

論文

[1007] 骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響

正会員 川上英男 (福井大学環境設計工学科)

1. まえがき

コンクリートの力学的挙動は、その構成材であるセメントモルタルと粗骨材それぞれの力学的性質に加えて、その境界層の接着強度によって影響を受ける。骨材岩種とセメントモルタルとの接着機構についてはすでに研究も行われているものの、コンクリートの力学的挙動との関連性となると必ずしも解明されている訳ではない。本研究は福井県九頭龍川の代表的な岩石を取り上げ、その力学的性質及びセメントモルタルとの接着強度を比較すると共に、それらの岩石の砂利を用いたコンクリートの力学的挙動との関連性を実験的に検討したものである。

2. 九頭龍川の岩石の性質

コンクリート用の砂利は九頭龍川の中流、下流域で採取されている。その砂利の岩種構成のうちで主要な岩石5種を検討の対象とした。

2.1 試験方法

小舟渡付近の河原より採取した玉石より直径50mmのコア各3本ずつを抜き取り、高さ100mmの円柱体に整形した。これら円柱供試体の圧縮試験は JIS A 1108 に準じて表乾状態で行った。この時抵抗線歪ゲージによって歪を測定し、弾性係数を求めた。また JIS A 1110 により比重と吸水率を求めた。

2.2 試験結果と考察

試験結果を一括して表1に示す。表乾比重と吸水率の関係を図1に示す。

また同図には既往の報告 [1] を参考として鎖線を書き入れた。表乾比重が大きくなる程、吸水率が小さくなる傾向は九頭龍川産の岩石にもみられる。5種の岩石の内、流紋岩は他の4種と比べはかけ離れて比重が小さく、吸水率が大きい。他の4種は比重と吸水率との関係において一律ではなく、それぞれ特徴が見られる。

圧縮強度と弾性係数の関係を図2に示す。全般的傾向としては圧縮強度が大きい程弾性係数が大きくなっている。流紋岩は圧縮強度・弾性係数共に低く、砂岩は両者共に大きい。安山岩と花崗岩はそれらのほぼ中間に位置している。ひん岩は安山岩・花崗岩に比べて圧縮強度の割には弾性係数が大きい。

表-1 九頭龍川水系岩石の諸性質

	表乾比重	総乾比重	吸水率 (%)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)				圧縮強度 (kgf/cm ²)			
				各個	平均	各個	平均				
花崗岩	2.71	2.69	0.54	5.92	5.82	5.86	5.87	2166	1908	1795	1956
ひん岩	2.76	2.75	0.33	6.80	6.89	6.81	6.83	1959	1465	1514	1645
流紋岩	2.55	2.51	1.66	2.05	2.04	2.26	2.12	999	1025	1162	1062
安山岩	2.89	2.87	0.90	5.75	6.07	6.13	5.98	1998	2335	2365	2232
砂岩1	2.84	2.83	0.32	9.27	8.84	9.15	9.09	2781	2972	3472	3489
砂岩2	2.75	2.74	0.27	6.87	7.00	7.33	7.07	2781	2972	3472	3075

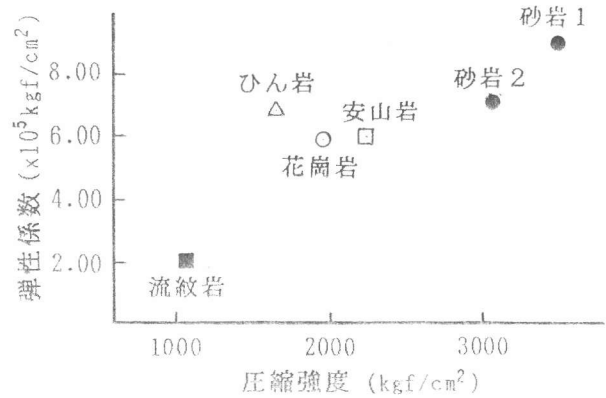
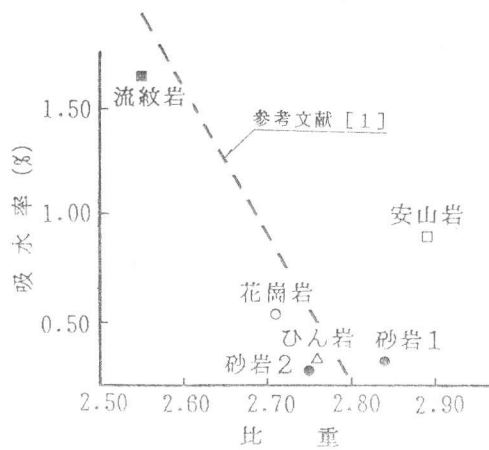


