

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.594 Sept. 1987

沖縄産骨材を用いたコンクリートの耐海水性
(材令10年結果報告)

大 即 信 明
原 茂 雅 光
浜 田 秀 則

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. コンクリート用骨材としての沖縄産骨材の特性	3
2.1 特性および問題点	3
2.2 配合設計上の対策	6
3. 耐海水性試験の目的および概要	7
3.1 目 的	7
3.2 概 要	7
4. 供試体の製作	7
4.1 使用材料	7
4.2 供試体の製作	8
4.3 供試体の養生および暴露場所	8
5. 試 験 項 目	11
6. 試験結果および考察	11
6.1 圧縮強度	11
6.2 鉄筋の腐食状況	14
6.3 中性化深さ	15
6.4 塩化物含有量	15
6.5 考 察	15
7. 結 論	17
8. あ と が き	17
参 考 文 献	17

Durability of Concrete with Aggregates of Okinawa in Marine Environment (After 10 years' Exposure)

Nobuaki OTSUKI*
Masamitsu HARAMO**
Hidenori HAMADA**

Synopsis

Crushed stone and sea sand are generally used for concrete in Okinawa because of no ordinal river aggregate. The properties of these aggregates are inferior to those of ordinal river aggregates.

The paper discusses the problems and countermeasures on the durability of concrete in marine environment with aggregates of Okinawa, comparing with that of concrete with ordinal river aggregate.

In this exposure test, the exposure period is 10 years, and the testing items are compressive strength, chloride content, and carbonation of concrete, and corrosion of embedded steel bars. The main experimental factors are the kind of aggregate, the kind of cement, and the environmental condition (atmospheric, tidal, or submerged).

The main conclusions are as follows;

- (1) With ordinary portland cement, the strength reduction of concrete with aggregates of Okinawa is a little more compared with that of concrete with ordinal ones. Also, the corrosion of embedded bars in concrete with aggregates of Okinawa is a little more than that in concrete with ordinal ones. The corrosion, however, is not so severe as to crack the concrete.
- (2) Using blast furnace slag cement instead of ordinary portland cement, the strength reduction is not recognized.

* Chief of the Materials Laboratory, Structures Division

** Member of the Materials Laboratory, Structures Division

沖縄産骨材を用いたコンクリートの耐海水性 (材令10年結果報告)

大 即 信 明*
原 茂 雅 光**
浜 田 秀 則**

要 旨

沖縄県は、コンクリート用骨材として、品質の良くない沖縄産骨材を使用せざるを得ない状況にある。

本文は、沖縄産骨材を用いたコンクリートの耐海水性を一般の河川産骨材を用いたコンクリートの耐海水性と比較して、問題点および対策を検討するものである。耐海水性の試験期間は10年間とし、試験項目は、圧縮強度の経年変化、鉄筋の腐食性状、コンクリート中の塩化物含有量および中性化深さ等である。試験要因としては、骨材の種類、セメントの種類および環境条件（陸上部、感潮部、および海中部）である。

主要な結論は以下のとおりである。

(1)普通ポルトランドセメントを用いた場合、沖縄産骨材を用いたコンクリートの強度の経年変化および鉄筋の腐食は、一般の骨材を用いたものに比較して劣る傾向を示す。なお、全体としてみると、鉄筋の腐食は軽微で、コンクリートにひびわれを生じさせたものはない。

(2)普通ポルトランドセメントにかえて高炉セメントB種を使用すると、沖縄産骨材を用いたコンクリートにおいても材令10年の強度が材令28日強度を下回ることはない。

1. ま え が き

我が国では、一般的なコンクリート用骨材として従来、良質の河川産骨材を主に使用してきた。しかし、骨材需要の増加、および河川産骨材の採取規制などにより現在では、品質のさほど良くない骨材の使用を、余儀なくされている。そのために、今後は、コンクリートを施工する際、品質のさほど良くない骨材でも、うまく使用することが必要である。

このような品質のさほど良くない骨材を使用せざるを得ない典型的な地域としては、沖縄県があげられる。ここには、大きな河川がないため、コンクリート用骨材としては、粗骨材として碎石および細骨材として海砂を用いているのが現状であり、その骨材の品質にはいろいろな問題点がある。

当研究室では、その沖縄産骨材の基礎的性質を、他の一般的に使用されている骨材と比較するとともに、それ

らを使用したモルタル、コンクリートの圧縮強度等の基礎的性質を比較、検討した。これらの検討結果は港研資料No. 240¹⁾として報告した。初期材令におけるコンクリートの性質については、この資料で足りると考えられるが、さらに耐海水性に関する情報も必要と考え、耐海水性試験を引き続いて行った。

本文は、長期材令における沖縄産骨材を使用したコンクリートの耐海水性試験の材令10年経過報告である。

2. コンクリート用骨材としての沖縄産骨材の特性

コンクリート用骨材としての沖縄産骨材の特性、問題点およびその対策を港研資料No. 240よりまとめる。なお、対象とした骨材の産地を図-1に示す。

2.1 特性および問題点

(1)粗骨材の物理試験結果を表-1に示す。粗骨材は、大きく分けて琉球石灰岩碎石（中南部産、宮古島産碎石）

* 構造部 材料施工研究室長

** 構造部 材料施工研究室



図-1 使用した沖縄産骨材の産地

と古生層石灰岩砕石(本部産砕石)の2つがある。両者とも粒形が悪く、それに伴い実績率が小さい。また、古生層石灰岩砕石は、河川産骨材に比較して比重、吸水率とも遜色はないが、琉球石灰岩砕石は、比重が小さく吸水率が大きいという欠点を有する。

(2)細骨材の物理試験結果を表-2に示す。細骨材は、厳密に言えば砂丘砂もあるが、一般的には海砂に分類される。砂質としては、粒度、形状も多様で、地域においても種々のものがある。種々のものがあるにもかかわらず、共通して全国的にみて非常に比重が小さく(図-2)、吸水率は非常に高い(図-3)。また、実績率もすべて60%を下回っており低い値である。

また、万能投影機(Nikon V-16 A型)による観察か

らも特徴ある粒形を示していた。このなかで伊是名砂、中南部砂は粒子表面の凸凹が激しいことが認められた。これに対して宮古島砂、石垣島砂は比較的河川産の砂に近いものであった(図-4~8)。

(3)沖縄産骨材を用いたモルタルは、河川産細骨材を用いたモルタルに比較してブリージングは多く、また、水セメント比を低くしても、ある強度以上の強度を得るのは困難であった。

(4)沖縄産骨材を用いたコンクリートは、単位水量および単位セメント量がほぼ同じであれば、河川産骨材を用いたコンクリートと比較して、強度は低く、ワーカビリティは悪い。

