

締固めた非粘着性材料の剪断強度式の諸係数の特性について

鳥山 暁 司

The Properties of Various Coefficients of Equations of Shear Strength of Compacted Non-cohesive Materials

Koushi TORIYAMA

Abstract The correlation of the coefficients of Mohr-Coulomb equation, non-linear equation and the equation in which internal friction angle ϕ_0 is given by function of normal stress σ are examined for compacted tuff and sand and gravel with drained triaxial compression tests. From these tests, the following results are obtained.

(1) Internal friction angle ϕ , internal friction angle ϕ_1 at $\sigma_3=1.0\text{kgf/cm}^2$ and basic shear strength (apparent cohesion) τ_0 of Mohr-Coulomb equation are increased with increment of dry density ρ_d .

(2) The coefficient A of non-linear equation $\tau = A(\sigma/\sigma_{01})^b$ is increased with ρ_d and b is scatteringly distributed for ρ_d . Average value of b is 0.718 for sand and gravel and is 0.789 for tuff.

(3) Internal friction angle ϕ_0 is expressed by $\phi_0 = \phi_m - a \log(\sigma/\sigma_{01})$. ϕ_m at $\sigma = \sigma_{01}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ is increased with ρ_d and a is decreased with ρ_d but a is scatteringly distributed. The average value of b is 14.4 for sand and gravel and is 14.0 for tuff.

Key words: Non-cohesive material; modified Mohr-Coulomb equation; non-linear shear strength equation; equation of internal friction angle.

ま え が き

非粘着性材料の剪断強度は一般に三軸圧縮試験を行い、ピーク強度を求め、これに対してモール・クーロン式を適用してc、 ϕ を求め、設計に際しては、非粘着性材料には粘着力はないから、 $c=0$ とおいて、内部摩擦角 ϕ のみを設計に用いてきた。この方法では垂直応力 σ がある大きさ(約 1.0 kgf/cm^2)以上では粘着力成分cだけ剪断強度を小さくしており、これ以下の σ でも実際より小さな剪断強度をとっていることになり、かなり安全側の設計数値のとり方であると考えられている。

建設省では新しくフィルダムの耐震設計指針(案)¹⁾を作成し、修正震度法を導入しようとしている。この方法では従来の震度法に比べて堤頂近くでは設計地震力が2

倍近くの大きくなり、従来の $c=0$ として、 ϕ のみを設計に用いる方法では経済的なフィルダムの設計が不可能となる。そこで非粘着性材料の剪断強度を設計に十分に利用するために、指針(案)¹⁾ではモール・クーロン式の他に、非線形式および内部摩擦角を σ の関数とする式の3式のいずれかを用いることを提案している。この式の適用性については別報²⁾で検討した。この結果、いずれの式も σ の小さな範囲では式を修正する必要性のあることを示した。

別報²⁾では3式の係数の特徴についての検討は行なわなかった。ここでは非粘着性材料の剪断強度に最も大きな影響を与える乾燥密度と剪断強度式の各係数の関係および各式の係数の相互関係を締固めた砂礫材と凝灰岩について検討した結果を報告する。

材料と実験方法

表 1 実験材料の物理的性質

実験に用いた材料は農林水産省中国四国農政局東伯農業水利事業所で建設した西高尾ダムの凝灰角礫岩の4.75mmふるい通過分(凝灰岩と呼ぶ)、現在建設中の船上山ダムのロックゾーン材料採取予定地点の河床砂礫の9.50mmふるい通過分(砂礫と呼ぶ)および余水吐掘削によって得られた凝灰角礫岩の9.50mmふるい通過分(凝灰岩と呼ぶ)である。

西高尾ダムの材料はランダムゾーン材および遮水ゾーンの粗粒分混合材として利用されたものである。船上山ダムの余水吐掘削による凝灰角礫岩もランダムゾーンおよび遮水ゾーンの粗粒分混合材として利用される予定である。

西高尾ダムの凝灰岩は掘削したままを袋詰めにして実験室に搬入された。実験にはこの4.75mmふるい通過分を用いた。船上山ダムの砂礫材と凝灰岩材料は現場で9.50mmふるい通過分のみを袋詰めにして実験室に搬入された。実験には砂礫材は搬入されたままの粒度のYM材、搬入された砂礫材を2.00mmふるいでふるい分け、搬入材に2.00mmふるい残留分を加えて、粒度を粗くしたOC材、および搬入材に2.00mmふるい通過分を加えたOF材の3種を用いた。また、船上山の凝灰岩は搬入された粒度のままのSNおよび搬入材に2.00mmふるい残留分を加えたSCの2種を用いた。表1にこれら材料の物理的性質を示す。

材料の含水比は搬入時の自然含水比を基本の値とし、含水比の影響を実験した西高尾凝灰岩ではこれに加水分または室内で乾燥して所定の含水比に調整したのち、ビニール袋に入れて、1週間以上おいた後、実験に用いた。一般の土では最適含水比の乾燥側では、水分が重力によ

	西高尾 凝灰岩	船上山砂礫			船上山凝灰岩	
		YM	OC	OF	SN	SF
礫分(%)	13	44	60	18	41	49
砂分(%)	66	50	1	68	49	35
<75 μm (%)	21	6	9	14	10	16
Uc	84	14	35	27	29	72
Gs	2.666	2.649	2.635	2.673	2.644	2.634
wopt (%)	14.4-18.0	15.3	-	-	22.3	-
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.740-1.691	1.813	-	-	1.582	-

