

실트질 海砂의 力學的 特性 및 舉動에 관한 研究

Strength Characteristics and their Behaviours of Marine Silty Sands

張 秉 郁* · 宋 昌 燮** · 禹 喆 雄***
Chang, Pyoung Wuck · Song, Chang Seob · Woo, Chull Woong

Summary

A series of isotropic consolidation tests, undrained and drained triaxial compression tests was carried out to investigate the physical characteristics and behaviours of marine silty sands collected from the western coast of Korea.

This study also included a theoretical development of the constitutive equation to evaluate stress-strain relationship and volume change of silty sands.

The results and main conclusions of the study are summarized as follows;

1. Isotropic compression and swelling index are linearly decreased with an increase in relative density.
2. Both undrained shear strength and elastic modulus are increased with an increase in relative density and confining pressure.
3. Internal friction angles obtained from drained and undrained compression tests of the soils are proportional to relative density.
4. The phenomenon of dilatancy of each sample is less profound when confining stress is increased but more profound when relative density is increased.
5. The slope of critical state lines is 1.78 for Saemangum, 1.70 for Siewha and 1.26 for Sukmoon sands.
6. In this study, Drucker-Prager type criterion is used and hardening function of Cap model is modified by hyperbolic function. This will improve a lack of physical meaning of hardening parameters in conventional Cap model.
7. A newly developed constitutive equation to the forementioned silty sands and checked its applicability. This is in good agreement with the measured data.

* 서울대학교 農業生命科學大學
** 서울대학교 農業開發研究所
*** 서울대학교 大學院

키워드 : 실트질 海砂, 相對密度, 等方壓縮指數, 等
方膨脹指數, 彈性係數, 剪斷強度, 構成式,
Cap 모델

I. 緒 論

防潮堤 大型化 되고 深海化 됨에 따라 성토 재료의 구득이 심각한 문제이며, 이러한 재료를 난을 해결하기 위하여 우리나라 서해안에 광범위하게 산재해 있는 모래를 이용하려는 측면에서도 상당히 중요하고 필요한 것이다. 西海岸에서 채취가능한 모래는 일반적으로 실트질 細砂(0.009~0.125mm)로서 盛土材料로서는 극히 不適合하며, 특히 海砂의 특성 때문에 많은 工學的 문제를 야기하고 있다. 이러한 해사를 이용하기 위해서는 해사의 剪斷特性을 규명하고 舉動特性을 연구하므로써 토체와 내부구조의 문제와 토체의 거동을 예측할 수 있고 발생 가능한 사고를 미연에 防止할 수 있다.

본 연구는 각종 室內試驗을 통하여 海砂의 제반 물리적 성질과 공학적인 성질을 정확하게 파악하여 방조제의 盛土材料로서 또는 기타 건설재료로서 사용가능성을 조사하며 탄소성 이론을 중심으로 토질상수인 彈性係數, 포아슨비, 內部摩擦角, 間隙比 등을 이용하여 해사의 체적변화, 應力-變形率 관계를 표현할 수 있는 구성모델을 개발하여 침하, 剪斷破壞, 지진하중에 의한 液狀化 가능성 등 海砂地盤의 舉動을 분석하기 위한 基礎資料를 提供하는데 있다.

II. 材料 및 試驗方法

1. 材 料

본 研究에서 사용된 試料는 현재 수행 중에 있는 西海岸 지역의 대규모 防潮堤 구간을 중

심으로 새만금地區, 시화地區, 석문地區 등 3개 지역에서 攪亂試料로 採取되었으며 연구의 목적에 부합하도록 조개껍질 등의 不純物을 제거하였으며 시료의 特性은 Table-1과 같으며 Fig. 1은 각 시료의 粒度 分布를 나타내고 있다. 3개 지구의 시료는 비교적 均等하며 새만금 및 시화지구는 비교적 등글고 細砂에 가까운 반면 석문지구는 粒子가 아주 微細한 실트의 混合을 이루고 있다.