表-1 粗骨材の物理試験結果

粗骨材の種類		最大寸法 (mm)	粗粒率	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	実積率 (%)	空隙率 (%)	すりへり減量 (%) *	安定性試験 (%) *
古生層石灰岩	本部 碎石	40	7.26	2.72	0.12	1520	56.0	44.1	24.0	2.0
琉球石灰岩	中南部碎石	40	7.35	2.41	3.99	1270	54.8	45.0	29.5	24.0
	宮古島碎石	25	7.46	2.46	2.74	1330	55.6	44.5	28.0	9.0
河川産粗骨材	相模川砂利	25	6.82	2.69	1.75	1730	64.3	35.7	—	—

(注) * : 参考文献1) による試験値
 なお、試験値は3回の平均値である。

表-2 細骨材の物理試験結果

細骨材の種類	粗粒率	洗い試験 (%)	表乾比重	吸水量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	実積率 (%)	空隙率 (%)	有機不純物	塩分含有量 (%)
伊是名砂	1.99	2.73	2.45	6.70	1380	56.9	43.1	合格	0.00
中南部研	2.33	2.06	2.45	5.78	1210	52.0	48.0	合格	0.00
宮古島砂	2.86	0.65	2.40	6.85	1380	58.5	41.5	合格	0.01
富士川砂	2.93	2.89	2.58	2.81	1650	65.3	34.7	—	—

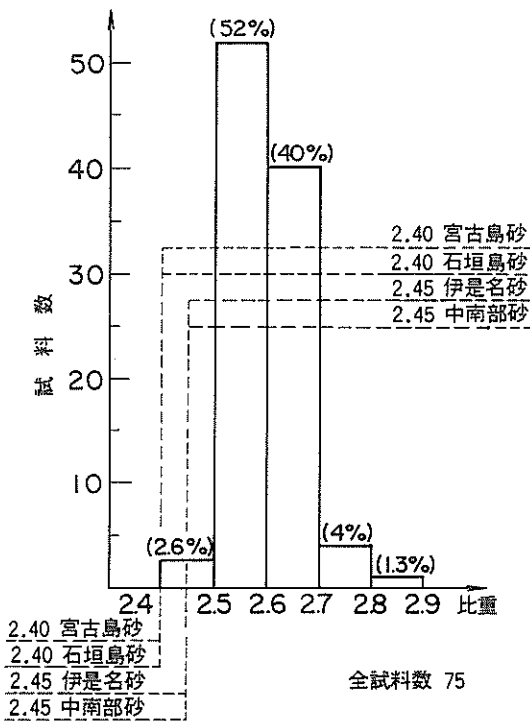


図-2 海砂の比重分布図

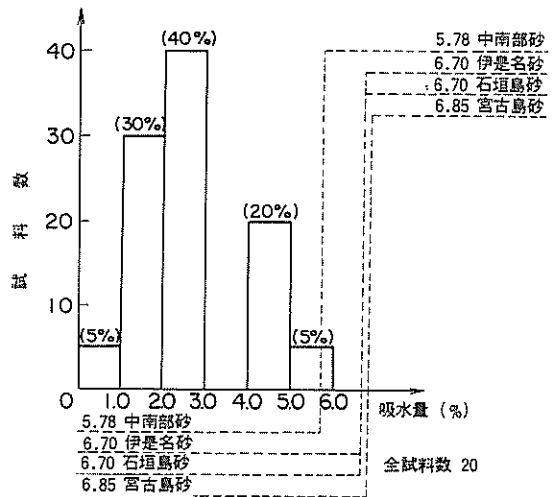


図-3 海砂の吸水量分布図

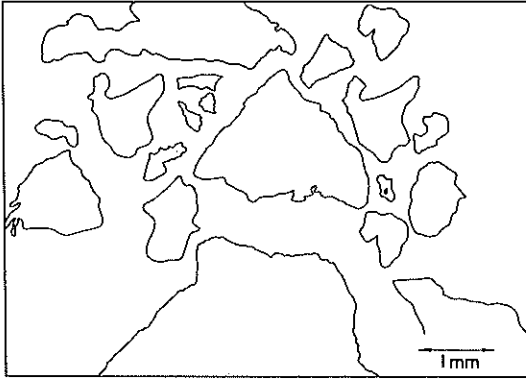


図-4 伊是名砂投影図

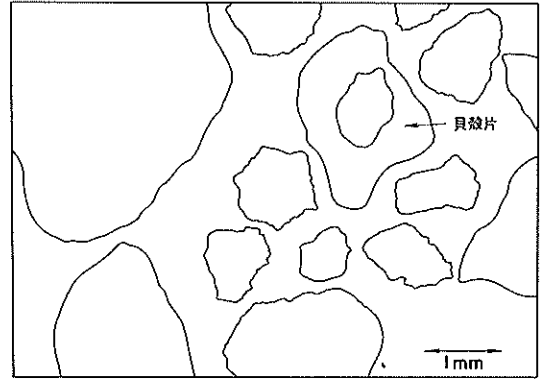


図-8 富士川砂投影図

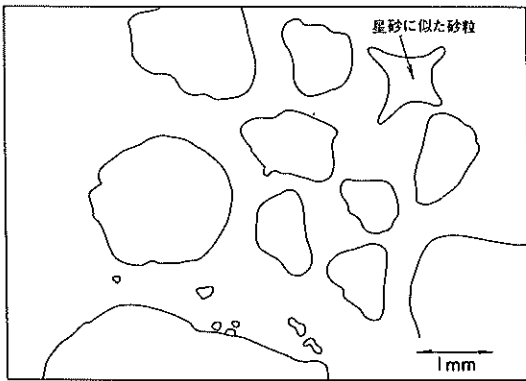


図-5 宮古島砂投影図

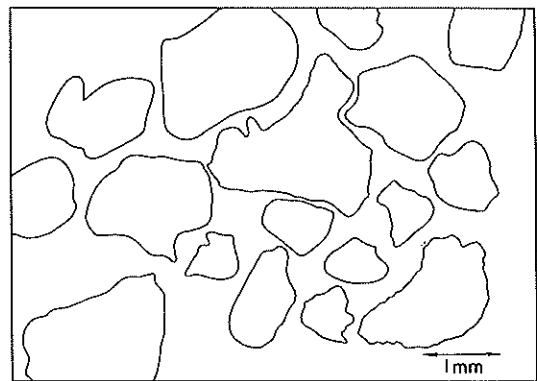


図-7 石垣島砂投影図

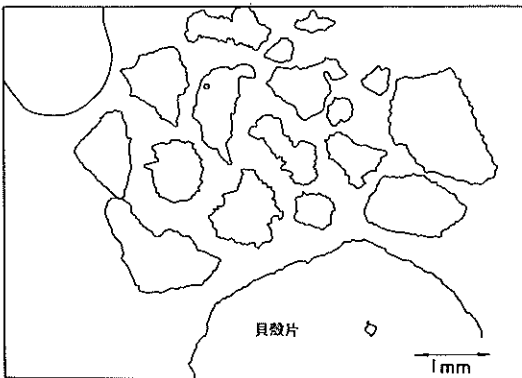


図-6 中南部砂投影図

実績率を高めること、ならびに、構造物の種類によっては琉球石灰岩碎石の使用は避けることが望ましい。

(2)粗骨材に関しては、構造物の種類によっては移入砂または砕砂等を混入して性状を改善した骨材を使用することが望ましい。

(3)沖縄産骨材を用いたコンクリートは、河川産骨材を用いたコンクリートと比較してワーカビリティが悪い。このため、強度を同程度にし、しかもワーカビリティも同程度にするためには、沖縄産骨材を用いたコンクリートの単位セメント量を河川産骨材を用いたコンクリートより 50 kg/m^3 程度以上多くすることが望ましい。ただし、単位セメント量が多いため水和熱の発生も多くなり、暑中コンクリートやマスコンクリートを施工する際には、一段の注意が必要となる。

