくなる。20℃・60%室に放置した自由供試体は期間が経つほど長さ変化率(収縮)は大きくなる。ちなみに3年間の長さ変化率は拘束が $+0.5 \times 10^{-4} \sim +1.9 \times 10^{-4}$ (平均 $+1.3 \times 10^{-4}$)、自由の場合が $-5.1 \times 10^{-4} \sim -8.7 \times 10^{-4}$ (平均 -6.9×10^{-4})である(図-8~9)。(× 10^{-4})
- ②セメントの種類の差違を見ると3年間の長さ変化率は先ず拘束はセメントNが $+1.2 \times 10^{-4}$ (平均)、BBが $+1.4 \times 10^{-4}$ (平均)、次に自由はNが -7.5×10^{-4} (平均)、BBが -6.4×10^{-4} (平均)なので、大きな違いはないといえよう(図-8~9)。
- ③骨材種類の差違を見ると3年間の長さ変化率は拘束の場合大きな違いはないが自由の場合多少差違が認められた。すなわち、セメントペーストと骨材表面が化学反応を起こすと思われる¹⁾スラグ砂・スラグ碎石コンクリートが最小で、以下川砂・碎石、川砂・スラグ碎石、人軽細・人軽粗、川砂・川砂利、スラグ砂・川砂利の順で、川砂・人軽粗コンクリートが最も大きい。

- ④自由供試体及び拘束供試体にはひび割れの発生が認められなかった。

h. 重量変化率

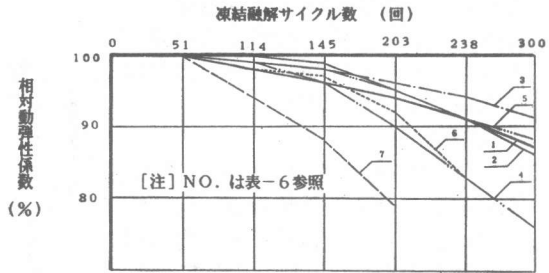


図-6 相対動弾性係数(セメント:N)

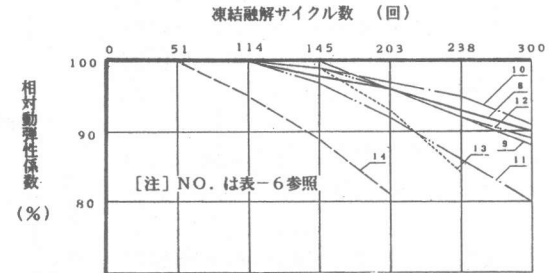


図-7 相対動弾性係数(セメント:BB)

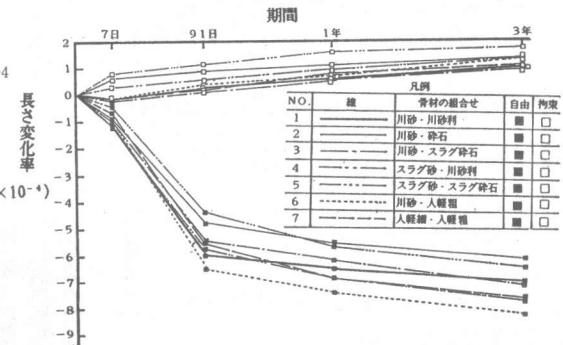


図-8 長さ変化率(セメント:N)

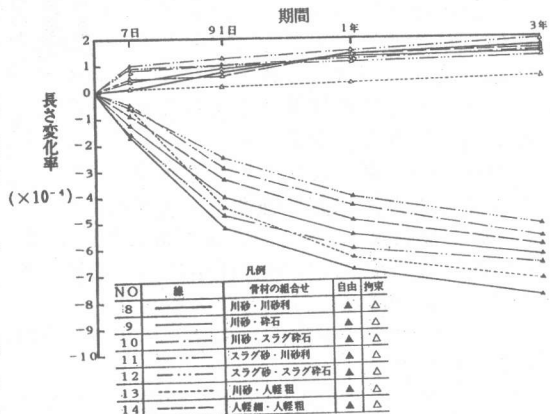


図-9 長さ変化率(セメント:BB)