図-1 岩石の表乾比重と吸水率の関係 図-2 岩石の圧縮強度と弾性係数の関係

3. 岩石とセメントモルタルとの付着強度

岩石とセメントモルタルとの接着面の曲げ引張強度（材令26日）を検討の対象とした。

3.1 材料及び供試体の製作

セメントと砂の性質を表2に示す。砂の粒度分析結果を図3に示す。モルタルは水セメント比 45% のコンクリートのモルタル部分の調査を用いた。表3参照。

表1の玉石を図4の寸法に整形し、セメントモルタルとの接着面は120番のサンドペーパー（63~180 μ m）で研磨した。この岩石試料は24時間以上水中に浸漬したあと、よく洗浄し、表乾状態で型枠内に配置し、モルタルを打ち込んだ。

モルタルは JIS R 5201 セメント強度試験における機械練りに準じて練り混ぜを行ってから湿布をかぶせて50分間の休眠期間を与えた。そして改めて3分間練り返しを行ってから型枠に打ち込んだ。試験体は各岩種に3本または4本ずつである。24時間後に脱型、材令4週まで標準水中養生を行った。

表-2 セメント，砂の性質

セメント：普通ポルトランドセメント						
5回の実験ごとのセメント強度試験結果						
強度	曲げ	65.9	67.0	66.7	77.0	74.2
(kgf/cm ²)	圧縮	382	397	396	413	398
砂：九頭龍川産 2.5mm以下 粗粒率 2.71						
表乾比重 2.58 吸水率 2.08(%)						

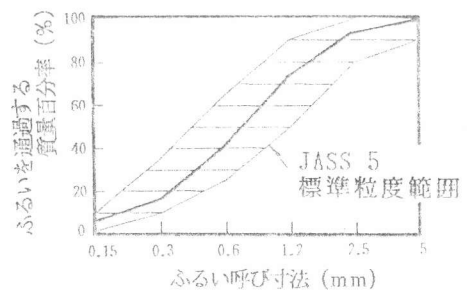


図-3 砂粒度分析結果

表-3 コンクリート及びモルタルの調査

W/C (%)	スランブ (cm)	細骨材率 (%)	単位水量 (l/m ³)	セメント (l/m ³)	砂 (l/m ³)	砂利 (l/m ³)
0.45	8	35.9	168	118	253	451
0.45	-	35.9	308	217	465	-

3.2 試験方法

曲げ試験は図5に示すようにプルーピングリング（容量 50 kgf, 精度166.3 gf）を備えた手動型荷重装置によって行った。荷重速度は約150gf/secである。
 付着強度（曲げ引張強度, f_b ）は式（1）によって算定した。

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

M : 接着面に作用する曲げモーメント(kgf·cm)
 Z : 付着面の断面係数(cm^3)

なお、曲げ試験直後に、供試体のモルタル部分に対してセメント試験に準じて、圧縮試験を行った。荷重速度は 2cm X 2cm の圧縮面積に対して毎秒20kgfである。

3.3 試験結果

材令4週の試験5回分の結果を表4に掲げた。各実験毎にモルタル圧縮強度がやや異なっているため、その平均値を基準として、付着強度はモルタル圧縮強度に比例するとして、付着強度にモルタル圧縮強度を乗じた値を求めた。それらの値の平均値 (m) と標準偏差 (d) を算定し、各算定値のうち ($m \pm d$) の範囲に入るものを採用し、改めて その平均値と標準偏差を求めた結果を表5に示す。

この結果によると付着強度は岩種によって異なり、流紋岩・花崗岩が最も大きく、安山岩・ひん岩はおおよそ その2/3、砂岩は6割に満たない。これらの付着強度をそれぞれの岩石の圧縮強度、弾性係数との関連において特徴を示したのが図6、図7である。

流紋岩は圧縮強度・弾性係数は低いが付着強度が比較的大きく、砂岩は圧縮強度・弾性係数は大きいが付着強度は比較的低い。花崗岩、安山岩及びひん岩はこれら両者の中間に位置づけ

表-4 岩種別の付着強度 (kgf/cm^2)

