

九州大学工学部 正員 山内 豊 聡
 鹿児島大学農学部 正員 春山 元 寿
 九州大学工学部 学生員 ○江 頭 素 樹

はじめに 昭和39年の新潟地震以来わが国でも砂質土の動的性質やせん断強さなどがさかんに問題とされるようになった。またモントリオールの国際土質基礎工学会議でも、砂質土についての多くの発表がなされ、砂質土の諸性質が明らかにされつつある。筆者らは、さきに砂質土のせん断強さに対する粒子形状の影響が大きいことを述べた。すなわち粒子の形や表面の状態は、粒子間の接触面積および接触様式などに関係し、その形が不規則で、表面が粗である程粒子のインターロッキング効果が入きいと考えられる。本報では粒子の大きさや分布、粒子の形状およびせん断中の体積変化や負の間ゲキ水圧（負圧）が砂質土のせん断強さにどのように影響しているかについて、その概要を報告する。

試料および試験方法：実験に用いた試料は図-1に示すように粒度調整した比重2.66のケイ砂（Q-1, 2, 3, 4）、比重2.63の九丈構内砂（S-1, 2, 3, 4）および直径1.56mmのスチールボールをメッキしたもの（B-1）と表面を酸化させたもの（B-2）である。試料の形を肉眼的に観察すると、ケイ砂は針状あるいは薄片状の粒子が多く、九丈砂は鋭い稜角を有する粒子が多いようである。また粒子表面の状態を顕微鏡により観察すると、写真-1に見られるようにケイ砂はきめ（肌理）がなめらかであるが、九丈砂はきめがあらうようである。したがって、ケイ砂は特異な粒子形状を有するものであり、九丈砂は普通に見られる砂質土である。スチールボールの表面を酸化させたものはメッキしたものに比較して、きめがはなはだしくあらくなっている。供試体の大きさは直径5.0cm、高さ12.5cmであり、2種類の初期間ゲキ比 e_0 に調整し、側圧 Q_0 を0.5, 1.0, 1.5および2.0 kg/cm²の4段階にとり、圧縮速度1.0%/minの定ヒズミ法（ Q_0 一定、 Q_1-Q_0 増加）で三軸圧縮試験を行った。Q-1, 2, 3, 4, S-1およびB-1, 2については乾燥状態における排水試験（d-試験）と飽和状態における圧密非排水試験（CU-試験）を、S-2, 3, 4についてはd-試験を行った。

実験結果：d-試験およびCU-試験の応力-ヒズミ曲線から軸差応力が最大（ Q_1-Q_0 ）に達したときを破壊基準にとり、モール・クーロンの破壊式を用い、せん断強さ定数を求めたところ表-1に示すようにせん断抵抗角（ ϕ , ϕ' ）とともに見かけの粘着力（ C , C' ）が現われた。この粘着力は小さな値であるが試料はせん断時には、