(4)単位水量はできるだけ少なくすることが望まれる。

2.2 配合設計上の対策

(1)粗骨材に関しては、例えば碎石機としてインペラブレーカー等を用いるなどして、できるだけ粒形をよくし、

3. 耐海水性試験の目的および概要

3.1 目的

2章で述べたように沖縄産骨材を用いたコンクリートの初期材令における特性は、一般のコンクリートに比較して劣る点が多い。港湾のコンクリートとして用いられた場合、長期のコンクリート自体の強度および鉄筋コンクリート部材として用いられた場合の鉄筋の防食性能についても検討の要があると判断した。

このため、この2つの項目についての長期の耐海水性試験を行うこととした。

3.2 概要

主として次の3種の粗骨材と細骨材の組み合わせのコンクリートの試験を行った。すなわち、沖縄本島を対象とした本部砕石（古生層石灰岩）と伊是名砂（形状は凸凹が多い）を用いたコンクリート、宮古島を対象とした宮古島砕石（琉球石灰岩）と宮古島砂（形状は一般の砂に類似）を用いたもの、および河川産の砂利、砂を用いたものである。配合条件としては単位セメント量を250,300,350 kg/m³程度とし、そのおのおのについてスランブを12±2 cmとなるように定めた。すなわち、コンシステンシー一定という条件で耐海水性を比較したものである。なお、水セメント比を同一とせずコンシステンシー一定という条件で行ったのは、この条件下での配合設計の基本試験（港湾技研資料No. 240）と同時に供試体を製作したためであった。

コンクリート自体の耐海水性に関するものとしては、圧縮強度を測定した。鉄筋の防食性能に関するものとしては、鉄筋の腐食状況観察、電気化学的測定を行った。

さらに、中性化深さおよび塩化物含有量（塩素イオン）の測定を行った。なお、塩化物含有量は、防食性能に関連する。

4. 供試体の製作

4.1 使用材料

(1) セメント

長期材令での圧縮強度試験用供試体に用いるセメントとして、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種の2種、鉄筋腐食試験用供試体として、普通ポルトランドセメントを用い供試体を製作した。セメントの物理試験結果は表-3に示すとおりである。

(2) 骨材

細骨材は、伊是名砂（伊是名産）、中南部砂（金武産）、宮古島砂（吉野産）、および富士川砂（静岡県産）、を使用した。粗骨材としては、本部砕石（名護産）、中南部砕石（読谷産）、宮古島砕石（砂川、友利、野原産）、および相模川砂利（神奈川県産）を使用した。物理試験結果は、表-1、2に示すとおりである。

本研究で使用した沖縄産骨材について概略を述べる以下のとおりである。

a) 細骨材

① 伊是名砂

沖縄県北部の伊是名村屋那覇島に産し、陸上部に滞積したものである。石質は、琉球石灰岩粒子と思われ²⁾非常に白っぽく表面は凸凹している。

② 中南部砂

沖縄本島金武村に産し、陸上部に滞積したものである。石質は、千枚岩粒子と思われ²⁾黒っぽく、貝殻片を多く含み、表面は非常に凸凹している。

③ 宮古島砂

宮古島吉野の海浜で産するものである。石質は、琉球石灰岩粒子と思われ²⁾黄褐色で丸みをおび、粒形が比較的よい。

前述した細骨材はいずれも非常に比重が小さく吸水率が大きい。

b) 粗骨材

表-3 セメントの物理試験結果

セメントの種類	比重	粉末度		凝結			安定性	フロー値 (mm)	強 さ							
		比表面積 (cm ² /g)	88μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)			曲げ強さ (kgf/cm ²)				圧縮強さ (kgf/cm ²)			
									1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.17	3140	1.1	27.7	2-48	4-05	良	257	—	36.8	53.5	73.2	—	145	243	412
高炉セメントB種	3.06	3650	0.9	29.1	3-25	4-46	良	256	—	31.0	43.7	72.9	—	118	207	415

沖縄で使用される粗骨材は、沖縄本島中南部、宮古島等に分布している琉球石灰岩、沖縄本島北部および石垣島に分布している古生層石灰岩があり、これらを碎石として使用している。

① 琉球石灰岩碎石（中南部産、宮古島産碎石）

第三紀の石灰岩を原石とした碎石であり、粒形が悪く多孔質で比重がやや小さく（約2.5）比較的軟質である。沖縄本島においては、一部建築用空洞コンクリートブロック等に用いている他は、構造用コンクリート骨材として用いてはいるが、一部の離島においては、他に骨材がないという理由から、構造用コンクリート骨材として用いている。

② 古生層石灰岩碎石（本部産碎石）

沖縄県で最も多く使用されている粗骨材であり、沖縄本島本部半島および石垣島において産出する。岩質は、緻密堅硬で、比重は2.7と大きく、破砕面はなめらかでつやがあるが、20mm以下のものは形状が不良で、扁平、細長いものが多く、実績率は60%を下回っている。

(3) 水

コンクリートの練り混ぜ水としては、一般の水道水を使用した。

(4) 混和剤

混和剤として、ポゾリスNo.5 L（日曹マスタービルダーズ(株)製）を用いた。

(5) 鉄筋

鉄筋は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に定めているφ9mmの丸鋼を長さ18cmとして使用した。埋め込み鉄筋は、表面の黒皮、錆等を除去するため、10%クエン酸二アンモニウム溶液に48時間浸した後、光沢

の見える状態とし使用した。

4.2 供試体の製作

製作する供試体は、圧縮強度試験用供試体、鉄筋腐食試験用供試体の2種類であり、配合等を以下のとおりと行った。

(1) コンクリートの配合

単位セメント量を250～350kg/m³と変化させ、スランプ12±2cmを目標とし配合を決定した。その結果は表-4に示す通りである。なお、このため、骨材の種類によって同一単位セメント量においても水セメント比が異なる点に注意を要する。

(2) 供試体の形状および配筋方法

供試体は、φ15×30cmの大きさのもので、圧縮強度試験用供試体、鉄筋腐食試験用供試体の2種類を製作した。

鉄筋腐食試験用供試体に埋め込む鉄筋は、1供試体につき3本とし、かぶりをそれぞれ2、4、7cmと変化させ、供試体の上下面から6cmの中央に配置させた。

4.3 供試体の養生および暴露場所

コンクリートは脱型後、標準水槽内で養生を行った後、打設後7日で水槽より取り出し屋外に静置する。その後、当研究所内、陸上部および海水循環水槽内（感潮部、海中部）、鹿児島県鹿児島新港南防波堤背面に設置してあるコンクリートボックス内（感潮部、海中部）にて暴露を行った。