回	花崗岩	ひん岩	流紋岩	安山岩	砂岩	F_m
1	44.7	28.7	45.4	28.4	24.2	703
	44.4	31.4	48.9	28.9	30.2	745
	48.7	18.2	39.9	26.2	28.9	678
2	14.0	33.7	56.1	35.4	18.0	673
	34.2	36.2	39.4	41.2	27.2	638
	18.2	15.5	46.7	—	21.7	683
3	41.1	41.2	52.9	36.2	30.2	675
	46.2	40.7	54.1	34.4	26.9	678
	49.4	36.7	46.2	37.9	23.2	655
4	36.2	29.4	46.7	29.7	22.5	658
	44.4	40.7	51.1	32.9	31.9	650
	41.7	36.2	43.7	31.9	23.7	660
5	37.4	31.6	44.0	26.2	23.0	658
	42.1	29.6	42.7	26.8	22.5	670
	47.2	30.9	49.6	30.9	29.0	638
	43.0	26.8	46.2	28.1	30.5	—

(F_m : モルタル圧縮強度)

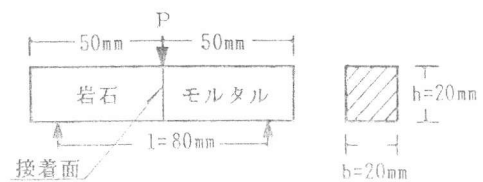


図-4 曲げ試験

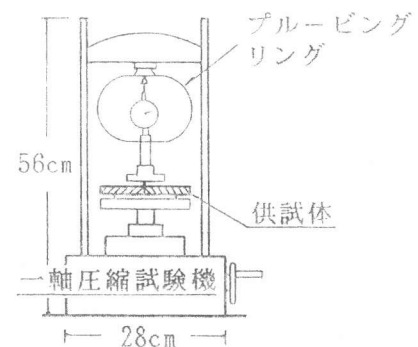


図-5 曲げ試験装置

表-5 岩石とモルタルの付着強度

砂利岩種 (データ数)	付着強度 (kgf/cm ²)					モルタル 圧縮強度 (kgf/cm ²)
	花崗岩 (14)	ひん岩 (11)	流紋岩 (15)	安山岩 (11)	砂岩 (12)	
範囲	29.7~49.6	24.3~39.1	35.1~55.9	26.7~37.1	22.2~29.8	671
平均	43.0	32.0	46.8	30.5	25.3	
標準偏差	4.01	3.46	4.47	3.34	2.69	

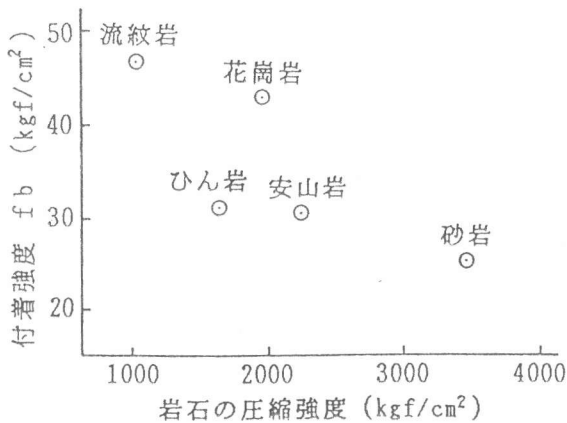


図-6 岩石の圧縮強度と付着強度

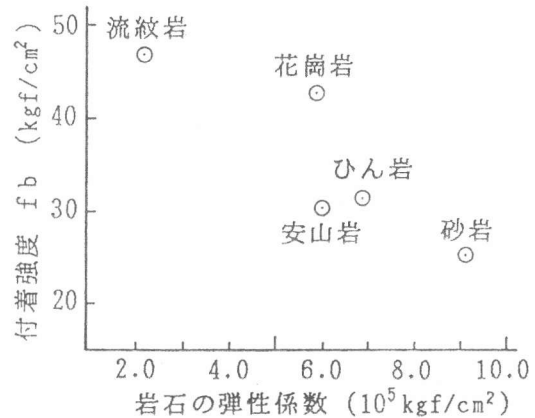


図-7 岩石の弾性係数と付着強度

られるものの、必ずしも圧縮強度・弾性係数と付着強度との関連で、砂岩と流紋岩を結ぶ線上に位置しない。

4. 各種岩石を粗骨材とするコンクリートの力学的性質

上述の5種の岩種の川砂利を用いたコンクリート及びモルタルの供試体の圧縮強度と弾性係数を比較検討するものである。

4.1 材料、調合及び供試体製作

セメントは普通ポルトランドセメント(圧縮強度 398 kgf/cm², 曲げ強度 74.2 kgf/cm²)、川砂は九頭龍川産2.5mm以下(表2参照)。川砂利は各岩種ごとに選別した。さらに粒径を5-10, 10-15, 15-20mmに分類した上、これらを等量ずつ混合したものを用いた。また各岩種の川砂利を等量混合した場合(以下混合と略す)も実験に加えた。調合は前掲の表3に示した。