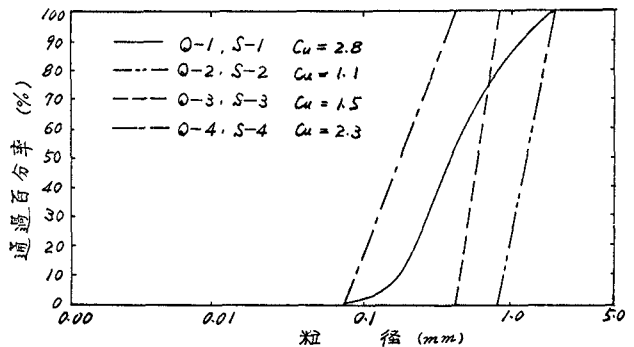


図-1 試料の粒度曲線



(a) ステールボール

表面をメッキしたもの
粒径 1.56mm



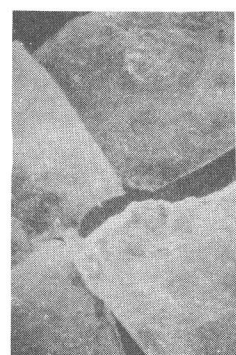
(b) ステールボール

表面を酸化腐食させたもの
粒径 1.56mm



(c) ケイ砂

粒径 0.840~2.000mm



(d) 九土砂

粒径 0.840~2.000mm

写真-1 試料の顕微鏡写真

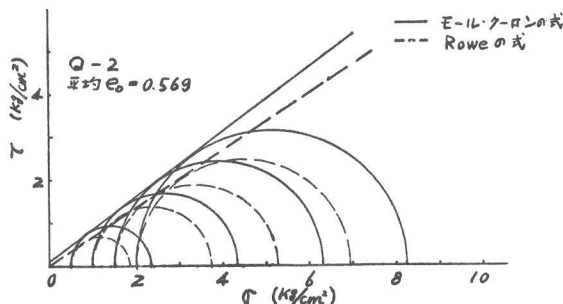
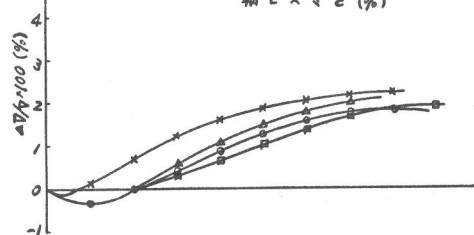
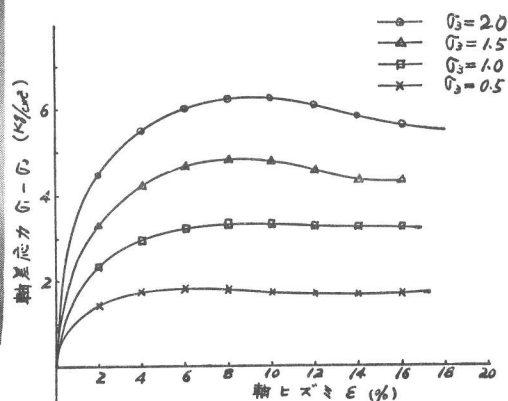


図-2 排水三軸圧縮試験

乾燥状態あるいは飽和状態であるの砂質土について一般に言われているように毛管圧力によって生じたものではない。さらにダイレイタンスファクターを $(1 + dv/v \varepsilon_1)$ と表わした Rowe²⁾ の応力ダイレイタンス式

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_1(1 + dv/v \varepsilon_1)} = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2}) \quad (1)$$

によって、内部摩擦角 ϕ_f を求めた。ここに dv/v = 単位体積変化の増分、 ε_1 = 最大主ヒズミの増分である。また、応力・体積変化・ヒズミ曲線と破壊包ラック線図の1例を図-2に示す。

実験結果についての考察；砂質土のせん断強さに対しては密度の影響が大きいことは明らかであるが、ここでは土の骨組構造に關係しそのせん断特性に影響する粒子の大きさ、粒度分布、粒子の形および粒子表面の状態などについて述べる。表-1に示す実験結果は e_0 が異なるので、それらの値をグラフ上にプロットして同じ e_0 に対して考察を行なった。

(1) 粒子の大きさの影響について；これはQ-2, 3, 4およびS-2, 3, 4の実験結果をそれぞれ検討することによって知ることができる。まずCaはケイ砂では e_0 が0.83より大きい場合粗粒