て降下することはないが、凝灰岩では水分降下が生じ、袋底部の含水比が調整含水比より2-5%高くなっており、水分特性の特異なことを示している。

供試体の作製は直径5.0cmのモールドに材料を所定の層数に分けて入れ、これを標準締め用ランマー(2.5kgf)を用いて、所定の回数突き固めて作製した。

実験に用いた材料の透水係数は $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$ cm/s程度の半透水性材料であるため、三軸圧縮試験は全て排水条件で行なった。実験は(1)剪断強度式の適合性を検討する目的で側圧 σ_3 を0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0kgf/cm²の8本を1組としたもの、(2)剪断強度式の係数を求める目的の試験では σ_3 を1.0, 2.0, 3.0, 4.0kgf/cm²の4本を1組とした。いずれの実験も水浸の影響をみるために、非水浸と水浸の2条件を用いた。目的(1)に用いた西高尾凝灰岩と船上山砂礫材の8本の供試体の平均含水比w、乾燥密度 ρ_d と実験後の含水比w'を表2、3に示す。また、目的(2)に用いた各4本の平均供試体諸元

表 2 西高尾凝灰岩供試体諸元と実験結果(8供試体)

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
TA-U	13.57	1.656	13.97	37.0	0.69	49.0	1.32	0.780	52.8	14.81
TA-S	13.67	1.661	21.61	35.7	0.42	45.3	1.12	0.807	48.4	13.13
TB-U	13.90	1.750	14.90	1.0	1.05	55.2	1.66	0.759	59.9	15.64
TB-S	13.97	1.741	20.45	40.3	0.78	48.8	1.45	0.794	55.6	13.92
TC-U	15.67	1.673	16.02	38.4	0.59	48.5	1.29	0.806	52.2	13.13
TC-S	15.86	1.676	21.18	37.3	0.55	48.8	1.22	0.816	50.7	12.50
TD-U	16.10	1.771	16.09	42.8	0.78	53.9	1.55	0.803	56.9	12.84
TD-S	15.79	1.780	19.90	43.9	0.69	54.2	1.42	0.808	57.2	12.22
TE-U	17.42	1.673	17.43	38.7	0.58	49.3	1.27	0.822	51.9	12.07
TE-S	17.55	1.772	19.19	44.2	0.66	45.8	1.17	0.849	49.8	10.42
TF-U	17.26	1.760	17.08	42.7	0.79	53.2	1.53	0.809	56.9	12.64
TF-S	17.55	1.772	19.19	44.2	0.66	54.5	1.39	0.888	56.1	10.29

(注) U:非水浸 S:水浸, TA, TC, TE:4層10回, TB, TD, TF:5層30回

を表4～7に示す。このうち、表5および表6のYMは の4本の供試体の平均値である。供試体ごとのばらつき表2、3の8本の供試体のうちの $\sigma_3 = 1.0 - 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ があるため、両表での平均値がやや異なっている。

表3 船上山砂礫材の強度定数の一覧(8本)

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
YM0-U	11.60	1.368	12.45	33.96	0.269	40.69	0.883	0.899	41.56	6.70
YM0-S	12.64	1.371	22.65	33.69	0.157	38.38	0.763	0.961	37.38	2.48
YM1-U	12.63	1.602	13.57	36.44	0.616	46.53	1.228	0.803	50.99	13.42
YM1-S	12.47	1.603	22.39	35.25	0.461	44.62	1.086	0.831	47.50	11.52
YM2-U	12.38	1.677	13.51	38.02	0.859	52.15	1.448	0.766	55.39	15.66
YM2-S	12.19	1.688	20.86	37.03	0.766	49.32	1.350	0.779	53.54	14.93
YM3-U	12.49	1.727	13.85	38.75	1.196	54.67	1.673	0.734	58.97	17.21
YM3-S	11.38	1.730	18.54	37.87	1.005	52.37	1.503	0.763	56.48	15.95
YM4-U	10.63	1.772	12.45	40.78	1.334	56.11	1.813	0.734	60.94	16.85
YM4-S	11.89	1.758	18.93	40.05	1.182	56.31	1.647	0.766	58.89	15.41

(注) U：非水浸，S：水浸，供試体番号の数字 0：緩詰，1：3層10回，2：4層15回，3：5層30回，4：5層60回

表4 西高尾凝灰岩の供試体諸元と剪断強度式の各種係数(平成2年度)