2. 試驗 方法

본 研究에서는 相對密度에 의하여 海砂의 상태를 나타내었으며 MSP(Multiple Sieving Pluviation) 방법을 수정하여 균등한 공시체를 동일한 조건으로 반복하여 만들었다. 공시체의 치수는 壓縮強度에 영향을 크게 미치는 것으로 나타나 있으나, 일반적으로 높이와 직경의 비(L/D)가 2.0~3.0 정도에서 그 影響이 적으므로 본 연구에서는 L/D의 비가 2.5 (H=12.5cm, D=5.0cm)인 供試體를 사용하였다. 공시체는 각 시료에 대하여 느슨, 보통, 조밀한 상태를 대표할 수 있도록 相對密度를

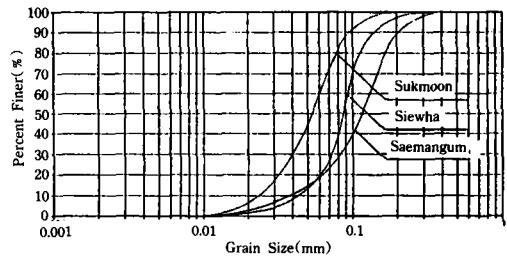


Fig. 1. Grain size distribution curves (resedimented sample)

Table-1. Physical properties of soils used

Sample	G _s	W _n	$\gamma_{dmax}/\gamma_{dmin}$	#100 passing	#200 passing	Roundnes
Seamangum	2.71	34.2	1.576/1.210	72.0	25.2	0.31
Siewha	2.70	36.6	1.515/1.164	94.2	32.8	0.28
Sukmoon	2.73	31.4	1.486/1.065	98.6	87.3	0.16

Table - 2. Initial conditions of each specimen

Specimen	Saemangum			Siewha			Sukmoon		
	20	50	80	20	50	80	20	50	80
Relative Density(%)	20	50	80	20	50	80	20	50	80
Dry Density(g/cm ³)	1.261	1.363	1.480	1.223	1.320	1.434	1.129	1.243	1.381
Void Ratio	1.149	0.988	0.381	1.208	1.045	0.883	1.148	1.196	0.977

각각 20%, 50%, 및 80%가 되도록 調整하였으며 각 공시체의 初期條件은 Table -2와 같다.

실트질 해사의 排水 및 非排水 特性을 조사하기 위하여 等方壓密, 非排水 및 排水三軸試驗을 行하였다. 실트질을 포함한 세사의 경우 포화과정에서 가해지는 背壓에 의해서 시료 내부의 構造가 變化될 可能性이 있고 또한 기존의 方法에 의해 포화된 시료는 상당한 기간이 경과하여도 100% 포화에는 도달하지 않고 약 95% 정도만 포화되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 側壓보다 적은 압력의 CO₂ 가스를 조정기를 통하여 서서히 공기를 위로 排出 시킨 후 飽和시키는 方法을 이용하였다. CO₂ 가스를 5분 주입하고 포화시킨 경우에는 포화도가 99.9%에 도달하여 이 方法은 상당한 이점이 있다.

III. 結果 및 考察

동방압밀시험, 비배수 및 배수 삼축시험 결과 나타난 실트질 해사의 강도특성을 기술하였으며 도출된 제 관계의 매개변수는 Table - 3에 기술 하였다.

1. 等方壓密 舉動

Fig. 2는 代表的으로 새만금(Dr=20%) 試料의 동방압밀시험결과 나타난 間隙比-荷重의 關係를 圖示한 것이다. 이를 바탕으로 각 시료의 等方荷重에 의한 體積의 壓縮 및 膨脹 거동을 나타낼 수 있는 媒介變數인 等方壓縮指數(λ) 및 等方膨脹指數(κ)를 구한 뒤 이들의 關係를 相對密度의 變化에 따라 도시하면 Fig. 3과 같다. 이 계수는 상대밀도에 따라 변

화하며 다음 식(1)과 같은 線型關係式으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda &= A_1 - B_1 \cdot Dr(\%) \dots\dots\dots (1) \\ \kappa &= A_2 - B_2 \cdot Dr(\%) \end{aligned}$$

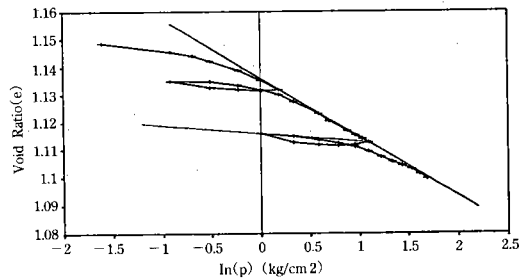


Fig. 2. Relationship between void ratio and consolidation pressure for the Saemangum 20%

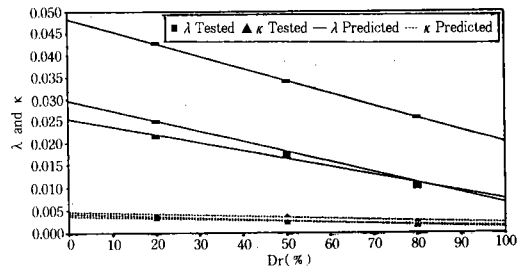


Fig. 3. Change in λ and κ with relative density

2. 非排水 舉動

각 供試體의 側壓을 달리하여 強度의 變化를 조사하였으며, 最高應力의 약 80% 정도에서 際荷再載荷 시험을 行하여 彈性係數의 變化상태도 조사하였다.