表-1 三軸圧縮試験結果

試料 番号	e ₀	圧密排水試験					排水試験						
		σ ₃ (kg/cm ²)	(σ ₁ -σ ₃)/2 (kg/cm ²)	U (%)	C (kg/cm ²)	φ ¹	e ₀	σ ₃ (kg/cm ²)	(σ ₁ -σ ₃)/2 (kg/cm ²)	1+ e ₀ /2	C _d (kg/cm ²)	φ ₁	φ ₂
ス キ ン ボ ー ル	B-1	0.662	0.5	0.674	-0.051		0.643	0.5	0.537	1.16			
		0.657	1.0	0.982	+0.08		0.639	1.0	1.153	1.02			
		0.652	1.5	1.553	-0.057		0.649	1.5	1.557	1.06			
		0.666	2.0	1.769	-0.027	0.00	0.648	2.0	1.673	-0.08	0.00	19°17'	21°37'
B-2	0.711	0.5	1.286	-0.270		0.726	0.5	1.105	1.41				
	0.711	1.0	2.307	-0.307		0.733	1.0	2.093	1.43				
	0.719	1.5	3.410	-0.255		0.712	1.5	3.270	1.50				
	0.725	2.0	3.765	-0.329	0.00	0.719	2.0	4.353	1.57	0.00	31°53'	20°10'	
Q-1	0.690	0.5	2.121	-0.119		0.706	0.5	1.663	1.00				
	0.698	1.0	3.087	-0.038		0.711	1.0	3.199	1.00				
	0.673	1.5	4.658	-0.045		0.722	1.5	4.196	1.00				
	0.698	2.0	6.205	+0.069	0.05	0.717	2.0	5.178	1.00	0.22	32°57'	32°22'	
Q-2	0.571	0.5	2.427	-0.269		0.565	0.5	1.841	1.26				
	0.574	1.0	4.337	-0.286		0.574	1.0	3.270	1.13				
	0.569	1.5	5.553	-0.236		0.570	1.5	4.838	1.21				
	0.578	2.0	7.133	-0.175	0.00	0.568	2.0	6.275	1.20	0.10	36°43'	33°25'	
Q-3	0.621	0.5	2.900	-0.415		0.631	0.5	1.691	1.16				
	0.638	1.0	4.431	-0.332		0.608	1.0	3.329	1.31				
	0.632	1.5	6.121	-0.402		0.623	1.5	4.757	1.16				
	0.641	2.0	6.776	-0.396	0.15	0.611	2.0	6.378	1.07	0.12	36°57'	32°05'	
Q-4	0.710	0.5	3.379	-0.466		0.721	0.5	1.764	1.34				
	0.717	1.0	4.844	-0.486		0.705	1.0	3.232	1.32				
	0.716	1.5	6.400	-0.486		0.714	1.5	4.726	1.32				
	0.708	2.0	7.632	-0.453	0.19	0.713	2.0	4.253	1.25	0.05	37°19'	32°13'	
Q-5	0.723	0.5	2.757	-0.336		0.723	0.5	1.781	1.27				
	0.728	1.0	4.719	-0.371		0.718	1.0	3.332	1.12				
	0.722	1.5	5.193	-0.186		0.721	1.5	4.614	1.00				
	0.712	2.0	7.140	-0.215	0.18	0.712	2.0	6.114	1.06	0.17	35°16'	35°20'	
Q-6	0.775	0.5	3.375	-0.473		0.769	0.5	1.772	1.37				
	0.763	1.0	4.172	-0.209		0.778	1.0	3.139	1.28				
	0.763	1.5	5.971	-0.394		0.764	1.5	4.606	1.28				
	0.776	2.0	7.428	-0.454	0.23	0.777	2.0	6.019	1.27	0.08	36°10'	30°15'	
Q-7	0.885	0.5	2.378	-0.267		0.847	0.5	2.052	1.29				
	0.871	1.0	4.264	-0.222		0.868	1.0	2.984	1.04				
	0.861	1.5	5.515	-0.222		0.871	1.5	4.504	1.00				
	0.881	2.0	7.413	-0.165	0.00	0.847	2.0	6.184	1.09	0.11	35°45'	36°40'	
Q-8	0.712	0.5	3.225	-0.447		0.721	0.5	1.809	1.41				
	0.717	1.0	4.571	-0.312		0.718	1.0	3.277	1.39				
	0.717	1.5	5.845	-0.238		0.732	1.5	4.760	1.33				
	0.727	2.0	7.289	-0.362	0.15	0.732	2.0	6.000	1.28	0.15	35°06'	31°20'	
S-1	0.719	0.5	2.011	-0.122		0.722	0.5	1.776	1.10				
	0.730	1.0	3.289	-0.050		0.716	1.0	3.665	1.27				
	0.710	1.5	4.553	-0.024		0.727	1.5	4.866	1.18				
	0.711	2.0	6.673	-0.041	0.00	0.721	2.0	6.572	1.11	0.07	38°06'	35°13'	
S-2	0.581	0.5	3.231	-0.274		0.591	0.5	2.347	1.44				
	0.594	1.0	4.739	-0.244		0.581	1.0	4.440	1.49				
	0.576	1.5	6.583	-0.257		0.583	1.5	6.517	1.15				
	0.578	2.0	7.778	-0.117	0.05	0.579	2.0	8.381	1.09	0.07	42°14'	35°11'	
S-3	0.829	0.5	1.621	1.06		0.833	0.5	1.130	1.13				
	0.833	1.0	2.564	1.07		0.835	1.0	4.564	1.07				
	0.831	1.5	5.558	1.08		0.831	2.0	6.578	1.08	0.04	36°35'	35°10'	
	0.700	0.5	2.012	1.49		0.699	1.0	3.494	1.47				
S-4	0.704	1.0	3.267	1.40		0.704	1.0	3.267	1.40				
	0.707	1.5	6.517	1.25		0.707	1.5	6.517	1.25	0.10	36°35'	35°06'	
	0.727	0.5	1.638	1.20		0.727	0.5	1.638	1.20				
	0.716	1.0	3.345	1.26		0.716	1.0	3.345	1.26				
S-5	0.703	1.5	4.698	1.20		0.703	1.5	4.698	1.20	0.07	36°41'	36°34'	
	0.700	2.0	4.112	1.10		0.700	2.0	4.112	1.10				
	0.763	0.5	2.046	1.52		0.763	0.5	2.046	1.52				
	0.775	1.0	3.784	1.43		0.775	1.0	3.784	1.43				
S-6	0.774	1.5	5.377	1.36		0.774	1.5	5.377	1.36				
	0.767	2.0	7.095	1.33		0.767	2.0	7.095	1.33	0.10	36°35'	32°40'	
	0.885	0.5	1.956	1.36		0.885	0.5	1.956	1.36				
	0.883	1.0	3.542	1.20		0.883	1.0	3.542	1.20				
S-7	0.872	1.5	5.257	1.24		0.872	1.5	5.257	1.24				
	0.876	2.0	6.832	1.28		0.876	2.0	6.832	1.28	0.10	37°51'	35°06'	
	0.730	0.5	2.348	1.56		0.730	0.5	2.348	1.56				
	0.728	1.0	4.075	1.57		0.728	1.0	4.075	1.57				
S-8	0.741	1.5	5.668	1.47		0.741	1.5	5.668	1.47				
	0.726	2.0	7.657	1.47		0.726	2.0	7.657	1.47	0.18	39°14'	32°05'	