なお、海水循環水槽内（感潮部、海中部）および鹿児島コンクリートボックス内（感潮部、海中部）の供試体設置位置を図-9および図-10に示す。

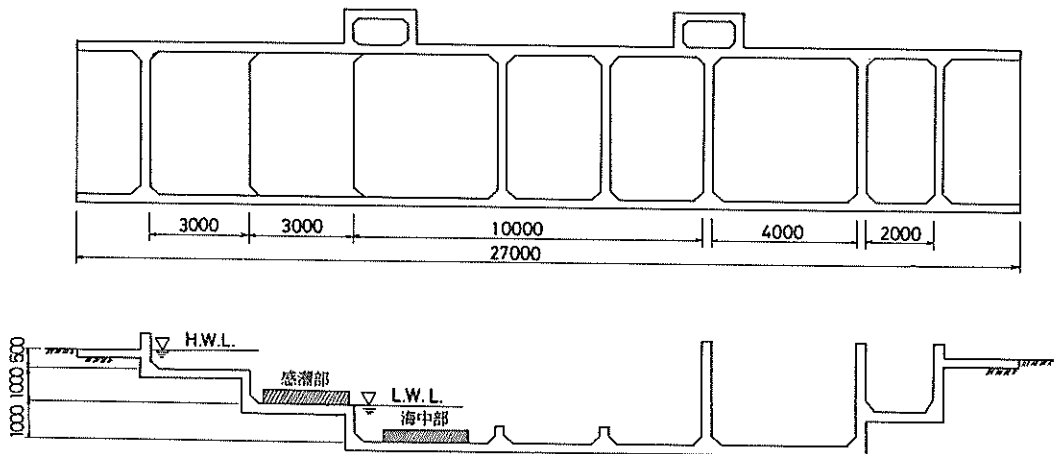


図-9 海水循環水槽内供試体設置位置

(単位: mm)

(a) 港研暴露試験用

表-4 コンクリートの配合

骨材の種類	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	① 空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
							②				混和剤 (I)	
							W	C	S	G	減水剤	A E 剤
本部碎石 および 伊是名砂	普通	40	13.1	4.1	56.5	34.5	143	253	621	1311	2.53	0.506
	普通	40	11.6	3.8	50.4	34.3	152	301	600	1274	3.01	0.602
	普通	40	13.3	4.3	48.6	34.3	146	300	599	1272	3.00	0.600
	普通	40	11.9	5.0	46.5	34.5	140	301	600	1275	3.01	0.602
	普通	40	11.9	4.6	43.4	34.7	132	304	618	1287	3.04	0.608
	普通	40	10.5	5.0	39.4	34.3	139	352	588	1245	3.52	0.704
	高炉	40	11.6	5.1	52.3	34.3	155	296	589	1248	2.96	0.592
	高炉	40	12.8	4.5	47.8	34.3	144	301	599	1270	3.01	0.602
	高炉	40	11.6	4.2	42.4	34.7	138	325	661	1373	3.25	0.650
宮古島碎石 および 宮古島砂	普通	25	11.9	(4)	60.9	35.4	148	243	663	1237	2.43	0.486
	普通	25	10.4	(4)	54.2	36.6	133	245	684	1141	2.45	0.490
	普通	25	12.0	(4)	51.0	37.2	121	237	638	1101	2.37	0.474
	普通	25	12.8	(4)	44.7	38.0	132	295	670	1118	2.95	0.590
	普通	25	13.6	7.9	44.5	38.0	126	283	643	1073	2.83	0.566
	普通	25	11.9	4.8	44.5	38.0	130	292	664	1107	2.92	0.584
	普通	25	11.7	7.6	44.5	38.0	126	283	644	1075	2.83	0.566
	普通	25	10.6	7.6	43.8	37.9	125	285	645	1081	2.85	0.570
	普通	25	13.3	(4)	38.1	38.0	131	343	657	1095	3.43	0.686
	普通	25	10.7	(4)	35.2	37.9	116	330	673	1127	3.30	0.660
	高炉	25	11.4	7.6	51.0	38.0	143	280	630	1053	2.80	0.560
	高炉	25	11.5	5.8	44.5	37.9	130	292	654	1098	2.92	0.584
高炉	25	10.0	5.8	43.6	37.9	128	293	657	1098	2.93	0.586	
相模川砂利 および 富士川砂	普通	25	10.0	3.0	46.8	29.7	148	316	554	1360	3.16	0.632
	普通	25	12.3	4.1	46.6	31.7	142	306	589	1320	3.06	0.612
	普通	25	13.2	4.8	41.8	31.6	129	308	593	1328	3.08	0.616
	普通	25	13.9	4.8	41.4	31.6	128	309	592	1333	3.09	0.618
	普通	25	13.5	4.1	40.3	31.6	126	312	600	1345	3.12	0.624
中南部碎石 および 中南部砂	普通	25	13.7	3.1	39.5	31.6	125	316	608	1363	3.16	0.632
	普通	40	10.7	6.1	62.5	38.1	170	272	631	1007	2.72	0.544

① ワシントン型エアメーターを用いて測定。() は空気量の推定値。

② 混和剤も含めた値。

(b) 鹿児島暴露試験用

骨材の種類	セメントの種類	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
							W	C	S	G	混和剤 (I)	
											減水剤	AE剤
本部砕石 および 伊是名砂	普通	40	13.0	4.3	54	40	162	300	302	493	3.0	0.6
	普通	40	13.0	4.3	54	40	162	300	302	493	3.0	0.6
	普通	40	10.9	3.1	66	37	162	250	273	498	2.5	0.5
	普通	40	13.0	4.3	66	38	162	300	306	498	2.5	0.5
	普通	40	11.7	3.4	46	40	160	350	305	498	3.5	0.7
	普通	40	14.9	3.0	52	36	157	300	305	504	3.0	0.6
	高炉	40	3.0	3.0	53	40	160	300	308	502	3.0	0.6
	高炉	40	14.9	3.0	51	40	155	300	306	497	3.0	0.6
宮古島砕石 および 宮古島砂	普通	25	13.8	4.7	62	39	154	250	303	495	2.5	0.5
	普通	25	11.7	3.7	52	35	155	300	276	535	3.0	0.6
	普通	25	11.7	3.7	52	35	155	300	276	535	3.0	0.6
	普通	25	20.0	—	51	39	155	300	321	524	3.0	0.6
	普通	25	19.6	3.9	51	41	155	300	305	535	3.0	0.6
	普通	25	13.8	4.0	44	38	154	350	303	494	3.5	0.7
	高炉	25	11.3	5.0	52	39	156	300	268	438	3.0	0.6
	高炉	25	15.4	4.4	51	40	155	300	306	499	3.0	0.6
相模川砂利 および 富士川砂	普通	25	11.4	3.0	53	36	160	300	274	532	3.0	0.6
	普通	25	11.4	3.0	53	36	160	300	274	532	3.0	0.6
	普通	25	13.9	3.4	56	38	159	300	306	500	3.0	0.6
	普通	25	13.9	3.4	56	38	159	300	306	500	3.0	0.6

