

## 연속재하 압밀실험에 의한 압밀특성에 관한 연구

### A Study on the Consolidation Characteristics According to the Continuous Loading Consolidation Test

채 영수<sup>1)</sup>, Young-Su Chae, 우 승우<sup>2)</sup>, Seung-Woo Woo

<sup>1)</sup>수원대학교 건설공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, The Univ. of Suwon

<sup>2)</sup>(주)한라엔지니어링 지반공학부, Geotechnical Engineering Department, Halla Engineering CO., LTD

**SYNOPSIS** : ILT proposed by Terzaghi was frequently used which is based on one dimensional consolidation theory. But this test require time longer than a week and has problems for extra soft clay such as the squeezing around the consolidation ring. Also consolidation curve is not clearly defined since only a few data is obtained in a test.

Therefore it is difficult to determine  $P_c$  and the interpretation to determine the consolidation constants are rather complicated.

In this paper, the stress-strain relationship and consolidation constant obtained by CRS and CG-test were analyzed and compared with the results by ILT.

**Key words** : Constant rate of strain consolidation, Constant gradient consolidation, Strain rate

## 1. 서론

보통 압밀정수를 결정하기 위해서 그동안 Terzaghi가 제안한 1차원압밀이론에 의한 단계별 하중재하 압밀실험을 이용해 왔으나 이 실험은 약 일주일 이상의 장시간이 필요하고, 아주 연약한 흙의 경우 압밀링 주변으로 squeezing 현상이 일어나는 실험의 방법적인 한계가 있다. 또한 얻을 수 있는 data가 적어 압밀곡선이 뚜렷이 정의되지 않으므로 선행압밀하중의 결정이 까다로우며, 단계별 재하시 각 단계별로 발생하는 2차압밀량이 서로 다르고, 또한 압밀정수를 결정하기 위한 결과의 해석이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단계별 하중재하 압밀실험의 단점을 해결하기 위해 여러 형태의 연속재하 압밀실험이 제안되어왔다.

본 논문에서는 Terzaghi의 단계별 하중재하 압밀실험과 Wissa(1971)가 제안한 일정변위 압밀실험, 그리고 Lowe(1969)가 제안한 일정동수구배 압밀실험을 통해 가덕도와 인천 국제공항 부지 시료의 응력-변형관계와 압밀정수에 관해 비교 분석함으로써 일정변위 압밀실험(CRS)과 일정동수구배 압밀실험(CG)의 적용성 및 타당성 그리고 각 실험 결과의 차이점에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 해석이론

### 2.1 일정변위압밀실험

CRS실험은 일정한 속도로 시료에 연직변위를 일으키는 방법의 실험으로 일정한 변위속도로 인해 작용하는 전응력과 하부면에서 발생하는 과잉간극수압을 계속 측정하면서 실험이 진행된다. 해석이론으로는 Smith(1969),

Umeharha(1980), Lee(1980), Wissa(1971) 등 여러학자들에 의해 CRS압밀이론이 제안되었다. 본 논문에서는 미소변형, 일정한 압밀계수등을 가정에 근거한 Wissa의 압밀이론을 이용하였고 압밀지배 방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$C_v = \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1)$$

배수면으로부터 시료의 높이와 변위에 대한 무차원변수, 시간에 대한 무차원변수를 사용하면,

$$\epsilon(X, T_v) = \gamma t [1 + F(X, T_v)] \quad (2)$$

여기서,

$$F(X, T_v) = \frac{1}{6} (2 - 6X + 3X^3) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi X}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \quad (3)$$

$$X = \frac{z}{H}, \quad T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad \gamma = \text{일정변형율속도}, \quad H = \text{시료높이}$$

식(2)는 정상상태(steady condition)과 전이상태(transient condition)로 분리되며 시료의 거동특성에 따라, 선형적 거동과 비선형적거동을 가정하여 시료의 연직유효응력-간극비-압밀계수-투수계수와 같은 구성식을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 정상상태 선형조건을 가정하였으며 압밀정수는 식(4), 식(5)와 같다.

$$\bar{\sigma}_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\bar{\sigma}_v(H, t) + \bar{\sigma}_v(0, t)] = \sigma_v - \frac{2}{3} u_h \quad (4)$$

$$C_v = \frac{\gamma H^2}{2 u_h m_v} \quad (5)$$

## 2.2 일정동수구배 압밀실험

Lowe et al.(1969) 등에 의해 실험방법과 그 이론해가 최초로 제안되었고, 이론해의 유도과정에 필요한 기본가정은 Terzaghi의 일차원압밀이론과 거의 유사하다.