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
TA1-U	14.77	1.579	15.63	35.19	0.395	42.63	0.994	0.855	044.63	9.22
TA1-S	14.73	1.571	24.17	31.38	0.486	40.65	0.963	0.806	43.63	12.34
TA2-U	14.59	1.689	16.16	36.87	0.818	49.29	1.333	0.771	52.83	14.99
TA2-S	14.99	1.676	21.59	35.90	0.681	44.73	1.156	0.820	48.91	11.78
TA3-U	14.95	1.727	16.68	42.19	0.724	52.90	1.468	0.797	52.39	12.73
TA3-S	15.04	1.734	20.17	37.21	1.328	49.74	1.518	0.761	55.85	14.22
TA4-U	14.77	1.757	16.09	39.35	1.528	55.79	1.839	0.703	61.13	18.84
TA4-S	14.58	1.761	19.30	39.55	1.345	51.12	1.606	0.771	58.01	14.97
TB1-U	17.89	1.596	18.47	36.76	0.349	42.37	0.975	0.894	44.25	7.68
TB1-S	18.06	1.600	23.73	38.97	0.041	39.55	0.834	0.988	39.82	0.79
TB2-U	18.30	1.690	18.47	38.69	0.717	48.12	1.260	0.827	51.45	11.42
TB2-S	17.79	1.686	20.64	36.37	0.824	45.47	1.231	0.810	50.66	12.42
TB3-U	18.49	1.784	17.60	45.11	0.563	51.87	1.481	0.855	54.85	9.56
TB3-S	8.61	1.777	18.41	43.35	0.672	48.50	1.296	0.888	52.33	7.38
TB4-U	17.77	1.809	17.13	41.51	1.507	54.85	1.787	0.752	57.42	11.48
TB4-S	17.32	1.786	18.39	43.79	0.738	50.15	1.394	0.860	54.42	9.29
TC1-U	12.90	1.577	13.67	34.22	0.496	42.02	0.995	0.854	45.84	10.90
TC1-S	12.70	1.566	24.40	31.52	0.188	35.33	0.738	0.929	36.50	4.55
TC2-U	12.88	1.653	13.76	34.44	1.097	49.71	1.433	0.722	54.68	18.21
TC2-S	12.83	1.646	22.49	33.65	0.665	44.37	1.139	0.779	48.31	14.95
TC3-U	12.01	1.691	13.34	39.26	1.149	52.10	1.585	0.742	54.68	14.86
TC3-S	12.21	1.687	21.04	39.16	0.814	48.41	1.275	0.825	55.36	20.69
TC4-U	12.65	1.729	14.21	43.20	1.194	55.45	1.694	0.782	59.35	13.93
TC4-S	12.10	1.715	20.25	40.40	0.973	50.70	1.465	0.795	55.53	13.38
TC5-U	12.95	1.669	14.02	38.38	0.928	50.56	1.420	0.775	55.57	12.19
TC5-S	12.83	1.677	20.86	33.81	1.008	46.22	1.307	0.753	52.12	11.83

(注) U：非水浸，S：水浸，供試体番号の数字 1：3層7回，2：4-15，3：5-30，4：5-50，5：5-25

表 5 西高尾凝灰岩剪断強度式の諸係数(4本) ($\sigma_3=1.0-4.0\text{kgf/cm}^2$)

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
TA-U	13.56	1.658	14.50	37.59	0.690	48.95	1.268	0.797	48.38	13.02
TA-S	13.68	1.656	21.48	36.41	0.310	45.31	1.067	0.832	44.33	11.03
TB-U	13.82	1.747	14.84	39.69	1.062	55.18	1.751	0.723	55.23	16.66
TB-S	14.02	1.746	19.84	41.56	0.671	48.80	1.258	0.877	49.77	8.60
TC-U	15.75	1.677	16.35	37.05	0.667	48.46	1.299	0.794	48.85	12.84
TC-S	15.75	1.677	21.09	36.60	0.607	48.75	1.287	0.799	48.34	13.81
TD-U	16.16	1.774	16.49	43.84	0.747	53.94	1.519	0.810	53.50	12.21
TD-S	15.91	1.785	20.47	42.94	0.747	54.24	1.589	0.798	54.30	12.43
TE-U	17.39	1.675	17.73	38.85	0.538	49.33	1.286	0.813	48.99	11.93
TE-S	17.60	1.674	21.25	40.40	0.340	45.79	0.080	0.904	45.70	6.34
TF-U	17.46	1.763	17.17	43.33	0.822	53.18	1.485	0.824	53.11	11.22
TF-S	17.79	1.769	18.75	44.96	0.916	54.54	1.564	0.833	54.67	10.68

(注) U : 非水浸, S : 水浸, TA, TC, TE : 4層10回, TB, TD, TF : 5層30回

表 6 船上山砂礫の剪断強度式の諸係数(4本)

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
YM0-U	11.71	1.363	13.20	33.83	0.367	40.69	0.922	0.871	42.57	8.33
YM0-S	12.44	1.405	21.35	34.77	0.171	38.03	0.810	0.937	38.97	4.03
YM1-U	12.57	1.614	13.40	37.99	0.549	46.53	1.150	0.847	48.88	10.11
YM1-S	12.75	1.598	22.28	35.67	0.503	44.62	1.082	0.830	47.09	11.11
YM2-U	12.60	1.888	13.74	37.70	1.075	52.15	1.501	0.748	56.02	16.41
YM2-S	11.95	1.696	19.95	37.91	0.813	49.32	1.316	0.799	52.57	13.22
YM3-U	12.40	1.731	13.55	38.71	1.352	54.67	1.687	0.727	59.03	17.55
YM3-S	10.86	1.731	18.60	40.02	0.860	52.37	1.460	0.778	55.44	14.58
YM4-U	10.58	1.770	12.84	40.95	1.492	56.11	1.795	0.741	60.71	16.52
YM4-S	12.00	1.762	18.36	41.63	4.317	56.31	1.771	0.741	60.33	16.45
OC1-U	12.65	1.597	14.96	33.67	0.688	45.65	1.156	0.780	48.81	14.35
OC1-S	12.96	1.618	20.03	32.58	0.679	45.25	1.130	0.770	48.19	14.99
OC2-U	12.92	1.667	15.30	35.27	0.865	48.29	1.289	0.770	51.88	15.04
OC2-S	13.45	1.677	19.03	35.85	0.755	46.43	1.195	0.813	49.95	12.41
OC3-U	13.14	1.677	14.59	69.41	1.007	51.87	1.469	0.783	55.57	14.18
OC3-S	12.74	1.760	17.18	38.17	1.149	52.36	1.527	0.755	56.52	15.94
OC4-U	12.72	1.810	15.06	40.78	1.414	55.33	1.740	0.748	60.03	16.23
OC4-S	13.28	1.788	17.06	40.88	1.282	54.67	1.667	0.763	58.91	15.34
OF1-U	17.55	1.587	19.19	33.41	0.681	45.01	1.128	0.790	48.12	13.67
OF1-S	17.59	1.608	21.90	32.58	0.679	45.25	1.130	0.770	48.19	14.99
OF2-U	18.04	1.667	18.81	35.13	1.097	50.45	1.434	0.735	54.68	17.28
OF2-S	17.66	1.675	21.35	37.42	0.695	49.31	1.292	0.782	52.08	14.43
OF3-U	17.95	1.743	19.38	38.02	1.454	54.41	1.707	0.720	59.32	17.98
OF3-S	18.19	1.744	19.68	39.95	1.113	53.62	1.572	0.763	57.35	15.39
OF4-U	18.07	1.789	17.80	40.06	1.598	56.52	1.846	0.720	61.30	17.70
OF4-S	17.85	1.788	19.07	40.54	1.434	56.48	1.803	0.725	60.73	17.47