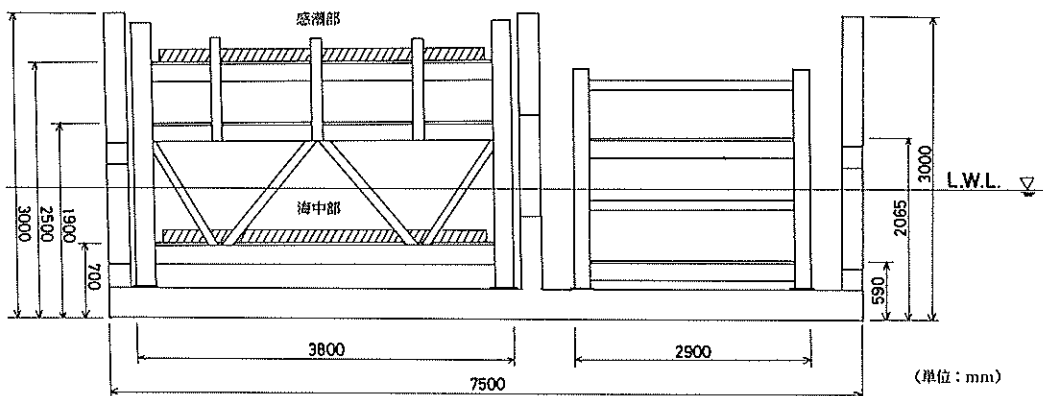


図-10. 鹿児島コンクリートボックス内供試体設置位置

5. 試験項目

(1) コンクリートの圧縮強度

圧縮強度は、材令28日、5年、10年において、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により行った。

試験の際、供試体は、原則として初期材令では片面、長期材令では両面をウッドメタルによりキャッピングを行うこととした。

(2) コンクリート中鉄筋の腐食状況および電気化学的測定（腐食傾向）

a) 腐食度の判定

港研および鹿児島で暴露を行った感潮部、海中部の供試体について、割裂後、埋め込み鉄筋表面を目視により観察をし、腐食度³⁾という尺度を用い判定を行った。

なお、判定の基準として、①腐食が全く認められず光沢のあるものを腐食度0、②腐食は認められないが鉄筋に光沢のなくなったもの、あるいは、光沢はあるが点錆等が一部に発生しているものを腐食度1、③点錆が広い範囲にあるものを腐食度2、④腐食が広い範囲にあるものを腐食度3、とした。ただし、腐食度は必ずしもその基準にあてはまるものではないため、それぞれの基準の間として0.5、1.5、2.5という判定も行った。

b) 腐食面積率

供試体より取り出した鉄筋について、腐食状況をトレスし、プランメーターを用い、腐食面積率の測定を行った。

c) コンクリート中鉄筋の電気化学的測定

材令10年において、供試体中鉄筋のアノード分極曲線測定により不動態のグレイド⁴⁾の判定を行った。

測定に用いる供試体は、上面から6cmの部分を割裂し鉄筋端部を露出させた後、リード線を半田付けし、エポキシ系接着剤でコーティングを行ったものである。

なお、不動態のグレイドとは、鉄筋の腐食しやすさを表す目安で、数値が少ない程腐食しやすいことを示す。すなわち、鉄筋の自然電極電位を E_n としたとき、電位 E が、 $E_n + 0.2 \text{ V} < E < +0.6 \text{ V}$ (v.s. 海水塩化銀電極)の範囲で電流密度を測定し、次のように判定した。

グレイド0：電流密度が、一度でも $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えるもの。

グレイド1：電流密度が、 $10 \sim 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの。

グレイド2：電流密度が、一度でも $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド1または3に含まれないもの。

グレイド3：電流密度が、 $1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの。

グレイド4：電流密度が、一度でも $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド1、2、および3に含まれないもの。

グレイド5：電流密度が、 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えないもの。

(3) コンクリートの中性化

鉄筋観察のため割裂した供試体縦方向について、中性化深さの測定を行った。

測定には、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を用い、最大中性化深さおよび平均中性化深さを測定した。なお、最大中性化深さは、表面近くにある粗骨材の粗粒分付近での中性化を除いて測定した。

(4) コンクリートの塩素イオン含有量

割裂後、供試体の鉄筋のかぶり7cm付近より、コンクリートを5~10g程度採取し水溶性塩素量（水溶液中にて24時間塩素イオンを抽出）を測定した。

試料は、採取したコンクリート5~10gより粗骨材を取り除いたモルタルを、 105μ ふるいにかけて、それを通過する程度に微粉碎したものをを用いた。

6. 試験結果

6.1 圧縮強度

材令10年までの圧縮強度の試験結果（2本の平均値）を表-5および図-11~13に示す。

表中の（ ）内の値は、鹿児島暴露供試体の σ_{28} を測定しなかったため、全く同一配合の σ_{28} ではないが、港研暴露供試体の σ_{28} を記入した。

(1) 骨材の種類が強度に及ぼす影響

普通ポルトランドセメントを用いた各骨材の材令28日と10年での圧縮強度の測定結果について比較を行い強度の変化をみた。河川産骨材を用いたものの材令10年での圧縮強度は材令28日のものよりも約1~3割増加している。しかし、沖縄産骨材を用いたものの圧縮強度は、ほとんどのもので約2割の増加がみられるが、単位セメント量 $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ の本部産骨材（陸上部）；宮古島産骨材（感潮部、海中部）、中南部産骨材（感潮部）で1割強、中南部産骨材（海中部）で約4割低下していた。

(2) セメントの種類による影響

前述した強度の低下している本部産骨材（陸上部）と宮古島産骨材（感潮部、海中部）について、高炉セメントB種を用いたものの強度変化は、本部産骨材（陸上部）が4割増加、宮古島産骨材（感潮部）が約2割増加、宮古島産骨材（海中部）がほとんど変化なしと、低下の傾向はみられなかった。また、それ以外のものについても強度の低下はみられず、平均で約1割の増加があった。