Table - 3. Coefficients of equation (1)~(10)

Function	Coefficients	Saemangum			Siewha			Sukmoon		
1	A ₁	0.02551			0048311			0.02968		
	B ₁	0.00018			0000282			0.00023		
	A ₂	0.003538			0004659			0.004225		
	B ₂	0.00002			0000024			0.00003		
2	Dr	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%
	C ₁	0.350	1.763	2.978	0.336	1.291	2.147	0.528	0.917	1.200
	D ₁	2.593	3.050	3.482	2.868	3.913	4.677	0.985	2.236	3.752
3	σ ₃	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	C ₂	0.764	1.5955	3.0648	0.761	2.000	3.072	0.043	0.0303	0.025
	D ₂	0.0486	0.638	0.0634	0.0463	0.0633	0.0764	0.0385	0.0604	0.0858
4	E ₁	-0.493			-0.368			0.007		
	E ₂	0.044			0.032			0.016		
	E ₃	2.301			2.312			0.018		
	E ₄	0.015			0.03			0.046		
5	Dr	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%
	F ₁	59.433	231.87	453.67	25.633	76.167	163.13	356.70	143.37	453.67
	G ₁	301.4	257.6	262.4	365.7	452.5	508.0	304.2	257.6	262.4
6	σ ₃	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	F ₂	96.066	203.85	390.37	153.33	261.28	476.72	-	-	-
	G ₂	5.85	6.711	5.20	3.173	5.272	5.545	-	-	-
7	H ₁	-80.206			-26.272			-		
	H ₂	6.571			2.292			-		
	H ₃	306.3			323.38			-		
	H ₄	-0.65			2.372			-		
8	I ₁	33.673			34.132			12.075		
	I ₂	0.069			0.123			0.368		
9	σ ₃	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
	J ₁	1.49	-	4.20	0.883	-	3.505	1.404	-	5.029
	J ₂	0.0106	-	0.0285	0.146	-	0.0339	0.0102	-	0.0258
10	K ₁	36.08			38.83			3.30		
	K ₂	0.0917			0.0667			0.1167		

시료의 軸差應力-軸變形率 거동을 대표적으로 석문(Dr=80%) 시료에 대하여는 Fig. 4 와 같다.

가. 最大應力의 變化

새만금 및 시화 시료는 비교적 細粒質의 모래와 같은 특성을 가지고 있으나, 석문시료의 경우는 실트질의 함량이 많은 관계로 앞의 두 시료와는 다른 응력의 樣相을 보여주고 있다. 특히, 느슨한 경우의 시료는 작은 충격이나

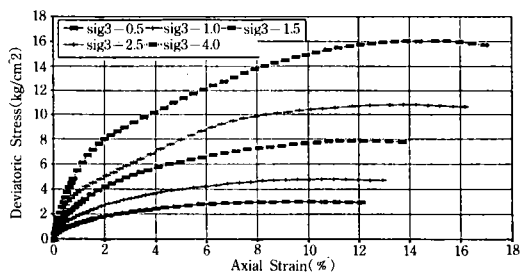


Fig. 4. Deviatoric stress-axial strain for Sukmoon 80%

含水比에 대하여 아주 銳敏한 반응을 보이고 있으나 축압이 증가함에 따라 일반적인 砂質土의 양상을 보여주고 있다. 最大應力은 축압 및 相對密度에 따라 변화하므로 그 影響을 檢討하기 위하여 앞에서 구한 시험결과를 축압 및 상대밀도 별로 再構成하면 Fig. 5~6과 같다. 이들의 관계로부터 최대응력을 상대밀도 및 축압의 함수형태로 나타내면 다음 식(2), (3)과 같다.

