

[18] スラグ細骨材を用いた高強度のコンクリート製品の耐久性等に関する研究

正会員 関 博(早稲田大学工学部)
 正会員 児島孝之(立命館大学工学部)
 正会員 松下博通(九州大学工学部)
 正会員 ○奥村博昭(新日本製鐵スラグ事業開発部)

1. まえがき

スラグ細骨材は、数年前から実用化され、多岐にわたって利用されているが、高強度コンクリートへの利用は少ない。本研究は、スラグ細骨材を用いたコンクリート製品で、高強度を得るために加圧成形、真空処理、蒸気養生等を行ったものについて、クリープ、圧縮疲労、耐海水性試験のほか、耐久性等に関する試験を行った結果をとりまとめたものである。

2. 使用材料及び供試体の記号

セメントは圧縮強さ(28日)41.6 kgf/cm²のポルトランドセメント(宇部)、フライアッシュはブレーション値3.150 cm²/gのもの(電産磯子)を用いた。表-1に使用した骨材の一覧表を示す。

表-1 骨材の物理試験結果

骨材の種類	記号	表乾比重	絶乾比重	吸水率(%)	単位容積重量(kg/m ³)	実積率(%)	洗い損失量(%)	粗粒率PM	備 用	
細骨材	破砕風砕砂(新日鉄堺)	s ₁	2.90	2.87	1.1	1,890	65.7	5.04	2.62	疲労、凍結融解、耐海水性、吸水性
			2.88	2.85	1.0	1,919	67.3	9.86	2.03	クリープ
	球形風砕砂(新日鉄堺)	s ₂	2.89	2.88	0.3	1,860	64.5	0.21	4.03	疲労、凍結融解、耐海水性、吸水性
			2.88	2.87	0.3	1,900	66.0	1.21	3.65	クリープ
	水砕砂(新日鉄名古屋)	g	2.68	2.62	2.1	1,480	56.4	4.57	2.29	疲労、凍結融解、吸水性
粗骨材	川砂(大井川)	r	2.63	2.60	1.2	1,660	64.0	1.35	2.80	耐海水性
			2.64	2.57	2.7	1,510	58.7	1.18	6.69	疲労、凍結融解、耐海水性、吸水性
	高炉スラグ砕石(新日鉄堺)	S	2.61	2.56	2.2	1,520	59.4	0.63	6.80	クリープ
			2.70	2.69	0.4	1,510	56.3	0.65	6.72	疲労、凍結融解、吸水性
	山砕石(徳本市)	M	2.70	2.69	0.4	1,510	56.3	0.65	6.72	疲労、凍結融解、吸水性
玉砕石(大井川)	R	2.64	2.62	0.6	1,590	60.6	0.28	6.74	耐海水性	

各試験に用いた風砕砂は、s₁:s₂=1:1(重量比)の混合砂sとした。

コンクリートは、non-AEコンクリートとし、骨材の種類、混和材の有無等作製条件を変えた。それらの記号を表-2に示す。混和材はフライアッシュをセメント重量の12.5%内割配合した。加圧処理は、10 kgf/cm²で5分間加圧し、真空処理は、350mmHgで15~20分間吸引した。蒸気養生は、耐海水性試験のみマチュリティ

表-2 供試体の記号

細骨材	粗骨材	混和材	加 圧	養 生	コンシステンシー
表-1	表-1	P:有 N:無	P:有 N:無 V:真空式	A:蒸気 B:標準 C:常圧蒸気 D:無	-:VB 10秒 T:スランブ 10cm E:スランブ 8cm

300℃・h、他は240℃・h、常圧蒸気養生は65℃×3hrとした。コンシステンシーは、特に記述しない場合はVB10秒とし、クリープ試験ではスランブ10cm、耐海水性試験の一部を8cmとした。

3. 試験結果及び考察

3-1 クリープ試験

(1) 試験方法

クリープ試験は、10×10×40cmの供試体を脱型後1週間21±1℃の水中で養生し、さらに1週間21±1℃、70%RHで養生した。その後、供試体2本を直列にし、シース孔内に配置したφ23mmPC鋼棒を緊張して持続応力を導入した。測定は、ホイットモア型ひずみ計を用いた。同時に行った乾燥収縮試験は、10×10×40cm供試体をクリープ試験と同一条件で養生し、検長250mmのフーゲンベルガーひずみ計を用いて乾燥ひずみを測定した。ただし測定用プラグの貼付が不首尾のため乾燥開始後30日で再貼付したため、乾燥収縮ひずみの絶対量は測定で