(注) U : 非水浸, S : 水浸, 供試体番号の数字 0 : 緩詰, 1 : 3層10回, 2 : 4層15回, 3 : 5層30回, 4 : 5層60回

表7 船上山の凝灰岩の供試体諸元および剪断強度式の諸係数

No	w %	ρ_d g/cm ³	w' %	ϕ	τ_0 kgf/cm ²	ϕ_1	A kgf/cm ²	b	ϕ_m	a
SN 1-U	17.69	1.564	20.12	32.81	0.500	40.00	0.931	0.870	43.11	8.82
SN 1-S	17.67	1.557	22.12	32.75	0.428	41.24	0.953	0.837	43.43	10.46
SN 2-U	18.11	1.614	19.60	32.85	0.988	48.45	1.329	0.725	52.51	17.86
SN 2-S	17.64	1.626	21.71	32.66	0.737	45.33	1.155	0.769	48.72	14.97
SN 3-U	18.01	1.686	19.12	34.89	1.388	51.85	1.573	0.711	57.16	18.77
SN 3-S	17.68	1.698	20.02	37.47	1.018	51.06	1.441	0.762	54.94	15.53
SN 4-U	17.91	1.740	19.01	41.53	1.180	53.70	1.593	0.790	57.93	13.83
SN 4-S	18.26	1.735	20.13	38.19	1.607	55.70	1.818	0.701	60.86	19.08
SC 1-U	14.69	1.553	15.36	34.14	0.692	45.03	1.129	0.806	48.27	12.76
SC 1-S	14.71	1.542	21.64	31.83	0.353	38.78	0.862	0.686	40.62	8.37
SC 2-U	14.71	1.633	16.37	35.67	0.946	48.69	1.326	0.772	52.71	14.97
SC 2-S	14.75	1.635	21.62	33.98	0.455	42.95	1.014	0.828	45.22	11.18
SC 3-U	15.28	1.676	16.23	35.88	1.422	54.13	1.689	0.688	58.83	20.01
SC 3-S	14.70	1.709	19.67	40.20	0.667	49.61	1.297	0.831	52.25	11.15
SC 4-U	15.04	1.713	16.27	38.03	1.520	55.46	1.782	0.701	60.27	18.98
SC 4-S	15.15	1.716	19.60	38.03	1.520	55.46	1.782	0.701	60.27	18.98

(注) U：非水浸，S：水浸，供試体番号の数字 1：3層10回，2：4層15回，3：5層30回，4：5層60回

剪断強度式の諸係数について

建設省のフィルダムの耐震設計指針(案)¹⁾には材料の剪断強度式として、次の3式があげられている。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

$$\tau = A \sigma^b \quad (2)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi_0 \quad (3)$$

ここに

$$\phi_0 = \phi_{\max} - a \log(\sigma / \sigma_0) \quad (\sigma > \sigma_0) \quad (4-a)$$

$$\phi_0 = \phi_{\max} \quad (\sigma \leq \sigma_0) \quad (4-b)$$

これらの適合性については別途検討した。この結果、それぞれの式には適用の下限があり、(1)式に対しては

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi \quad (\sigma > \sigma_a) \quad (5-a)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi_1 \quad (\sigma \leq \sigma_a) \quad (5-b)$$

ここに τ_0 ：基本剪断強度でみかけの粘着力に等しい。

σ_a ：(5)式の交点の応力であり、

$$\sigma_a = \tau_0 / (\tan \phi_1 - \tan \phi) \quad (6)$$

ϕ_1 ： $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ でのモール・クーロンの応力円より求めた内部摩擦角

(2)式に対しては

$$\tau = A (\sigma / \sigma_0)^b \quad (\sigma > \sigma_0) \quad (7-a)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi_M \quad (\sigma \leq \sigma_0) \quad (7-b)$$

ここに σ_0 ：(7)式の交点の応力であり

$$\sigma = \left(\frac{A}{\sigma_0 \tan \phi_M} \right)^{1/(1-b)} \quad (8)$$

ここに σ_0 ：基準応力で $\sigma_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ととる。

(4)式に対しては

$$\phi_0 = \phi_m - a \log(\sigma / \sigma_0) \quad (\sigma > \sigma_0) \quad (9-a)$$

$$\phi_0 = \phi_M \quad (\sigma \leq \sigma_0) \quad (9-b)$$

ここに σ_0 ：(9)式の交点の応力で

$$\sigma_0 = \sigma_0 \cdot \exp \left\{ \frac{2.303(\phi_m - \phi_M)}{a} \right\} \quad (10)$$

ここに ϕ_m ： $\sigma = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角と修正した方が、三軸圧縮試験の実施および設計の際には剪断強度は安全側の値をとるという考え方から合理的であることを示した。