축압에 따른 변화

$$(q)_{max} = C_1 + D_1 \cdot \sigma_3 \dots\dots\dots (2)$$

상대밀도에 따른 변화

$$(q)_{max} = C_2 + D_2 \cdot \sigma \dots\dots\dots (3)$$

이들의 관계를 종합하여 축압 및 상대밀도에 대한 응력으로 나타내면 다음식과 같다. 즉,

$$(q)_{max} = E_1 + E_2 \cdot Dr + E_3 \cdot \sigma_3 + E_4 \cdot (Dr \cdot \sigma_3) \dots\dots\dots (4)$$

나. 彈性係數의 變化

축압이 증가함에 따라서 탄성계수는 증가하는 경향을 보여주었으며 대표적으로 석문시료에 대하여 Fig. 7에 보이고 있다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$축압에 따른 변화 E_{ur} = F_1 + G_1 \cdot \sigma_3 \dots (5)$$

새만큼 시료와 시화 시료의 경우 탄성계수는 상대밀도가 따라 증가하는 것으로 나타났다.

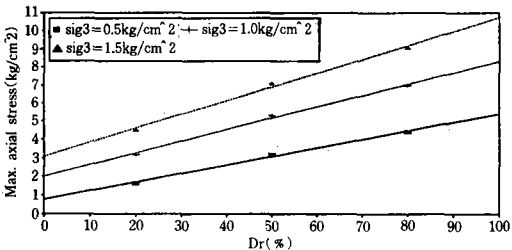


Fig. 5. Change in max. deviatoric stress with relative density of Siewha specimen

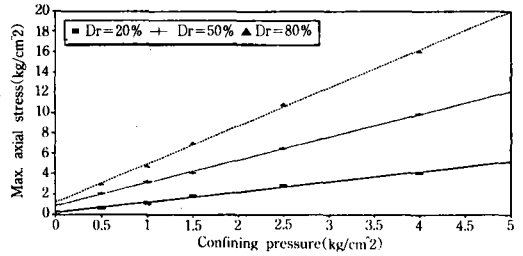


Fig. 6. Change in max. deviatoric stress with confining pressure of Sukmoon specimen

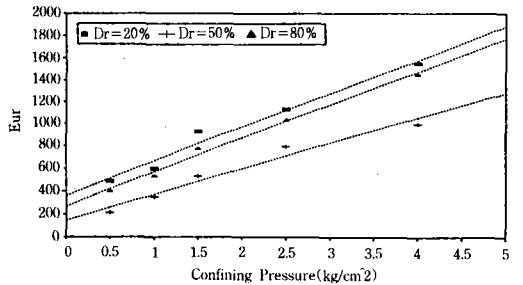


Fig. 7. Change in elastic modulus with confining pressure of sukmoon specimen

반면에 실트질이 많이 포함되어 있는 석문 시료는 다른 시료와 그 특성이 다르게 나타났다. 즉, 상대밀도가 증가할 때 구속응력이 낮을 때에는 탄성계수가 크게 증가하나 구속압력이 큰 경우 증가율이 鈍化되는 현상을 보였다. 또한 상대밀도 20%인 시료의 경우, 작은 하중에서 파괴가 일어나지만 계속되는 재하에 의하여 시료가 계속 膨脹하면서 응력이 증가하였다. 결국, 최대응력의 80%의 값은 시료의 탄성적 거동의 범위를 넘어서게 되었다. 따라서 이 경우의 탄성계수는 아주 작은 변형 상태에서 구하게 되므로 값이 매우 크게 나타난다. 이 경우 상대밀도가 약 50% 근처에서 彈性係數는 最少의 값을 나타내고 있다. 결국, 석문시료는 탄성계수의 상대밀도에 따른 변화를 대한 함수의 형태로 표현할 수 없었으며 다른 두지구의 관계는 다음 식(6)과 같다.

상대밀도에 따른 변화

$$E_{ur} = F_2 + G_2 \cdot Dr \dots\dots\dots (6)$$

석문시료를 제외한 2지구에 대하여 이들 관계를 종합하여 축압 및 상대밀도에 대한 함수로 나타내면 다음 식(7)과 같다. 즉,

$$E = H_1 + H_2 \cdot Dr + H_3 \cdot \sigma_3 \cdot H_4 \cdot (Dr \cdot \sigma_3) \dots\dots (7)$$

다. 内部摩擦角의 變化

3개 지구의 시료의 내부 마찰각과 상대밀도의 관계는 Fig. 8과 같다. 새만금, 시화지구의 시료는 상대밀도의 변화에 따른 내부마찰각의 변화가 緩慢한 반면 석문 시료는 급격히 增加하는 것으로 나타났다. 석문시료의 변화율이 큰 이유는 석문시료는 실트질을 많이 포함하고 있어서 모래 입자간의 공극을 실트가 채워서 최대 상대밀도가 크고 따라서 상대밀도의 변화에 따른 건조밀도의 변화가 다른 두 시료에 비하여 크기 때문으로 판단된다. 이들은 다음의 선형관계식으로 표현할 수 있다.

$$\phi = I_1 + I_2 \cdot Dr(\%) \dots\dots\dots (8)$$

3. 排水舉動

각 공시체의 축압을 달리한 상태에서 배수 거동을 관찰하였으며 석문시료의 구속응력 1.5kg/cm²의 경우에 대하여 시료의 축변형률에 따른 축차응력 및 체적변형거동을 Fig. 9에 도시하였다.