きなかった。表-3にコンクリートの示方配合及び応力導入時(材令2週)のコンクリートの性質を示す。

(2) 結果及び考察

クリープ係数は、コントロール用供試体のひずみを差引いて求めた。

図-1に示すように加圧成形の有無では、前者は後者の2/3程度であるが、

乾燥に伴う重量減から水分逸散量を求めると、加圧成形したもののはしないものに比べ2/3程度であり、フライアッシュの有無で大きな差はみられない。この傾向はクリープ係数の挙動とほぼ一致している。また、乾燥開始31日以降の乾燥収縮ひずみも、同様な傾向であった。

コンシステンシーの差は見られなかった。

また、乾燥開始31日以降の乾燥収縮ひずみも、同様な傾向であった。

3-2 疲労試験

(1) 試験方法

疲労試験はφ6×12cmの小型円柱供試体で、表-4に示す6種の配合とし、疲労試験時の静的圧縮強度は各バッチごとに求めた。疲労試験は、繰返し速度600回/分の正弦変化応力で、その最小応力を静的圧縮強度の10%に固定し、最大応力は70~85%で変化させ、供試体が疲労破壊するまでの繰返し回数を求めた。

(2) 結果及び考察

疲労寿命の測定結果を表-5に示す。各繰返応力ごとに疲労寿命が対数正規分布するとして、 $\log N$ と平均値 $\overline{\log N}$ を求めた。最大応力比 S_1 と $\log N$ の関係の回帰式を求め、それを図-3に表わす。それぞれ

$$sSF: \overline{\log N} = -0.244 S_1 + 2.197$$

$$gSF: \overline{\log N} = -0.151 S_1 + 1.609$$

$$sMF: \overline{\log N} = -0.187 S_1 + 1.936$$

となり、三者で差は認められず一般の普通コンクリートの回帰式とも一致している。なお、フライアッシュを用いないシリーズは、寿命の測

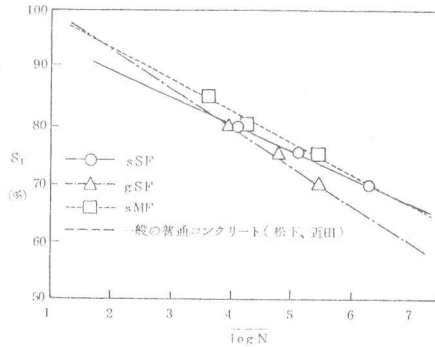


図-3 S₁-N 曲線

定結果のばらつきが大きく、供試体数が少なかったため、回帰式を求めるに至らなかった。ただし、最小応力比

表-3 コンクリートの配合及び応力導入時(材令2週)のコンクリートの性質並びに導入応力

記号	W(OP) (%)	単 位 量 (kg/m ³)					圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	導入応力 (kg/cm ²)
		W	G	F	S	G			
sSFPA	38.9	148	332.5	47.5	798	1130	721	4.2	168(23.3%)
sSNPA	39.7	151	380	-	824	1117	752	4.5	183(24.3%)
sSFNC	38.9	148	332.5	47.5	798	1130	497	3.6	117(23.5%)
sSFNCT	43.9	167	332.5	47.5	835	1047	391	3.5	89(22.8%)

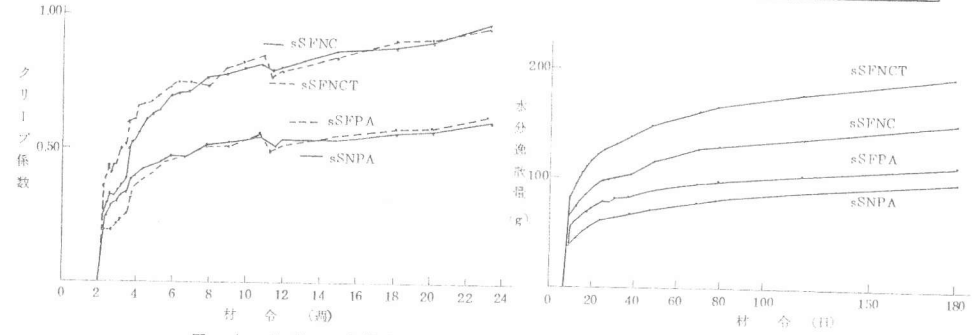


図-1 クリープ係数

図-2 水分逸散量

表-4 コンクリートの配合と試験時の圧縮強度

記号	単 位 量 (kg/m ³)					試験時 材令(日)	圧縮強度 (kg/cm ²)
	W	C	F	S	G		
sSFPA	149	332.5	47.5	863	1086	12.5	875
sSNPA	156	380	-	904	1049	12.4	879
gSFPA	165	332.5	47.5	663	1163	13.7	838
gSNPA	171	380	-	701	1128	15.8	801
sMFPA	147	332.5	47.5	823	1153	12.6	862
sMNPA	156	380	-	863	1110	14.1	847