拘束及び自由供試体の重量変化率（減少）は長さ変化率の範囲に比較してコンクリート種類による変化率が大きい（図-10～11）。

i. 耐熱性

①110°Cの熱を受けたコンクリートの圧縮強度やヤング係数は同一期間20°C水中養生したもの及び屋外自然暴露したものを100とすると圧縮強度は76、ヤング係数は53で、ともに小さい。とくに後者が小さい。いいかえれば熱の作用に対してヤング係数は影響を大きく受ける（図-1～2、12）。

②セメント種類による差を図-12の絶対値で見れば小さい。しかし上記 a. で述べたように同一期間20°C水中養生したものや屋外自然暴露したものと比較するとセメント N は圧縮強度比77、ヤング係数比62に対して BB は圧縮強度比74、ヤング係数比57で若干不利な結果になったが、これを上記 b. で述べた通り、長期材令における BB の絶対値が N より大きいのである。総じて見れば110°Cの熱を1年間受けた場合、セメント種類による差は小さい。

③骨材による差違

図-12に示した通り今回用いた骨材間では大差がない。

5. 結論

材令28日圧縮強度・スランプ・空気量を同じにした各種骨材を用いたコンクリートの実験研究から次の結論を得た。

- セメント及び骨材種類によって強度発現の程度が多少異なる。
- 材令28日以降においては20°C水中養生と屋外自然暴露は強度上、大差はない。
- ヤング係数は上記 a.～b. の傾向に似ている。
- 中性化深さ及び凍結融解作用に対する抵抗性は、セメント種類では差違がほとんどないが、骨材種類では差違がある。
- 鉄筋の位置まで中性化したコンクリートがなかったためか、鉄筋の発錆はいずれも認められなかった。
- 屋外に放置した拘束供試体は膨張し、20°C・60%室に放置した自由供試体は収縮する。それぞれの長さ・重量変化率の差違はセメント種類では小さいが骨材種類では大きい。
- 110°Cの熱を受けると圧縮強度よりヤング係数の方が大きく影響を受ける。セメント・骨材の種類による差違は小さい。

参考文献1) 依田 彰彦:高炉スラグをセメント混和材・骨材として使用したコンクリートに関する研究,昭和60年9月

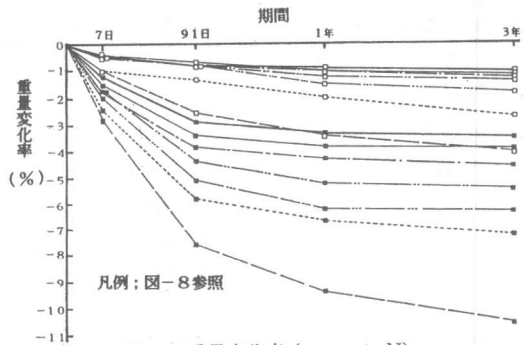


図-10 重量変化率(セメント:N)

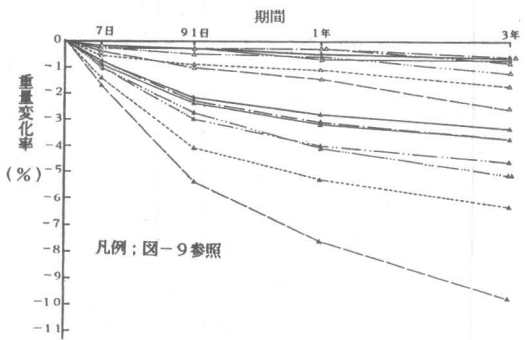


図-11 重量変化率(セメント:BB)

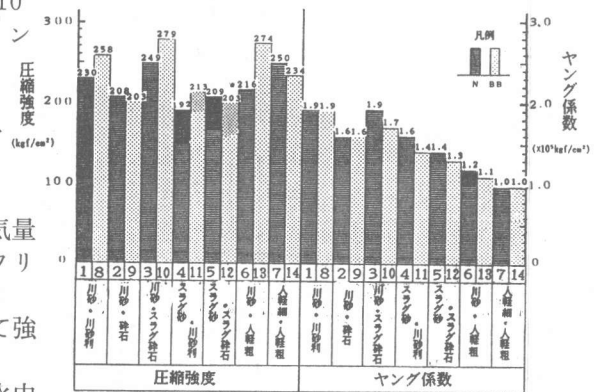


図-12 各種コンクリートの耐熱性実験結果