가. 最大應力의 變化

최대응력과 상대밀도와의 관계는 새만금시료에 대해 Fig. 10과 같으며 구속응력이 클수록 상대밀도에 따른 최대응력의 증가비율이 크게 나타났다. 이들의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(q) = J_1 + J_2 \cdot Dr(\%) \dots\dots\dots (9)$$

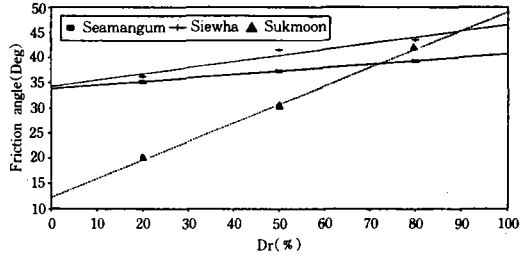


Fig. 8. Change in internal friction angle with relative density

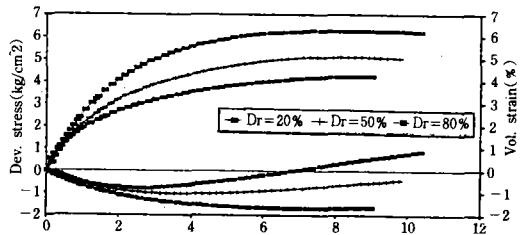


Fig. 9. Drained behaviour of Sukmoon specimen ($\sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

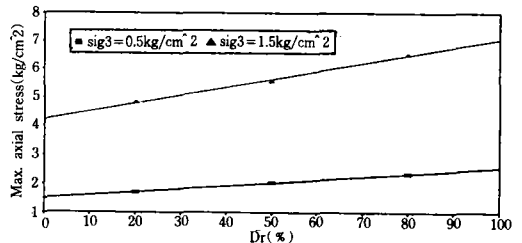


Fig. 10. Relationship between max. axial stress and Dr for drained condition (Saemangum)

나. 内部摩擦角의 變化

3개 지구의 시료에 대한 내부마찰각과 상대밀도와의 관계는 Fig. 11과 같으며, 내부마찰각은 상대밀도에 따라서 증가하였고 그 비율은 시료에 따라 다르게 나타났으며 석문시료가 가장크게 나타났다. 이는 비배수 마찰각의 변화양상과 유사한 것으로 판단된다. 이들의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\phi = K_1 + K_2 \cdot Dr(\%) \dots\dots\dots (10)$$

4. 應力經路

3개 지구의 시료에 대한 배수 및 비배수 應力經路를 p-q 평면상에 도시하였다. Fig. 12 는 시화 시료의 상대밀도 50%에 대하여 축압이 0.5kg/cm² 및 1.5kg/cm² 일 때, 유효응력 및 全應力 經路를 보여주고 있다. 이 시료의 경우, 상당히 稠密한 상태이므로 거동은 조립토와 유사하다. 즉 응력이 증가함에 따라 어느 정도의 응력상태까지는 하중이 증가함에 따라 어느 정도의 응력상태까지는 하중이 증가함에 따라 체적이 감소하고 過剩間隙水壓이 증가하지만 그 상태를 초과하면 다이러턴시 현상에 의하여 체적이 증가하며 그 결과 間隙水壓의 값은 점점 감소한다. 따라서, 有效應力 經路는 間隙水壓의 增加에 따라 그 형태가 좌

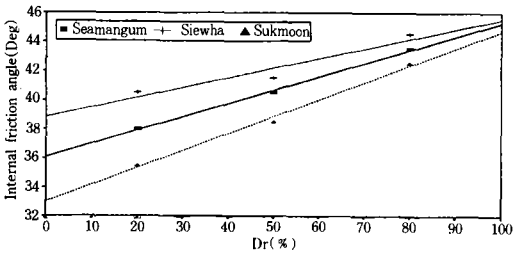


Fig. 11. Relationship between internal friction angle and Dr for drained condition