式(5),(7),(9)の係数 τ_0 , ϕ , ϕ_1 , A, b, ϕ_m , a を求めるには三軸圧縮試験を $\sigma_3 = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の4本1組とすればよいこと、さらに $\sigma_3 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を1本追加すると、表面すべりに対して、より有利な内部摩擦角 $\phi_{0.5}$ を得ることができると、また、 $\phi_{0.5}$ の安全側での計算法も別途²⁾に示した。

ここでは各係数の特性について検討する。表2-7に平均供試体諸元および(5)式の τ_0 , ϕ , ϕ_1 , (7)式のA, b, (9)式の ϕ_m , aを示す。なお、(7)式の係数を求めるための (σ, τ) の計算にはモール・クーロンの応力円の共通の包絡線を直線で近似した(5-a)式の ϕ を用いて、次式で計算した。

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi$$

別報²⁾に示したように、8本1組と4本1組から求めた係数は全体としてほぼ等しいから、係数の検討には $\sigma_3=1.0-4.0 \text{ kgf/cm}^2$ から求めた値のみを用いることとする。非粘性性材料の剪断強度は締めめ乾燥密度 ρ_d に大きく影響される。 ρ_d と各係数の関係を図1-図14に示す。

砂礫材では非水浸と水浸での差は小さいので、全資料についてまとめると

$$\begin{aligned} \phi &= -21.91 + 35.01 \rho_d & (r=0.886) \\ \tau_0 &= -6.05 + 4.153 \rho_d & (r=0.874) \\ \phi_1 &= -44.36 + 56.00 \rho_d & (r=0.942) \\ A &= -4.288 + 3.372 \rho_d & (r=0.928) \\ b &= 1.275 - 0.2988 \rho_d & (r=-0.633) \\ \phi_m &= -58.56 + 66.30 \rho_d & (r=0.926) \\ a &= -14.89 + 17.64 \rho_d & (r=0.617) \end{aligned}$$

係数bを除いて、各係数は乾燥密度の増加とともに大きくなっており、剪断強度が ρ_d とともに増加することを示している。 ρ_d の増加による係数bの減少は τ の σ に対する非線形性が ρ_d の増加とともに大きくなることを示している。

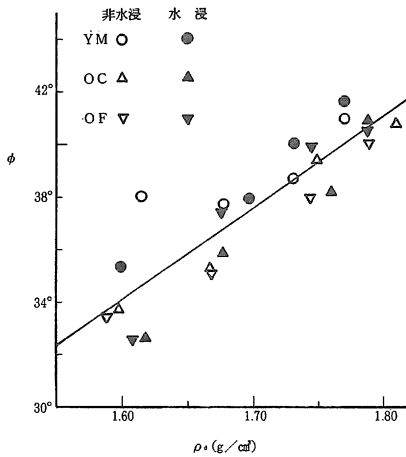


図1 砂礫材の内部摩擦角 ϕ と乾燥密度 ρ_d の関係

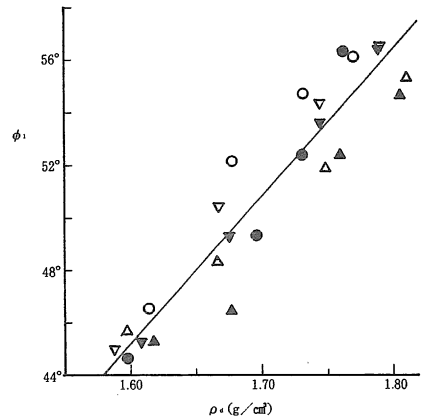


図3 砂礫材の $\sigma_3=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角 ϕ_1 と乾燥密度 ρ_d の関係