(3) 環境条件（陸上、感潮、海中部）による影響

環境条件がコンクリートの強度に及ぼす影響について

表-5 圧縮強度の試験結果

骨材の種類	暴露場所	セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	環境条件	圧縮強度 (kgf/cm ²)			σ 5年	σ 10年	σ 10年
					28日	5年	10年	σ 28日	σ 28日	σ 5年
本部産	港研	普通	250	感潮部	173	202	224	1.17	1.29	1.11
			300	陸上部	210	179	179	0.85	0.85	1.00
				感潮部		278	258	1.32	1.23	0.93
				海中部		307	259	1.46	1.23	0.84
		350	感潮部	315	412	390	1.31	1.24	0.95	
		高炉	300	陸上部	181	236	257	1.30	1.42	1.09
				感潮部		251	200	1.39	1.10	0.80
				海中部		187	204	1.03	1.13	1.09
	鹿児島	普通	250	感潮部	(173)	—	153	—	—	—
			300	感潮部	(210)	—	202	—	—	—
				海中部	(210)	—	167	—	—	—
			350	感潮部	(315)	—	227	—	—	—
		高炉	300	感潮部	(251)	—	239	—	—	—
				海中部	(251)	—	283	—	—	—
宮古島産	港研	普通	250	感潮部	224	203	306	0.91	1.37	1.51
			300	陸上部	330	390	400	1.18	1.21	1.03
				感潮部		279	289	0.85	0.88	1.04
				海中部		394	278	1.19	0.84	0.71
		350	感潮部	321	288	366	0.90	1.14	1.27	
		高炉	300	陸上部	335	370	392	1.10	1.17	1.06
				感潮部		327	389	0.98	1.16	1.19
				海中部		350	338	1.04	1.01	0.97
	鹿児島	普通	250	感潮部	(224)	—	140	—	—	—
			300	感潮部	(330)	—	194	—	—	—
				海中部	(330)	—	283	—	—	—
			350	感潮部	(321)	—	401	—	—	—
		高炉	300	感潮部	(335)	—	380	—	—	—
				海中部	(335)	—	373	—	—	—
河川産	港研	普通	300	陸上部	341	457	400	1.34	1.17	0.88
				感潮部		438	455	1.28	1.33	1.04
				海中部		438	369	1.28	1.08	0.85
	鹿児島	普通	300	感潮部	(341)	—	376	—	—	—
				海中部	(341)	—	326	—	—	—
中南部	港研	普通	300	感潮部	233	198	205	0.85	0.88	1.04
				海中部		—	143	—	0.61	—

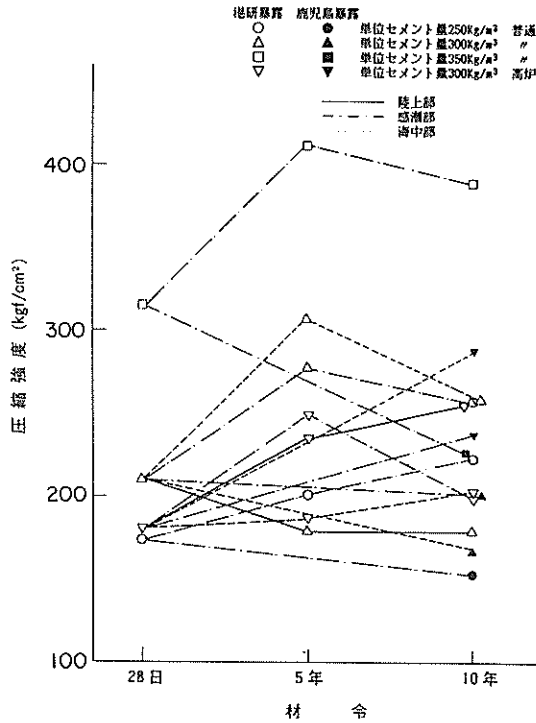


図-11 圧縮強度の経年変化 (本部産骨材)

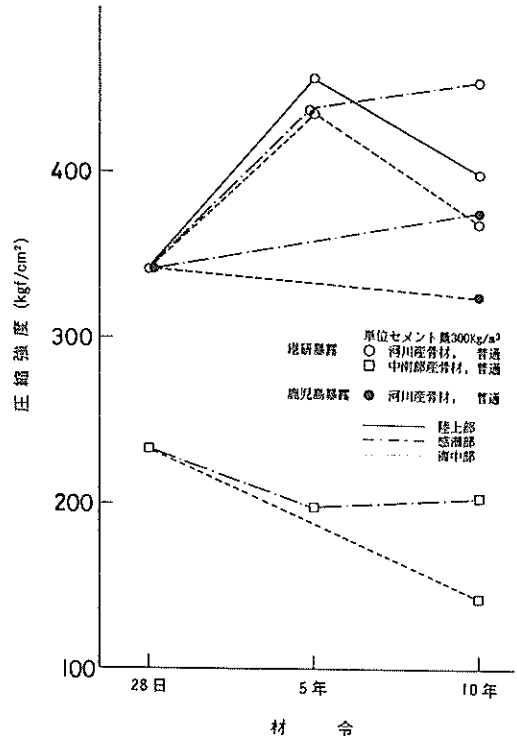


図-13 圧縮強度の経年変化 (河川産, 中南部産骨材)

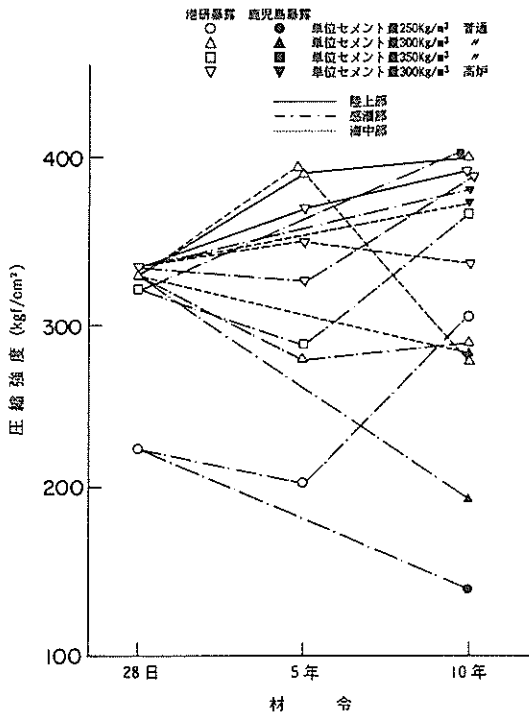


図-12 圧縮強度の経年変化 (宮古島産骨材)

述べる。環境条件での強度変化は材令28日と10年では差はみられないが、材令5年から10年での強度変化において差がみられた。

材令5年と10年の結果より強度変化をみると、普通ポルトランドセメントを用いた海中部での供試体の強度の低下が比較的大きく、平均して約2割の強度の低下がみられた。その他、普通ポルトランドセメントを用いた陸上部および感潮部での供試体は、強度の低下がほとんどみられず材令5年と10年では同程度であった。

(4) 暴露場所 (港研, 鹿児島) による影響

材令10年の試験より港研暴露と鹿児島暴露の圧縮強度の絶対値を比較した結果を表-6に示す。

普通ポルトランドセメントを用いた場合、鹿児島暴露での沖縄産骨材および河川産骨材での強度が、港研暴露での強度より低い値を示した。

沖縄産骨材に高炉セメントB種を用いた場合は、鹿児島暴露での強度は、港研暴露のものと同程度あるいはそれ以上の値であった。なお、高炉セメントB種を用いた河川産骨材の材令10年試験は、行っていない。