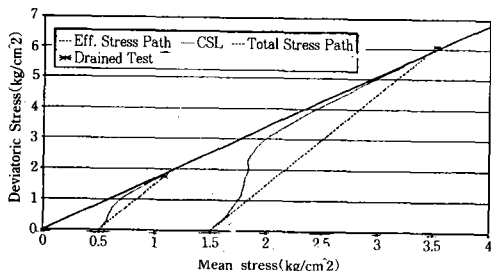


Fig. 12. Stress path for Siewha Dr=50% specimen

측으로 이동하다가 어느 응력점을 통과하면서 공극수압이 감소하게 되어 우측으로 이동하면서 한계상태선에 접근하게 된다. 시화 50% 시료 또한 새만금지구의 시료와 마찬가지로 비교적 조밀한 상태에 있어 거동은 조립토와 유사하게 나타난다. 그러나 限界狀態의 傾斜는 약간 작은 편이다. 석문 20%의 경우는 느슨한 상태이므로 하중의 증가에 따라 계속하여 체적의 감소를 보이며 또한 공극수압은 계속하여 증가한다. 축압에 따른 有效應力의 經路는 서로 비슷한 형상을 보여주고 있다. 앞서 기술한 시험 결과로부터 배수 및 비배수 상태의 한계상태의 응력에 대한 기울기를 구하면 새만금에서 1.78, 시화에서 1.70, 석문에서 1.26이다.

V. 構成式的 開發

배수시험에서 나타난 최대응력을 $I_1 - \sqrt{J_2}$ 空間에서 도시하면 Fig. 13과 같이 直線을 나타내고 있으며 이는 시료의 破壞點을 도시한 결과이다. 따라서 본 연구에서는 破壞函數로서 Drucker-Prager 형을 이용하였는데 이는 다음과 같다.

$$f_1 = \alpha I_1 - \sqrt{J_2} + \kappa \dots\dots\dots (11)$$

여기서 I_1 : 유효응력텐서의 1次 不變量
 J_2 : 편차응력텐서의 2次 不變量
 α 와 κ : 흙의 摩擦角과 粘着力에 關 계된 材料常數이다.

또한 Hunang과 Chen(1987)에 의하면 Drucker-Prager 모델의 매개변수는 Mohr-Columb 강도정수에 의하여 삼축압축의 경우에 α 와 κ 를 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \kappa = \frac{6c \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \dots\dots (12)$$

여기서 ϕ 는 재료의 내부마찰각, c 는 점착력이다.

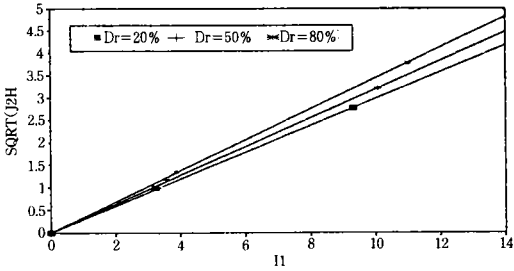


Fig. 13. Failure envelope on $I_1-\sqrt{J_2}$ space of Saemangum specimen

等方壓密試驗에서 나타나는 탄성체적변형률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d\epsilon_v^e = \frac{dp}{K} \dots\dots\dots (13)$$

소성체적변형률은 전변형률에서 탄성성분을 除去함으로서 구할 수 있다. 즉,

$$d\epsilon_v^p = (d\epsilon_v - \frac{dp}{K}) \dots\dots\dots (14)$$

소성 체적변형률과 등방응력의 관계는 DiMaggio와 Sandler(1971)의 Cap모델에서는 다음과 같은 식으로 표현하고 있다.

$$X = -\frac{1}{D} \ln(1 - \frac{\epsilon_v^p}{W}) \dots\dots\dots (15)$$

그러나 위 식은 그 매개변수인 D, W 를 施行誤差法에 의하여 구하여야 하므로 그 정확한 값을 구하기가 어려울 뿐만 아니라 그 物理的 意味가 不分明하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 쌍곡선 방정식을 이용한다.

$$\epsilon_v^p = \frac{p}{\frac{1}{D} + \frac{1}{W}p} \dots\dots\dots (16)$$

여기서, D 와 W 는 각각 $p-\epsilon_v^p$ 곡선의 점근선값과 初期接線係數이다. 따라서, D 는 일정한 체적에서의 체적변형률을 의미한다. 또한 이러한 결과를 재료가 파괴되었을 때 체적이 일정한 상태로 그 變形率이 무한히 증가하

다는 限界狀態理論의 가정과도 부합되는 것이다. 따라서 기존의 Cap 모델의 단점인 매개변수의 물리적 의미의 결여라는 점과 그 매개변수의 결정과정의 不明確性을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 14에서 새만금시료에 대해 식 (13)에 의하여 구한 소성체적변형률과 식 (16)은 실험결과와 잘 一致하고 있다.