の方が大きい。それ以下では細粒の方が大きく一定の傾向は見られないが、九太砂では細粒ほど大きく、また土粒子のインターロッキングに基因するダイレイタンスも細粒ほど大きい傾向がある。これは筆者ら¹⁾がさきに指摘したように土粒子のインターロッキング効果と砂質土の見かけの粘着カとの相関関係を示すものと考えられ、表-1および図-1に示すように $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ を式(1)によつてダイレイタンス補正すると C_d の項がなくなることによつても説明できる。これはケイ砂では粗粒、九太砂では細粒の方がやゝ大きい傾向を示しているが、顕著な差はない。このよび ϕ とともに粒子の大きさによつて一定の傾向は見られないが、これらは負圧の影響が大きい。すなわち負圧が大きいほど、

c, ϕ ともに増加している。

(2) 粒度の影響について；これはQ-1とQ-2, 3, 4およびS-1とS-2, 3, 4をそれぞれ比較することによって知ることができる。まずQおよび ϕ については、粒子の分布の差異による一定の傾向は明らかでなく、むしろ粒度分布による差異はないといえるかも知れない。またダイレイタンシーは粒度配合のよいQ-1, S-1の方が他のものに比較して小さい。これは粒子の大きさが大小さまざまな ϕ が小さくても、粒子の移動は間ゲキ内どうよく配列される、大きい膨張を示さないためと考えられ、このためCU-試験での負圧の発生は少ない。