表-6 暴露場所による圧縮強度 (材令10年)

骨材の種類	セメントの種類	単位セメント量 (kg/m³)	環境条件	圧縮強度 (kgf/cm²)		鹿児島暴露
				港研暴露	鹿児島暴露	港研暴露
本部産骨材	普通ポルトランドセメント	250	感潮部	224	153	0.68
		300	感潮部	258	202	0.78
			海中部	259	167	0.64
	350	感潮部	390	227	0.58	
	高炉セメントB種	300	感潮部	200	239	1.20
			海中部	204	283	1.39
宮古島産骨材	普通ポルトランドセメント	250	感潮部	306	140	0.46
		300	感潮部	289	194	0.67
			海中部	278	283	1.02
	350	感潮部	366	401	1.10	
	高炉セメントB種	300	感潮部	389	380	0.98
			海中部	338	373	1.10
河川産骨材	普通ポルトランドセメント	300	感潮部	455	376	0.83
			海中部	369	326	0.88

6.2 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食状況として、腐食度の判定および腐食面積率の判定を行った。その結果を、表-7、8に示す。なお、鉄筋の腐食によってコンクリートにひびわれが発生したものやコンクリート表面に錆が溶出したものは認められず、鉄筋の腐食は軽微であった。

(1) 骨材の種類が鉄筋の腐食状況に及ぼす影響

鉄筋の腐食は、港研暴露、鹿児島暴露ともに本部産骨材を用いたものに多く、感潮部、海中部の両者において腐食がみられた。宮古島産骨材を用いたものでは、港研暴露の感潮部に腐食が多くみられ、鹿児島暴露での腐食は少なかった。河川産骨材を用いたものは、港研暴露では、腐食はほとんどみられないが、鹿児島暴露において多くみられた。

(2) 環境条件および暴露場所が鉄筋の腐食状況に及ぼす影響

環境条件での鉄筋の腐食状況は、感潮部で、局所的な腐食が多くみられ、海中部では、点錆が多くみられた。また、暴露場所の相違により、腐食の状況に差がみられた。

(3) コンクリート中铁筋の電気化学的測定

鉄筋のアノード分極曲線の測定結果より判定した不動態のグレードを表-9に示す。

不動態のグレードは、本部産骨材を用いたものが、他の骨材を用いたものに比べグレードが低く、腐食しやすい傾向を示した。

また、環境条件により差がみられ、海中部は、感潮部

表-7 鉄筋の腐食度

暴露場所	骨材の種類	感潮部			海中部		
		かぶり			かぶり		
		2 cm	4 cm	7 cm	2 cm	4 cm	7 cm
港研	本部産	2.5	2.5	2.5	2.17	2.17	1.17
	宮古島産	2.17	1.67	1	1	1	1
	河川産	1.17	1.17	0.33	1	1	0.7
鹿児島	本部産	2	1.5	1.5	1	1.25	1.25
	宮古島産	0.5	0.5	0.5	1	1	1
	河川産	1.5	1.5	1.5	1	1.5	1

港研暴露は、2本、鹿児島暴露は、3本の平均値

表-8 鉄筋の腐食面積率

暴露場所	骨材の種類	感潮部			海中部		
		かぶり			かぶり		
		2cm	4cm	7cm	2cm	4cm	7cm
港研	本部産	1.73	0.5	1.37	2.2	1.73	1.07
	宮古島産	0.67	0.43	0.2	0.25	0.24	0.28
	河川産	1.00	0.23	0.23	0.13	0.04	0.01
鹿児島	本部産	1.6	2.65	2.65	1.75	1.35	0.6
	宮古島産	0.1	0.15	0.1	0.25	0.4	0.1
	河川産	1.55	0.6	0.25	0.3	0.3	0.1

港研暴露は、2本、鹿児島暴露は、3本の平均値

表-10 中性化深さ

暴露場所	骨材の種類	感潮部		海中部	
		平均	最大	平均	最大
		港研	本部産	1.67	2.67
宮古島産	1.50		2.67	1.33	2.33
河川産	0.70		1.67	0.87	1.83
鹿児島	本部産	2.00	3.75	2.25	2.33
	宮古島産	0.65	1.50	0.20	1.00
	河川産	1.10	2.25	0.85	2.00

港研暴露は、2本、鹿児島暴露は、3本の平均値

表-9 不動態のグレイド

暴露場所	骨材の種類	感潮部			海中部		
		かぶり			かぶり		
		2cm	4cm	7cm	2cm	4cm	7cm
港研	本部産	3.5	4	4	2	2	2
	宮古島産	3	4	3	3	2	3
	河川産	4	4	4.5	4	4	4
鹿児島	本部産	2	3	2	0	0	0
	宮古島産	4	4	2	2	2	3
	河川産	3	5	4	4	2	4

港研暴露は、2本の平均値、鹿児島暴露は、1本のみ

表-11 塩化物含有量

暴露場所	骨材の種類	塩化物含有量 (モルタル重量%)	
		感潮部	海中部
		港研	本部産
宮古島産	0.104		0.263
河川産	0.267		0.115
鹿児島	本部産	0.494	0.800
	宮古島産	0.209	0.159
	河川産	0.473	0.349

港研暴露は、2本、鹿児島暴露は、3本の平均値

よりグレイドが低く、腐食しやすい傾向にある。しかしながら、海中部の方が腐食しているとは言えなかった。これは、海中部の方が感潮部よりも腐食に必要な酸素の供給が少ないためと思われる。

6.3 中性化深さ

中性化深さの測定結果を、表-10に示す。

中性化深さは、環境条件、暴露場所にかかわらず本部産骨材を用いたものが、大きな値を示した。

6.4 塩化物含有量

塩化物含有量の測定結果を、表-11に示す。

塩化物含有量は、港研暴露、鹿児島暴露ともに、本部産骨材を用いたものの値が、他の骨材を用いたものと比べ大きな値を示した。

6.5 考察

(1) 強度について

普通ポルトランドセメントを用い、かつ同一単位セメント量でスランブを 12 ± 2 cmに設定すると粒形や粒径分布のよくない骨材を用いたコンクリートは単位水量が多くなり、それに伴って水セメント比が多くなり、 σ_{28} は各配合で異なる。このため、圧縮強度の絶対値のみで、コンクリートの耐海水性を考えることには無理がある。しかしながら、河川産骨材を用いたコンクリートの材令10年で強度が σ_{28} を上回っているのに対し、本部産骨材あるいは宮古島産骨材を用いたコンクリート強度には、一部にせよ材令10年での強度が σ_{28} を下回っているものがあるのは、やはり問題であると思われる。