表-5 疲労寿命の測定結果と平均疲労寿命

S ₁ (%)	N				S ₁ (%)	N			
	N	log N	$\overline{\log N}$	log N		N	log N	$\overline{\log N}$	log N
sSF	75	2240	3.35	4.33	70	1861670	6.27	6.32	6.30
		6540	3.82			2000000	6.30		
		54750	4.74			2000000	6.30		
		56480	4.75			2000000	6.30		
		100880	5.00			2000000	6.30		
		100880	5.00			2000000	6.30		
	80	5150	3.71	4.69	75	2350	3.37	5.10	5.10
		85260	4.93			4590	3.66		
		88310	4.95			100630	5.00		
		149620	5.17			2000000	6.30		
		3580	3.55			3350	3.53		
		4440	3.65			7210	3.86		
85	6210	3.79	3.81	80	70530	4.85	4.08	4.08	
	17050	4.23			2120	3.33			
	33380	4.52			2930	3.47			
	48640	4.69			112770	5.05			
	109660	5.04			2000000	6.30			
	2000000	6.30			2000000	6.30			
sSN	75	6680	3.82	5.42	70	210	2.32	5.07	5.07
		15670	4.20			6580	3.82		
		18280	4.26			6600	3.82		
		37910	4.58			8620	3.94		
		6680	3.82			974800	5.99		
		1126900	6.05			1126900	6.05		
	80	2210	3.34	4.22	75	1770	3.25	4.32	4.32
		3670	3.56			42600	4.63		
		5600	3.75			42880	4.63		
		32480	4.51			61770	4.79		
		731370	5.86			10840	4.04		
		2000000	6.30			27930	4.45		
gSF	70	9970	4.00	6.02	70	2000000	6.30	5.50	5.50
		14670	4.17			2700	3.43		
		45840	4.66			114190	5.06		
		447330	5.65			751010	5.88		
		551030	5.74			4090	3.61		
		28350	4.45			8990	3.95		
	75	49300	4.69	4.84	75	26400	4.42	4.79	4.79
		142910	5.16			2000000	6.30		
		223990	5.35			2000000	6.30		
		9970	4.00			2000000	6.30		
		14670	4.17			2000000	6.30		
		45840	4.66			2000000	6.30		
80	49300	4.69	4.91	80	4090	3.61	3.99	3.99	
	142910	5.16			8990	3.95			
	223990	5.35			26400	4.42			
	9970	4.00			2000000	6.30			
	14670	4.17			2000000	6.30			
	45840	4.66			2000000	6.30			

S_2 も考慮した平均疲労寿命の関係式を $\overline{\log N} = K \cdot (1 - S_1) / (1 - S_2)$ とすると、フライアッシュの有無にかかわらず、 $K = 1.8.6$ とすることができる。以上より、風砕砂、水砕砂を用いた加圧による高強度コンクリートの疲労強度は、一般のコンクリートとほぼ同程度で、高性能減水剤を用いた高強度コンクリートより小さいものと考えられる。

3-3 凍結融解試験

(1) 試験方法

本試験に供したコンクリートは、表-4の内 sMNP A を除いた5種類とした。供試体は $76 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の角柱で各種類とも3本1組とし、ASTM C 666 に示された方法により試験した。なお、凍結融解試験開始までに各供試体とも約30日間 20°C 水中養生して、凍結融解の作用サイクルは300サイクルまでとした。

(2) 結果及び考察

図-4に相対動弾性係数の推移を示す。いずれの種類のコクリートとも相対動弾性係数が90%以上の良好な耐久性を示した。これは、加圧により余剰水をしぼり出し、空隙水の少ない密実なコンクリートが得られたためであろう。