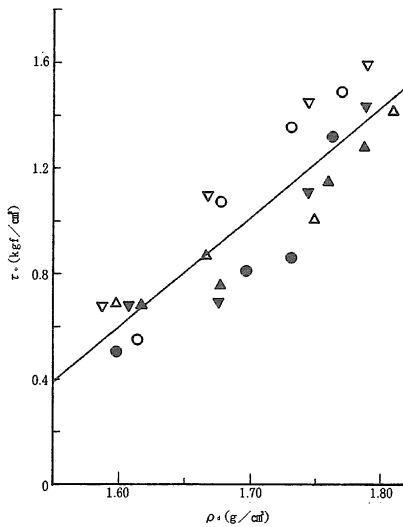


図2 砂礫材の基本剪断強度 τ_0 と乾燥密度 ρ_d の関係

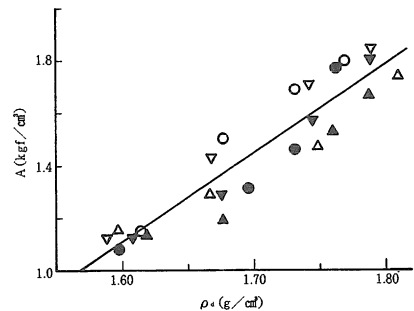


図4 砂礫材の非線形式の係数Aと乾燥密度 ρ_d の関係

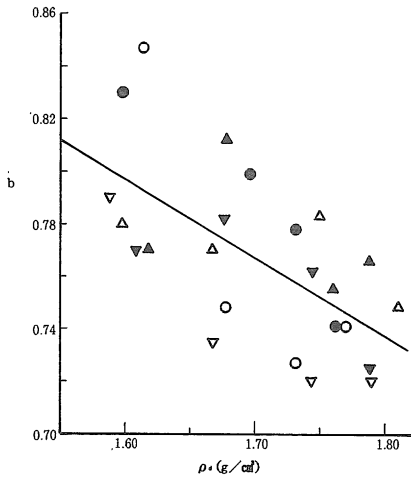


図5 砂礫材の非線形式の係数 b と乾燥密度 ρ_d の関係

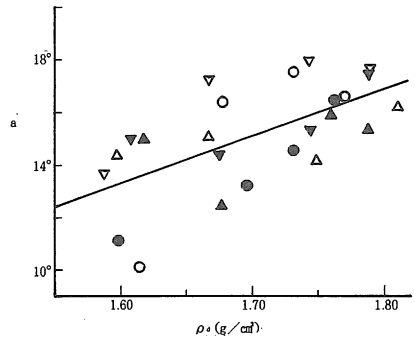


図7 砂礫材の内部摩擦角式の係数 a と乾燥密度 ρ_d の関係

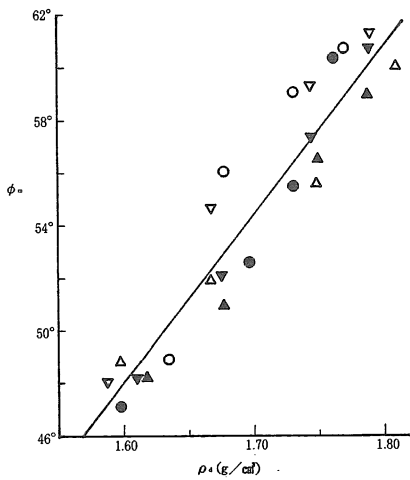


図6 砂礫材の内部摩擦角式の ϕ_m と乾燥密度 ρ_d の関係

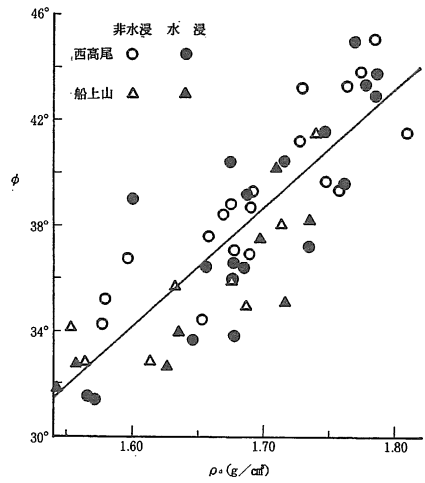


図8 凝灰岩材料の内部摩擦角 ϕ と乾燥密度 ρ_d の関係

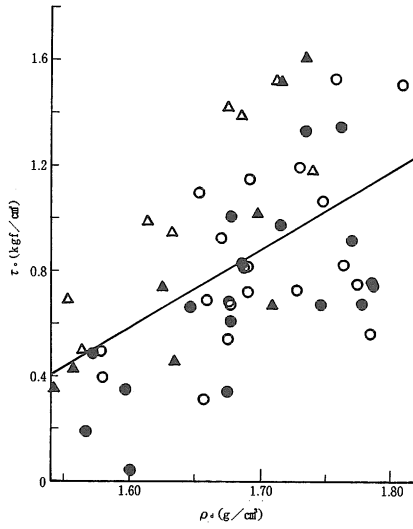


図9 凝灰岩材料の基本剪断強度 τ_0 と乾燥密度 ρ_d の関係

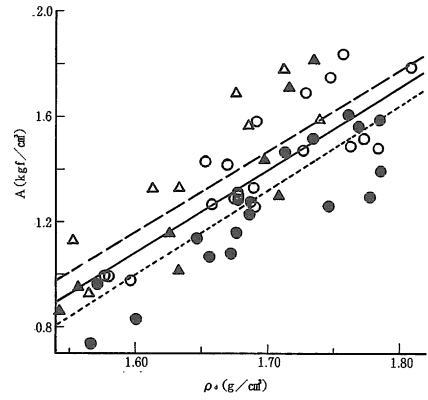


図11 凝灰岩材料の非線形式の係数Aと乾燥密度 ρ_d の関係

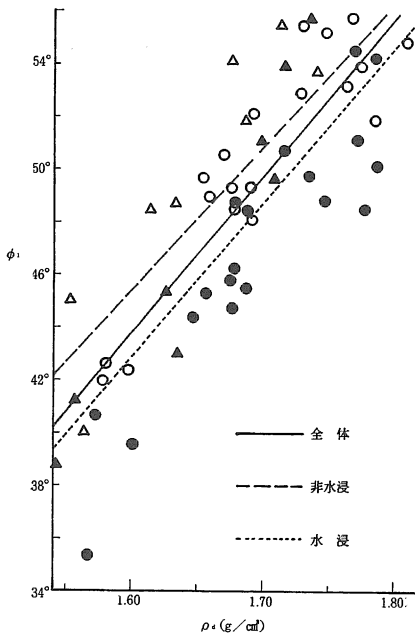


図10 凝灰岩材料の $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角 ϕ_1 と乾燥密度 ρ_d の関係