これに対し、高炉セメントB種を用いると本部産骨材、宮古島産骨材、ともにすべて10年での強度が σ_{28} を上回

っており、耐海水性が改善されたと言えるであろう。

(2) 鉄筋の防食性能

本試験結果では、本部産骨材を用いたものが最も悪いが、水セメント比が異なるため一概には言えない。しかしながら図-14をみると水セメント比はそれほど腐食に影響を及ぼさない傾向がある。やはり本部産骨材は防食性能が悪いと言えるであろう。なお、高炉セメントB種を用いる一般骨材を用いたコンクリートの防食性能が向上することは、港研資料No.378⁵⁾から明らかであるので、沖縄産骨材を用いたコンクリートにおいても高炉セメントB種を用いると防食性能上からも有効と考える。

(3) 粗骨材と細骨材の組合せについて

強度および防食性能において本部砕石と伊是名砂の組合せが、宮古島砕石と砂の組合せに比較して劣っていることが明らかとなった。また、強度からは、中南部砕石と砂の組合せも本部砕石と伊是名砂の組合せと同様に良くないようである。

本部砕石は、粒形はやや悪いが比重、吸水率は河川産骨材に遜色ない。このため、砂の良否の方がよりコンクリートの特性に影響を与える、あるいは強い砕石と品質の劣る砂の組合せが良くない、の何れかが考えられる。何れにせよ、砂の品質の方が砕石よりも重要な因子であ

ると考えられる。

(4) 高炉セメントB種使用について

本試験では沖縄産骨材を用いた場合の長期の圧縮強度に対する高炉セメントB種使用の有効性が明らかとなったが、残念ながら防食性能に関する試験は行っていない。

この高炉セメントB種に関しては一般骨材を使用した場合について港研資料No.378において検討しており、普通ポルトランドセメントを使用した場合より良好な防食性能を有していることが認められた。長期の圧縮強度の伸びが高いことおよび防食性能のよことから高炉セメントB種の使用が推奨される。なお、高炉セメントB種の欠点としては初期養生をおろそかにすると乾燥収縮ひびわれが発生、また、初期養生の温度が低いと強度の発現が悪くなるということがある。しかし、沖縄では温度が低いということは考えられないので他の地域より養生に関する心配も少ないと考えられる。

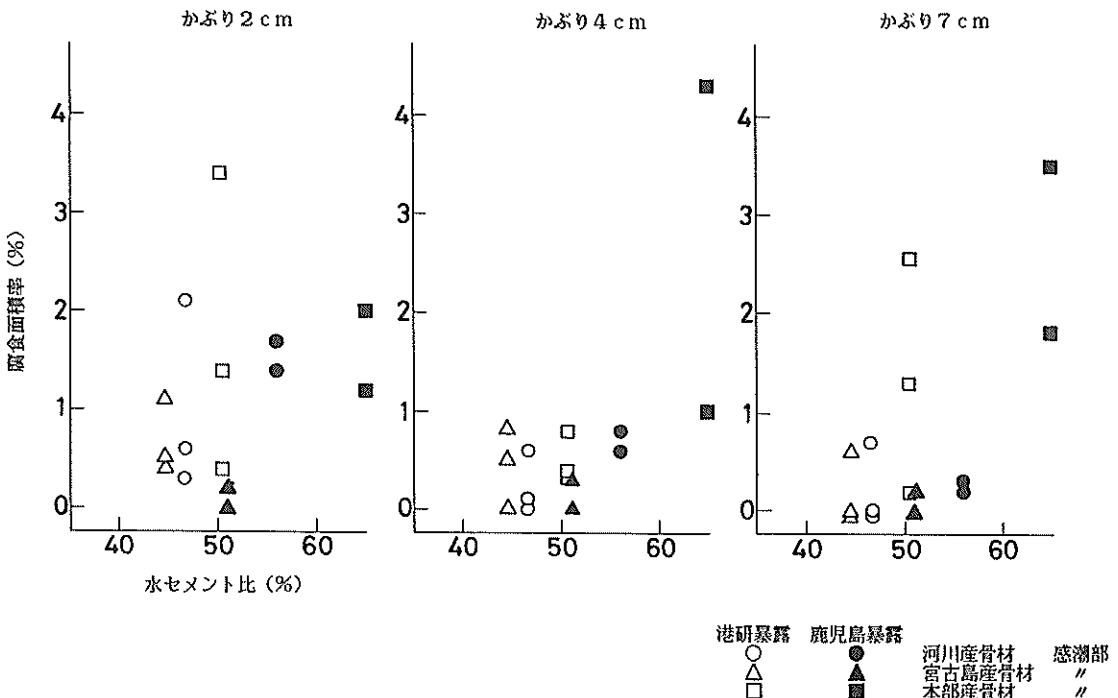


図-14 水セメント比と腐食面積率の関係

7. 結 論

(1)普通ポルトランドセメントを使用した場合、沖縄産骨材を用いたものの材令28日と10年を比較した強度変化は、ほとんどの場合、低下の傾向は認められないが、一部のものについて低下が認められた。

(2)高炉セメントB種を使用した場合、沖縄産骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の変化は、普通セメントを用いた河川産骨材の強度変化と同様に、すべて材令10年が材令28日を上回った。

(3)圧縮強度に関して、粗骨材の品質よりも細骨材の品質の方がより影響が大きいと考えられる。

(4)鉄筋の腐食状況をみると本部産骨材を用いたものは、他の骨材を用いたものに比べ腐食が進んでいることが認められた。このことは電気化学的測定よりも裏付けられた。

(5)本部産骨材を用いたものの中酸化深さ、塩化物含有量は、他のものに比べ大きかった。

8. あとがき

本文によって沖縄産骨材を用いたコンクリートの防食性は、やや河川産骨材を用いたコンクリートに比べ劣るものの、このために使用出来なくなるというほどのことはないと認められた。また、本試験は著者の1人が10年前に計画したものであるが、計画上種々の問題点があった。

すなわち、

- ①高炉セメントB種を用いた鉄筋の腐食試験用の供試体を製作しなかったこと。
- ②水セメント比を同一とした圧縮強度あるいは腐食試験用の供試体を製作しなかったこと。
- ③港研暴露と鹿児島暴露用の供試体を同時に製作しなかったことの3点である。

このため、各要因（セメントの種類、水セメント比および暴露場所）の比較が十分に行えなかったのは残念である。

なんらかの機会があれば促進試験等によって追試験を行いたいと考えている。

なお、本暴露試験の遂行には、鹿児島港工事事務所の方々の多大な御協力をいただいた、深く感謝の意を表します。

(1987年6月29日受付)

参考文献

- 1) 関 博・大即信明, “コンクリート用骨材としての沖縄産骨材の特性について”, 港湾技研資料, No 240, 1976.
- 2) 沖縄総合事務局開発建設部港湾計画課, “沖縄の石材およびコンクリート用骨材調査”, 1974年4月, pp. 1 ~ 115.
- 3) 大即信明, “コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する”, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, 1985年9月, p. 206.
- 4) 大即信明, “コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究”, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, 1985年9月, p. 195.
- 5) 森 好生・大即信明・下沢 治, “海水練りコンクリートの耐海水性試験”, 港湾技研資料, No 378, 1981.

港湾技研資料 No.594

1987・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.