4. 試驗結果와 比較 및 考察

앞서 개발된 구성모델을 檢證하기 위하여 본 연구에서 대상이 된 3곳의 시료에 대하여 수행된 시험결과를 본 모델에 적용하였다. 모델에 요구되는 媒介變數는 전부 9개 이며 다음과 같다.

- 가. 탄성거동 : E, ν
- 나. 등압압밀거동 : λ, κ
- 다. 파괴기준 : α, κ
- 라. 경화거동 : D, W, R

이들 매개변수는 R 을 제외하면 앞서 시험결과와 같은 통상적인 실험실의 실험을 통하여 구할 수 있는 값들이며 또한 이는 기존의 Cap 모델과 그 매개변수의 수가 같지만 기존의 모델이 경화거동을 기술하는 매개변수를 시행오차를 통하여 구하는 것에 비하여 본 모델에서는 시험결과를 이용하여 직접 구할 수 있다. 이는 기존 모델에 비하여 그 적용성을 크게 향상시킬 수 있는 결과라고 판단된다. Table-4는 시료의 매개변수이며 Fig. 15~17

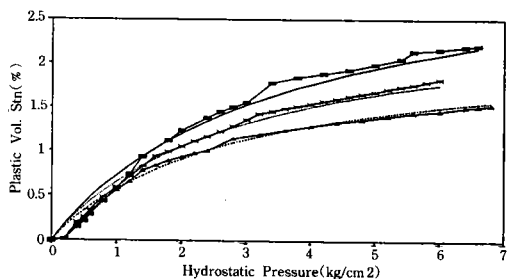


Fig. 14. Plastic volumetric strain with hydrostatic pressure

Table - 4. Model parameters

Specimen	Dr	D	W	α	κ	R
Saemangum	20%	0.93	3.35	0.273	0.0	5.9
	50%	0.87	2.64	0.319	0.0	5.5
	80%	0.77	2.21	0.344	0.0	5.8
Siewha	20%	0.82	3.90	0.319	0.0	5.3
	50%	0.76	3.31	0.327	0.0	5.3
	80%	0.72	1.72	0.352	0.0	5.9
Sukmoon	20%	0.75	5.95	0.277	0.0	6.1
	50%	0.84	5.34	0.302	0.0	6.2
	80%	1.85	3.95	0.336	0.0	4.68

은 각각 새만금 시료(Dr=50%, $\sigma_3=1.5$), 시화시료(Dr=80%, $\sigma_3=0.5$) 그리고 석문시료(Dr=20%, $\sigma_3=1.5$)의 예측된 거동을 보여주고 있다.

실험결과와 본 모델에 의한 결과를 비교하면 본 모델은 구속응력이 작은 경우에는 대체

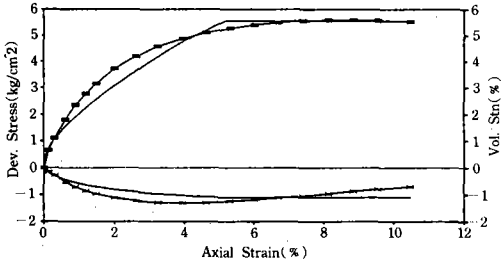


Fig. 15. Comparison between test result and model prediction for Saemangum (Dr=50%, $\sigma_3=1.5$)

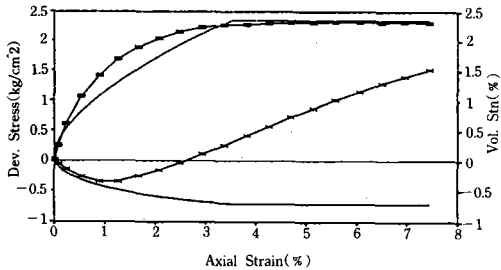


Fig. 16. Comparison between test result and model prediction for Siewha(Dr=80%, $\sigma_3=0.5$)

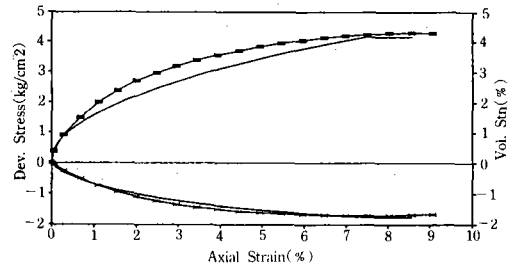


Fig. 17. Comparison between test result and model prediction for Sukmoon(Dr=20%, $\sigma_3=1.5$)