단위요소  $dx dy dz$ 를 통한 유체의 유출량은 이 요소의 체적 변화량과 같다는 것에서부터 다음의 식을 유도 할 수 있다.

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dx dy dz = \frac{\partial e}{\partial t} \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \quad (6)$$

식(6)은 압축계수와 압밀계수를 이용하여 정리하면 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (7)$$

식(7)에서, 좌변은 변수  $z$ 에 무관하고 우변은 변수  $t$ 에 무관하므로, 양변을 상수로 간주하여  $A$ 로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = A \quad (8)$$

식(8)를 적분하여 경계조건을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta u = \frac{A}{C_v} \frac{H^2}{2} \quad (9)$$

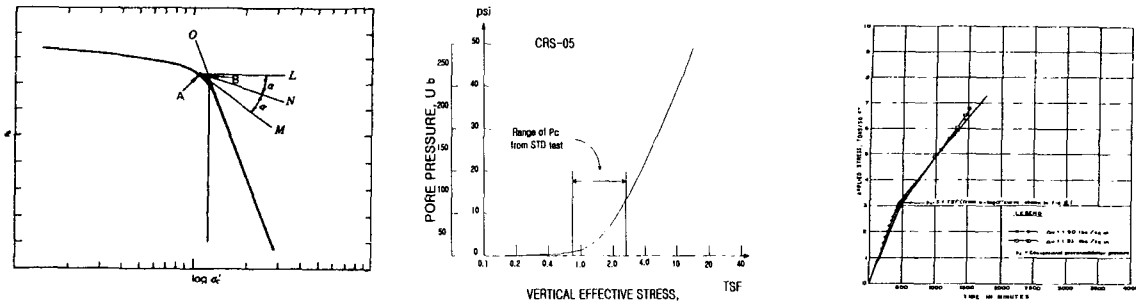
$$A = \frac{2C_v \Delta u}{H^2} \quad (10)$$

이것을 다시 정리하면 식(11)과 같다.

$$C_v = \frac{\Delta \sigma' H^2}{2 \Delta t \Delta u} \quad (11)$$

### 2.3 선행압밀하중( $P_c$ )의 결정

ILT실험의 선행압밀하중을 결정하기 위해 가장 보편적으로 사용되는 방법인 Casagrande(1936)의 도해법<그림 1 a)>을 이용하였고 CRS실험의 경우는 Gorman et al.(1978)이 <그림 1 b)>과 같이 CRS실험에서의 간극수압과 연직 유효응력관계로부터 간극수압이 급격히 상승하는 부분을  $P_c$ 의 범위로 결정할 수 있다고 하였으며, CG실험의 경우는 Lowe et al.(1969)이 <그림 1 c)>에서 나타낸 것과 같이 작용응력( $\sigma$ )과 시간(t)의 관계에서 두 직선사이에 변곡점을  $P_c$ 로 결정할 수 있다고 하였는데, 이 변곡점은 Casagrande나 Burnista의 경험적 선행압밀하중 결정방법에서 얻어지는 값과 일치한다고 하였다.



a) Casagrande-ILT

b) Gorman et al.(1978)-CRS

c) Lowe et al.(1969)-CG

그림 1. 선행압밀하중 결정방법

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 이용된 시료는 가덕도와 인천국제공항 부지에서 채취하였으며 각 시료에 대한 물리적인 성질은 <표 1>과 같다.