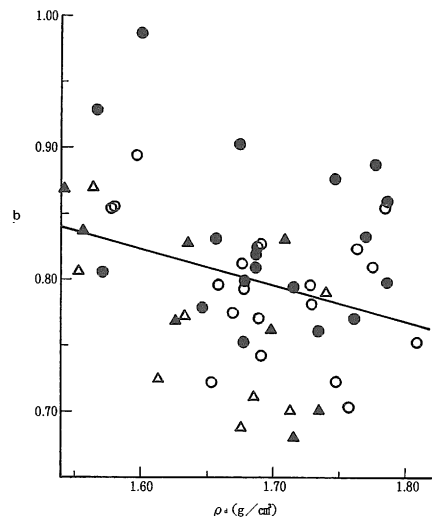


図12 凝灰岩材料の非線形式の係数bと乾燥密度 ρ_d の関係

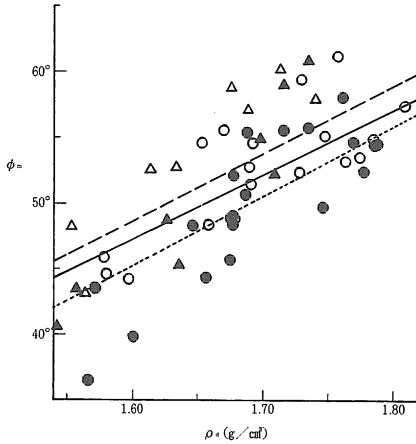


図13 凝灰岩材料の内部摩擦角式の ϕ_m と乾燥密度 ρ_d の関係

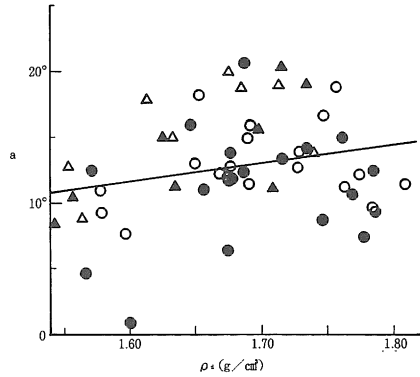


図14 凝灰岩材料の内部摩擦角式の係数 a と乾燥密度 ρ_d の関係

凝灰岩材料では実験数が多く、締固め含水比を変えていること、西高尾凝灰岩と船上山凝灰岩の2種の材料を用いていることなどから、砂礫材に比べてばらつきが大きい。また、砂礫材に比べて非水浸と水浸条件での差が大きくなる傾向も認められたため、差の大きな係数については全体の他に、非水浸と水浸についても別個に関係を求めた。

$$\begin{aligned} \phi &= -38.13 + 45.18 \rho_d & (r=0.853) \\ \tau_0 &= -4.147 + 2.958 \rho_d & (r=0.548) \\ \phi_1 &= -51.93 + 59.79 \rho_d & (r=0.841) \\ \text{非水浸 } \phi_1 &= -44.53 + 56.28 \rho_d & (r=0.874) \\ \text{水浸 } \phi_1 &= -58.45 + 62.82 \rho_d & (r=0.873) \\ A &= -3.943 + 3.139 \rho_d & (r=0.794) \\ \text{非水浸 } A &= -3.726 + 3.056 \rho_d & r=0.819) \\ \text{水浸 } A &= -4.139 + 3.211 \rho_d & (r=0.834) \\ b &= 1.258 - 0.272 \rho_d & (r=-0.301) \\ \phi_m &= -30.69 + 48.75 \rho_d & (r=0.707) \\ \text{非水浸 } \phi_m &= -33.46 + 51.33 \rho_d & (r=0.721) \\ \text{水浸 } \phi_m &= -39.02 + 52.69 \rho_d & (r=0.812) \\ a &= -10.53 + 13.88 \rho_d & (r=0.241) \end{aligned}$$

非水浸と水浸での ϕ_1 の差は $2^\circ - 3^\circ$ 、 ϕ_m の差は 3° 強で、いずれも非水浸の方が大きくなっている。また、砂礫材では係数 b 、 a と ρ_d の相関性が認められるが、凝灰岩材料ではばらつきが大きくなり、 b は ρ_d の増加とともにやや増加する傾向が認められる程度である。砂礫材の $b=0.75-0.85$ にあり、 $b_{ave}=0.778$ 、 $a=10-18$ にあり、 $a_{ave}=14.4$ である。凝灰岩では非水浸、水浸ともに $b=0.65-0.90$ 、 $a=8-20$ の間に分布しており、

$b_{ave}=0.789$ 、 $a_{ave}=14.0$ である。

つぎに剪断強度式の係数相互の関係を求める。まず、修正モール・クーロン式の ϕ 、 τ_0 、 ϕ_1 の関係は砂礫材

$$\begin{aligned} \tau_0 &= -2.210 + 0.0858 \phi & (r=0.718) \\ \text{非水浸 } \tau_0 &= -2.572 + 0.0978 \phi & (r=0.724) \\ \text{水浸 } \tau_0 &= -2.035 + 0.0788 \phi & (r=0.796) \\ \phi_1 &= 0.777 + 1.332 \phi & (r=0.885) \\ \text{非水浸 } \phi_1 &= 0.638 + 1.351 \phi & (r=0.853) \\ \text{水浸 } \phi_1 &= 0.319 + 1.329 \phi & (r=0.931) \\ \phi_1 &= 38.83 + 11.86 \tau_0 & (r=0.942) \\ \text{非水浸 } \phi_1 &= 38.86 + 11.35 \tau_0 & (r=0.969) \\ \text{水浸 } \phi_1 &= 37.74 + 13.57 \tau_0 & (r=0.940) \end{aligned}$$

凝灰岩材料はばらつきが大きく

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 0.143 + 0.0178 \phi & (r=0.182) \\ \phi_1 &= 16.13 + 0.8656 \phi & (r=0.637) \\ \phi_1 &= 39.93 + 10.47 \tau_0 & (r=0.787) \end{aligned}$$