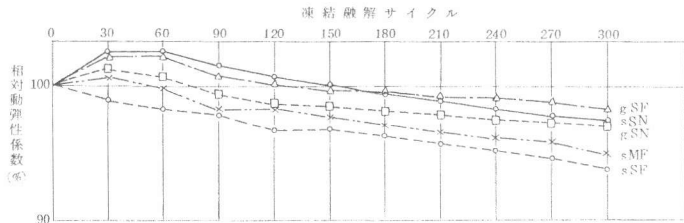


図-4 相対動弾性係数の推移

3-4 耐海水性試験

(1) 試験方法

本試験に供したコンクリートの示方配合及び圧縮強度を表-6に示す。試験は、図-5に示すように純曲げスパン6cmとして、センターホールジャッキで載荷 (rRNP N と rRNV A は3.6t、その他は2.4t) して、ひび割れを発生させ促進養生により鉄筋を腐食させた。促進養生中、ナットを介して載荷重を持続させた。養生は、自動プログラム制御方式のコンクリート劣化装置を使用して、 40°C 、40%の恒温恒湿に調整し、期間は1ヶ月とした。ただし、1サイクル12時間とし、1サイクルにつき1回3時間の塩水 (NaCl 3%溶液) を噴霧を行ったので、噴霧後湿度が40%の元の状態に戻るのに約7.5時間を要した。

表-6 コンクリートの示方配合及び圧縮強度

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				相対強度 (kg/cm ²)	供試体数
			W	C	S	G		
rRNP N	36	40	151	420	735	1110	784	12
rRNVA	36	40	151	420	735	1110	606	8
rRNNAE	55	43	173	314	808	1073	362	10
sSNNA	41	44	156	380	904	1049	585	2
rSNNA	45	38	171	380	701	1128	628	2

*養生は、蒸気養生後00~126日気中養生し、さらに28日促進養生(耐海水性試験の促進養生と同一)とした。

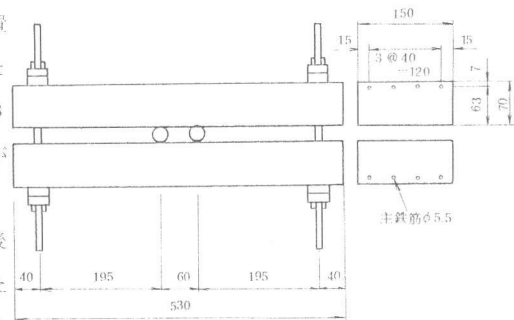


図-5 載荷方法

促進試験前及び完了後に測微計でひび割れ幅を測定し、その後ナットをはずして、コンクリート劣化装置から供試体を搬出した。その供試体を解体して鉄筋をとり出し、腐食状況を調査した。また、塩水噴霧したコンクリート中の塩分量 (Cl^-) の蓄積を調べるため

に、鉄筋のかぶり部分のコンクリート片を対象として、鉄乳バチで 1.05μ 全通程度に粉碎した試料を、 90°C の温浴に3時間浸漬して Cl^- を抽出させた後、 $1/10 \text{ N}$ 硝酸銀溶液で滴定し(モル法)、 NaCl 量を算出した。

(2) 結果及び考察

鉄筋の腐食は、発生箇所、形、色など多種多様の形態を示し、明瞭な傾向をつかむことはできなかった。中性化深さは、最大で1mm程度であり、中性化による腐食はひびわれ部以外では起こっていないと考えられる。スラグ粗骨材を用いたコンクリート (sSN、rSN) は、同様な腐食の状況を示しており供試体が少なかったため、同一グループとし

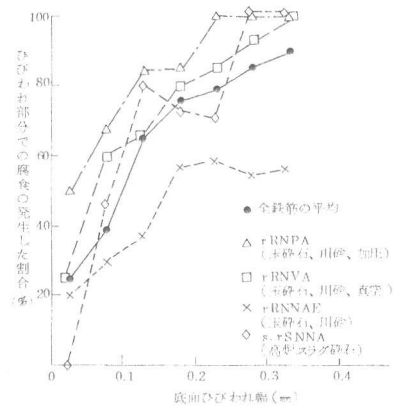


図-6 ひびわれ幅と腐食の発生した割合

て扱った。図-6にひびわれ幅と腐食の発生した割合を示す。全鉄筋の平均では、ひびわれ幅が0.2mmを越えるとひびわれ部分の約80%で腐食が生じている。また、rRNPA(加圧)、rRNVA(真空)、rRNNAEの順にひびわれ部での腐食発生率は低下しており、高強度ほどひびわれ部分での腐食発生の可能性は高い。

表-7に Cl^- 浸透量の測定結果を示す。強度が小さいほどコンクリート中の塩分量は増加しており、ひびわれ部以外での腐食の発生割合が多いという、図-6の結果と一致している。高強度コンクリートは緻密で、 Cl^- が浸透しにくく、ひびわれのない部分での耐食性に富んでいると考えられる。