(3) 粒子の形の影響について、せん断強度に対する粒子の形の影響を調べるためにケイ砂と九大砂のそれぞれの粒度における諸試験値を比較する。この場合ケイ砂と九大砂とは前述のように粒子表面の状態が異なるので、形ばかりでなく表面状態の影響も含まれていると考えられる。Qは密なときケイ砂と九大砂との差は少ないが、ゆるいときはケイ砂が九大砂より大きい。これはケイ砂粒子のインターロッキング効果が大きく、砂質土の見かけの粘着力に対しては粒子の形が関係していることを示すものと考えられる。また ϕ は全般的にケイ砂より九大砂の ϕ が大きい。これは九大砂のきめがケイ砂のそれより粗であることの影響であろう。ダイレイタンシーはケイ砂より九大砂が大きく、したがって負圧も同じ関係にある。これは粒子の形に基因する粒子の移動に関するマクロ・ダイレイタンシー³⁾と粒子の表面状態に基因する粒子の移動に関するミクロ・ダイレイタンシー³⁾の影響を受けていると考えられるが、これらの点については別の機会に報告したい。

(4) 粒子表面状態の影響について これはスチールボールのB-1とB-2を検討することによって知ることができる。顕微鏡観察によつて、その表面状態はB-1はケイ砂およびB-2と九大砂がそれぞれ対応していると考える方がよいであろう。B-1の ϕ は等球の六方系充まんの間ゲキ比に近い値を示し、1個の粒子の接触点の数は8個であると考えられる。これは統計的には最も出現頻度の多い充まん方式である。またB-2は粒子表面があらいうで摩擦のためにB-1ほど充まんできず、 ϕ は正方系充まんと六方系充まんの間にあり、1個の球の接触点の数は6と8の間にありと考えられる。B-2はB-1よりゆるいにもかかわらず、その表面状態の影響によつて、はなはだしく大きい ϕ , ϕ を示し、その差は10°以上にも達している。またダイレイタンシーおよび負圧ともに表面のあらいうが大きい。

むすび； 三軸圧縮試験結果によつて砂質土のせん断特性に影響する諸因子を検討したところ、全般的な傾向としてはつぎのようなことが考えられる。砂質土のせん断抵抗角は粒子の大きさおよび粒度によつては大きい差異はなく、粒子表面の状態によつて最も影響を受けている。この点はKirkpatrick⁴⁾のデータと一致する。また粒子の形は砂質土の見かけの粘着力に影響し、丸い粒子はそれを示さないが、針状あるいは薄片状の粒子の集合はインターロッキングによつてそれを有するようになる。さらにせん断中の体積変化の影響は一般に考えられるように摩擦ばかりでなく見かけの粘性にも関係し、負圧も両者に関係すると考えられる。

参考文献 1) 香山元寿, 山内豊隆；ミラスのような砂質土のインターロッキングについて 第1回工學研究発表会講演集 昭41. 11, PP. 129~133 2) Rowe, P.W.; *The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact*, Proc. Roy. Soc. London, A-269, 1962, PP. 500~527 3) Rosengvist, I. Th.; *Physico-chemical Properties of Soils: Soil-Water Systems*, Proc. ASCE, Vol. 85 No. SM2, Apr. 1959, PP. 31~53. 4) Kirkpatrick, W.M.; *Effect of Grain Size and Grading on the Shearing Behaviour of Granular Materials*, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, 1965, PP. 273~277