モルタルを混練後、湿布でミキサを覆って50分静置した後、改めて練り返したモルタルより供試体1本分を練り鉢に取り分け、準備しておいた表乾状態の川砂利を加えて手練りしたものを型枠に打ち込んだ。

円柱供試体(直径10cm x 高さ20cm)はコンクリート各種3本ずつ、モルタルは4本である。翌日キャッピング、翌々日脱型後、材令28日まで標準水中養生を行った。

4.2 圧縮強度と弾性係数の評価

圧縮試験においては差動トランス型コンプレッソメータによって歪を計測した。その応力度歪度線より圧縮強度の1/3の応力における割線係数(E_{1/3})を算定した。又、その応力度歪度関係のデータ36点を式(2)にあてはめて係数値を決定し、これより初期弾性係数(E₀)を求めた。

$$\sigma = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 \quad (2)$$

σ : 応力度 (kgf/cm²), ε : 歪度, a, b, c, d : 係数

4.3 結果と考察

圧縮強度と弾性係数 ($E_{1/3}, E_0$) の算定値を表6に掲げる。

1) 圧縮強度と破壊のタイプ

圧縮強度は花崗岩の場合が最も高く、流紋岩の場合が最も低い。試験後の破壊面を観察すると流紋岩砂利は約半数が破断しており、その他の岩種ではすべて砂利表面が剝離していた。すなわちコンクリートの破壊の起因としては、前者では砂利自体の破壊の可能性が大きく、後者では砂利表面の付着破壊と考えることができよう。

2) 付着強度とコンクリート圧縮強度

付着強度 (f_b) とコンクリート圧縮強度 (F_c) の関係を図8に示す。

砂岩、安山岩、花崗岩は付着強度が大きい程圧縮強度が大きく、両者は直線的関係にあり、骨材境界面の付着強度がコンクリート圧縮強度の支配的因子であることを示している。

流紋岩の場合は骨材自体の破壊がコンクリートの破壊を導いたことが示唆されている。ひん岩の場合は安山岩より付着強度がやや大きいにも拘らずコンクリート圧縮強度は25 kgf/cm² (約6.5%) 低い値を示している。ひん岩の弾性係数は安山岩の1.14倍であって、コンクリート中における砂利境界面の応力集中が大きいためと考えられる。

すなわち付着強度と応力集中の2要因の複合作用がコンクリート圧縮強度に影響することが示されている。

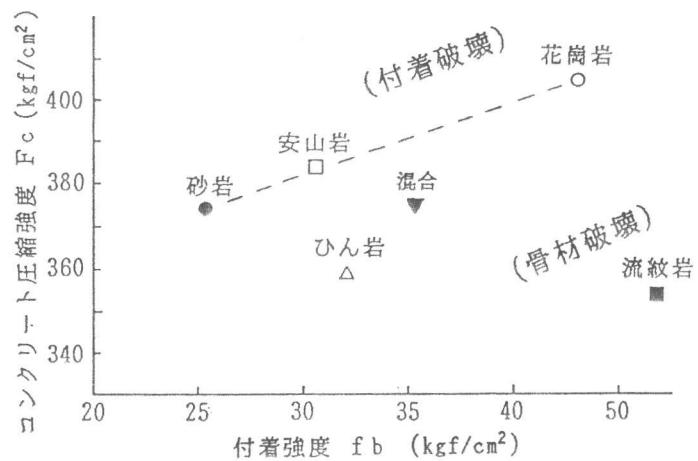


図-8 付着強度とコンクリート圧縮強度

表-6 岩種別コンクリートの力学的性質 (材令28日)