로 파괴에 이르는 동안 축변형률을 다소 크게 평가하는 경향을 보이고 있으며 이에 따라 체적 변형률도 크게 산정 되었으며 구속응력이 높은 경우에는 파괴시의 축변형률이 다소 낮게 나타났다. 그러나 이는 구속응력에 따라서 매개변수 R 값을 동일하게 적용하여 얻어진 결과로서 구속압에 따라서 R 값을 달리할 경우 본 모델은 축변형률-축차응력관계를 성공적으로 묘사할 수 있다. 이는 R 값이 구속응력 즉, 초기 상태에 의존하고 있으며 응력에 따라서 R 값이 본 모델에서와 같이 일정하지 않을 수도 있다. 또한 본 모델은 다이러턴시 거동을 기술하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점은 구성식에 비연관 유동칙을 적용하고 R 값의 변화를 고려하면 극복할 수 있을 것으로 보이나 이 경우 그 적용성이 떨어지므로 좀더 연구가 필요하다.

IV. 結 論

실트질 해사의 역학적 특성과 거동을 평가하기 위하여, 서해안의 3 지점의 시료를 채취하여 등방압밀시험, 배수 및 비배수 삼축시험 등 일련의 실험을 행하였다. 실트질 해사의 거동을 기술하도록 Cap형의 구성식을 개선하였으며 실험된 결과에 적용하여 그 적용성을 검토하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 등방압축시험의 결과, 등방압축지수와 등방팽창지수는 상대밀도의 증가에 따라 거의 직선적으로 감소하며, 그 비는 1/7~1/9 정도였으며 세립분이 증가할수록 그 비는 감소하는 경향을 보였다.

2. 시료의 비배수 전단강도와 탄성계수는 상대밀도가 커지거나 구속압력에 증가함에 따라 증가한다.

3. 배수 및 비배수 내부마찰각은 상대밀도에 따라서 증가하였다.

4. 세립분이 많은 석문 시료의 경우는 쉽게 다이러턴시가 발생되지 않으나 새만금 시료의 경우에는 낮은 압력에서도 쉽게 발생하였다. 각 시료는 축압이 증가함에 따라 다이러턴시가 완화되는 반면 상대밀도가 증가하면 강화된다.

5. 배수 및 비배수 시험의 결과, 한계상태선의 기울기는 새만금 1.78, 시화 1.70, 석문 1.26으로 나타났다.

6. 시료가 느슨한 경우는 유효응력 경로가 타원 형태를 나타내지만 조밀해 질수록 체적의 팽창에 의하여 공극수압이 감소함에 따라 우측으로 기울어져 한계상태선에 접근하였다.

7. 개발된 구성모델에서는 항복함수로서 Drucker-Prager 형을 이용함으로써 Mohr-Coulomb의 강도정수를 이용할 수 있도록 하였다.

8. Cap모델의 경화함수로서 쌍곡선 함수를 적용함으로써 기존 모델의 단점인 매개변수의

물리적 의미의 결여라는 점을 개선하였으며 이들 매개변수는 등방압밀시험을 통하여 쉽게 구할 수 있다.

9. 실트질 해사의 역학적 거동을 기술할 수 있는 구성모델을 개발하였으며 배수시험결과에 적용하여 모델의 적용성을 검토하였다. 개발된 모델은 실트질 해사의 배수 및 비배수 거동을 잘 표현한다.

본 논문은 '92년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

參 考 文 獻

1. Atkinson, S. H. and P. L. Bransby, 1978, The Mechanics of Soils an Introduction to Critical State Soil Mechanics, Unit. Series in Civil Eng'g.
2. Baladi, G. Y. and B. Rohani, 1979, Elastic-Plastic Model for Saturated Sand, *J. of Geotechnical Eng'g Div.*, ASCE, Vol. 105, GT4, pp. 465-480.
3. Bowles, J. E., Engineering Properties of Soils and Their measurement, 2nd ed. McGraw-Hill Book Co., New York.
4. Desai, C. S. and H. S. Siriwardane, 1984, Constitutive Laws for Eng'g Meterials with Emphasis on Geologic Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.
5. DiMaggio, F. L. and I. S. Sandler, 1971, Material Model for Granular Soils, *J. of the Eng'g Mech. Div.*, ASCE, Vol. 97, No EM3, pp. 935-950.
6. Drucker, D. C., 1950, Some Implication of Work-Hardening and Ideal Plasticity, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 7, pp. 411-418.