砂礫材では ϕ とともに τ_0 は大きくなるが、凝灰岩材料ではほとんど傾向が認められない。

非線形式(7)の係数 A 、 b については砂礫材

$$\begin{aligned} b &= 0.917 - 0.1038 A & (r=-0.799) \\ \text{非水浸 } b &= 0.927 - 0.1123 A & (r=-0.804) \\ \text{水浸 } b &= 0.902 - 0.0903 A & (r=-0.790) \end{aligned}$$

凝灰岩材料

$$b = 1.031 - 0.1720 A \quad (r=-0.753)$$

いずれも A の増加とともに b は小さくなり、非線形性が大きくなる。

内部摩擦角を σ の関数とした (9) 式の係数 ϕ_m と a の関係は

$$\text{砂礫材} \quad a = -2.425 + 0.3214 \phi_m \quad (r=0.769)$$

$$\text{凝灰岩} \quad a = -14.38 + 0.5284 \phi_m \quad (r=0.741)$$

となり、 ϕ_m の増加とともに a も大きくなっている。このことは $\sigma = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角の大きい材料ほど、 σ の増加とともに内部摩擦角の減少量も大きいことを意味している。

式 (7) と (9) はいずれも剪断面上の応力 (σ , τ) を非線形式で表示したもので、式の形が異なっているものである。(7) 式の A と (9) 式の ϕ_m はそれぞれ、強度の大きさを、(7) 式の b と (9) 式の a は非線形性を表す係数と考えられる。そこで A と ϕ_m , b と a の相関関係を求めると次のようになる。

$$\text{砂礫材} \quad \phi_m = 27.43 + 18.75 A \quad (r=0.996)$$

$$a = 61.44 - 60.39 b \quad (r=-0.998)$$

$$\text{凝灰岩} \quad \phi_m = 24.98 + 19.83 A \quad (r=0.958)$$

$$a = 59.66 - 58.47 b \quad (r=-0.918)$$

剪断強度式の非線形性は σ の小さな部分で大きく生じる。これは τ_0 が大きい場合に非線形性が大きくなることを意味する。そこで A , b , ϕ_m , a と τ_0 の関係を求めると

砂礫材

$$A = 0.684 + 0.7519 \tau_0 \quad (r=0.975)$$

$$b = 0.855 - 0.0860 \tau_0 \quad (r=-0.860)$$

$$\phi_m = 40.35 + 13.98 \tau_0 \quad (r=0.964)$$

$$a = 9.944 + 5.079 \tau_0 \quad (r=0.839)$$

凝灰岩

$$A = 0.803 + 0.6474 \tau_0 \quad (r=0.899)$$

$$b = 0.921 - 0.1450 \tau_0 \quad (r=-0.866)$$

$$\phi_m = 40.08 + 13.79 \tau_0 \quad (r=0.909)$$

$$a = 5.891 + 8.364 \tau_0 \quad (r=0.784)$$

砂礫材、凝灰岩材料とも強度の大きさを示す A と ϕ_m は τ_0 の増加とともに大きくなる。また、 τ_0 の増加とともに b は減少して非線形性が大きくなり、 a は τ_0 とともに増加して、 σ の増加による ϕ_0 の減少量が大きい、すなわち、非線形性が大きくなっている。

あ と が き

非粘着性材料の剪断強度式としてモール・クーロン式、非線形式、内部摩擦角を垂直応力 σ の関数とする式の 3 つの式の係数について締固めた砂礫材と凝灰岩材料を用いて検討した。この結果

(1) 砂礫材では内部摩擦角 ϕ , $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での内部摩擦角 ϕ_1 , 基本剪断強度 τ_0 は乾燥密度 ρ_d の増加とともに大きくなる。凝灰岩材料でも ϕ , ϕ_1 , τ_0 は ρ_d の増加とともに大きくなるが、 τ_0 のばらつきは大きい。

(2) 非線形式の強度の大きさを表す係数 A は ρ_d とともに大きくなる。非線形性を表す係数 b と ρ_d の関係はばらつきが大きく、砂礫材で $b_{\text{ave}} = 0.718$, 凝灰岩材料で $b_{\text{ave}} = 0.789$ である。

(3) 内部摩擦角 ϕ_0 を σ の関数として表す式では、 ϕ_0 の大きさを示す ϕ_m は ρ_d の増加とともに大きくなる。 σ の増加による ϕ_0 の減少を表す係数 a と ρ_d の関係はばらつきが大きく、砂礫材で $a_{\text{ave}} = 14.4$, 凝灰岩材料で $a_{\text{ave}} = 14.0$ である。

(4) 剪断強度式の各係数間にもそれぞれ相関性が存在する。特に A と ϕ_m , b と a の相関性が良い。また、非線形性に大きく影響する τ_0 と A , b , ϕ_m , a の間にもかなり良い相関性がある。

本実験に用いた材料はいずれも細粒分を含んでいる。全く細粒分を含まない砂礫材でも基本剪断強度 (みかけの粘着力) は存在するから、ここに示したような係数相互の関係が存在すると考えられる。これらの傾向についても今後、検討を行なうことが必要である。

なお、本実験を行なうに際して実験材料を提供いただきました前の中国四国農政局東伯農業水利事業所の辻誠一所長様をはじめ、事業所の皆々様および本実験に多大のご協力を賜りました元島根大学農学部農業施設工学研究室の専攻生の遠藤直之君、上中別府哲也君、奈良井剛君、池田謙信君、大月隆志君、嶋田幸治君に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局開発課, フィルグムの耐震設計指針(案). 国土開発技術センター発行, 東京, 95 pp, 1991.
- 2) 鳥山眺司, 非粘着性材料の剪断強度式について—凝灰岩と砂礫材での事例—農土論集, 167: 109—115, 1993.