砂利岩種	圧縮強度 (kgf/cm ²)				弾性係数 $E_{1/3}$ (10 ⁵ kgf/cm ²)				初期弾性係数 E_0 (10 ⁵ kgf/cm ²)						
	各	個	平均		各	個	平均	各	値	平均					
花崗岩	360	416	438	405	2.89	3.34	2.95	3.06	3.31	3.95	3.55	3.60			
ひん岩	341	366	371	359	3.59	—	3.17	3.38	4.24	—	3.51	3.88			
流紋岩	347	317	397	354	2.49	2.27	2.71	2.49	2.88	2.61	3.10	2.86			
安山岩	380	373	399	384	3.04	—	3.35	3.20	3.72	—	4.07	3.90			
砂岩	396	351	374	374	3.32	3.35	3.69	3.45	4.01	4.58	4.05	4.23			
混合	351	387	367	368	3.09	3.14	—	3.12	3.39	3.64	—	3.52			
モルタル	537	551	521	548	536	2.45	2.46	2.47	2.39	2.44	2.60	2.52	2.51	—	2.82

5種の混合砂利の場合はそれぞれの単一種類川砂利コンクリートの圧縮強度の平均値 375 kgf/cm² の98%であって、きわめて近い値を示している。

3) 粗骨材(岩石)の弾性係数とコンクリートの弾性係数

粗骨材とコンクリートの初期弾性係数(E₀)及び強度の1/3の応力度における割線弾性係数の関係を図9に示す。粗骨材の弾性係数が大きい程コンクリートの初期弾性係数及び割線弾性係数共に大きくなっている。

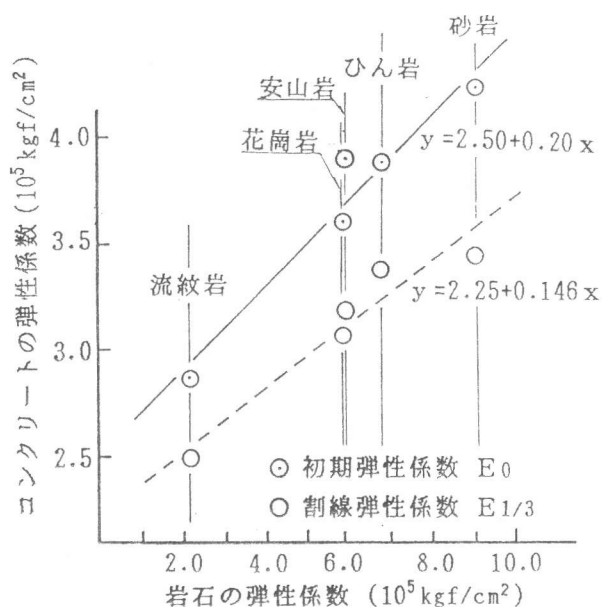


図-9 粗骨材とコンクリートの弾性係数

5. 結論

九頭竜川の代表的砂利岩種5種について、その力学的性質、セメントモルタルとの付着強度及びそれらの砂利を用いたコンクリートの性質を比較検討した結果、次の点が明らかとなった。

- 1) 圧縮強度が大きい岩石ほど弾性係数は大きい。ひん岩は他の岩石に比べて圧縮強度に対する弾性係数の割合が大きい。
- 2) 岩石とセメントモルタルとの曲げ付着強度は砂岩が最も小さく、流紋岩が最も大きい。後者は前者の1.85倍を示した。付着強度の特徴を岩石の圧縮強度・弾性係数との関連で注目すると全般的傾向としては圧縮強度・弾性係数が大きいほど付着強度が小さい値を示しているが、それらは岩石によって特徴があり両者は必ずしも対応するものではない。
- 3) 流紋岩は付着強度が大きい骨材自体の強度が低くその破壊によりコンクリートの圧縮強度は低い。
- 4) 安山岩、砂岩、花崗岩では付着強度が大きいほどコンクリートの圧縮強度が大きい。ひん岩は付着強度は安山岩と同等であるがコンクリートの圧縮強度は低く、岩石の弾性係数がより大きいことが骨材境界の応力集中を招いたものと考えられる。
- 5) 粗骨材の弾性係数が大きいほどコンクリートの弾性係数は大きく、両者はほぼ直線的関係にある。

参考文献

- [1] 西沢紀昭：コンクリート用骨材，コンクリートジャーナル，Vol.5, No.7, p.62, 1967

謝 辞

九頭流川の岩石構成，岩石の鑑別については福井大学地学教室 三浦静 教授のご協力を戴き、実験と解析には福井大学技官 脇敬一氏、学生 上野吉純、久野茂嗣、竜田祐子の諸君のご協力を得ました。ここに厚く御礼申し上げます。