表-7 コンクリート中のNaCl含有量

供試体の種類	試料数	変動係数(%)	NaCl含有率(%)
rRNPA	6	1.2	1.11
rRNVA	6	1.1	1.79
rRNNAE	6	1.9	2.56

3-5 吸水性試験

(1) 試験方法

供試体は、疲労試験に用いた $\phi 6 \times 12$ cmの内柱供試体で各3本とし、種類は表-4に養生条件を変えた図-7の②、③、④、⑦、⑨、⑪、⑫を加えた計12種類とした。試験は供試体を100~110℃で72時間乾燥させてから絶乾重量(W_1)を測定し、その後、常温近くまで冷却した後、0、4、8、24、48時間後の水中重量(W_T)を測定した。さらに供試体を水中で煮沸してから、その水中重量(W_2)と表乾重量(W_3)を測定し、この値を ∞ 時間後におけるものとした。コンクリートの吸水率を次式により求めた。

$$\infty \text{時間後} \quad q_{\infty} = (W_3 - W_1) / (W_3 - W_2) \times 100 \quad (\%)$$

$$T \text{時間後} \quad q_T = \{ (W_1 - W_1) - (W_2 - W_T) \} / (W_3 - W_2) \times 100 \quad (\%)$$

(2) 結果及び考察

図-7に試験結果を示す。図-8は、骨材の吸水率と単位骨材量の積和とコンクリートの吸水率(q_{∞})の関係で、キャッピングを除去した際に形状が不良となった⑧sMFPAを除いて考えると、骨材の吸水率が大きいほど q_{∞} も大きくなっている。また、加圧の有無でみると、加圧したものは、しないものより0.5%程度小さい。以上より、吸水率の小さいコンクリートを得るためには、加圧することは有効である。

4 結論

スラグ細骨材を用いた加圧式高強度コンクリートは、普通骨材の高強度コンクリート(密実なコンクリート)の一般的性状とほぼ同様な性状を示した。なお、加圧コンクリートの特徴は、無加圧の普通コンクリートに対して次のことがいえる。

- ① クリーブ: クリーブ係数は、無加圧の普通コンクリートの2/3程度。
- ② 疲労: 疲労強度は、無加圧の普通コンクリートと大差ない傾向にある。
- ③ 凍結融解: 300サイクル後の相対動弾性係数は90%以上。
- ④ 耐海水性: 鉄筋の腐食は、ひびわれ部分に集中し、コンクリート中の Cl^- 量は小さい傾向がある。
- ⑤ 吸水性: コンクリートの吸水率は、無加圧の普通コンクリートより約0.5%小さくなる傾向にある。

本研究は、(社)日本材料学会スラグ骨材委員会の研究の一環として実施したもので、岡田 清委員長をはじめ、多くの委員のご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

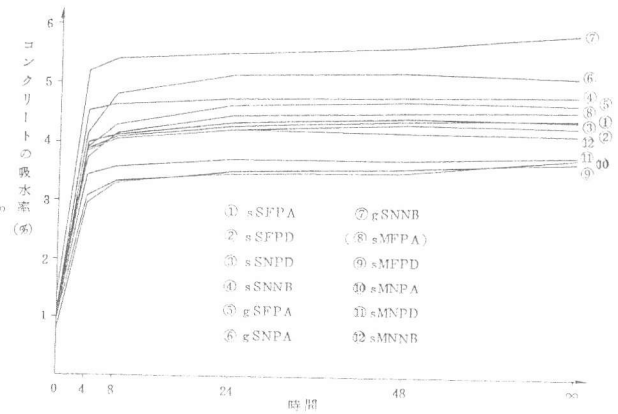


図-7 吸水時間曲線

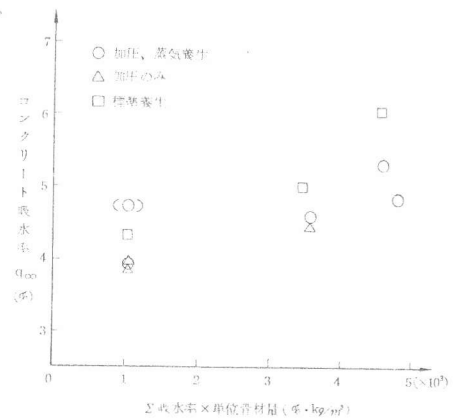


図-8 骨材の吸水量の影響