표 1. 시료의 물리적인 성질

시료	심도 (m)	구분	함수비 $w$ (%)	액·소성한계(%)			입도분포			비중 (Gs)	통일 분류
				LL	PL	PI	sand(%) (#10~#20)	silt(%) (#200~0.005mm)	clay(%) ( <0.005mm)		
가 덕 도	14.3~ 15.2	G1	130.8~ 119.6	71.52	39.92	31.60	7.50	41.12	51.38	2.60	OH
	15.6~ 16.6	G2	125.5~ 121.1	85.95	40.67	45.28	5.57	51.71	42.72	2.68	OH
인 천 국 제 공 항	5.0~ 5.7	H1	35.2~ 38.1	32.34	17.37	14.97	7.88	81.56	10.56	2.68	CL
	4.2~ 4.9	H2	43.6~ 41.4	41.30	22.70	19.6	10.56	81.20	8.24	2.70	CL

본 논문에서는 가덕도 인근의 해성점토와 인천국제공항지역의 불교란시료를 이용해 기존의 단계별 하중재하 압밀실험과 일정변위 압밀실험, 그리고 일정동수구배 압밀실험을 실시하여 실험방법에 따른 흙의 압축특성과 압밀정수의 변화에 대해 각 실험결과를 비교·분석하고 단계별 하중재하 압밀실험과 비교하여 그 결과의 적합성을 검토하였다.

1. 단계별 하중재하 압밀실험은 하중증가비( $\frac{\Delta P}{P}$ )가 압밀특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 하중증가비를 0.5, 1.0, 2.0, 등으로 변화시켜 실험을 실시하였다.
2. 일정변위 압밀실험의 경우는 ASTM에서 액성한계를 기준으로 제안한 변위속도 0.004%/min, 0.01%/min, 0.04%/min 및 0.08%/min을 적용하여 변위속도에 따른 압밀특성의 변화를 Wissa et al.(1971)가 제안한 정상상태 선형이론조건의 해석방법을 이용하여 검토하였다.
3. 일정동수구배 압밀실험에서는 상·하부면의 간극수압차를 Salfors(1971)가 제안한 0.75kpa~12.5kpa의 범위에서 2kpa, 6kpa, 10kpa를 적용하여 동수구배 변화에 따른 압밀특성의 변화를 Lowe(1969)가 제안한 이론식을 이용하여

검토하였다.

### 3.2 간극수압-연직유효응력관계

변위속도를 달리하여 실험한 CRS실험 결과는 <그림 2>에 나타내었고, 두 시료 모두 선행압밀하중 이전의 재압축구간에서는 변위속도에 의한 간극수압의 변화를 찾기 힘들었으나 선행압밀이후의 처녀압축구간에서는 변위속도에 의한 간극수압의 변화를 뚜렷이 볼 수 있었다. 또한 <그림 2>에서 볼 수 있듯이 두 시료 모두 변위속도가 빠를수록 동일한 압밀응력하에서 보다 큰 간극수압이 측정되었는데, 이는 변위속도가 빠르면 그에 따라 작용하는 유효응력에 의해 하부면에서 발생된 과잉간극수압의 소산 속도가 간극수압의 증가율보다 느리기 때문으로 판단된다.

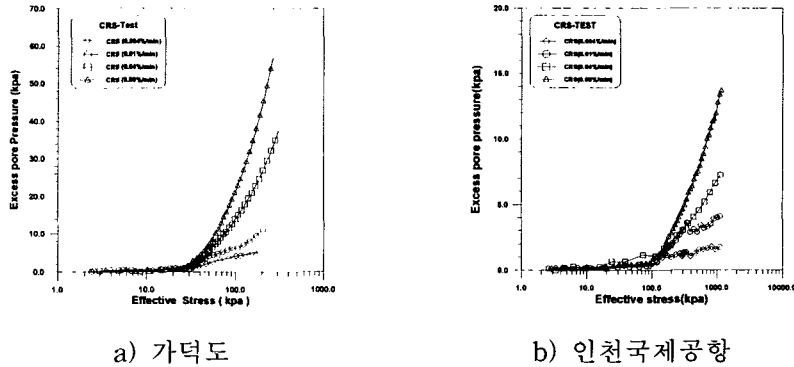


그림 2. CRS실험시 간극수압-유효응력 관계

그리고 각 시료별로 발생된 과잉간극수압의 크기를 살펴보면 초기 간극비와 함수비가 큰 가덕도시료의 경우는 간극수압이 최고 58kPa로 나타났으며, 인천국제공항시료의 경우는 최고 14kPa로 간극수압이 측정되었다. 이처럼 가덕도시료가 인천국제공항시료의 압밀응력보다 현저히 낮지만 높은 간극수압이 발생되었는데 이런 이유를 Terzaghi는 큰 압축성을 갖고 낮은 투수성을 가진 소성점토에서는 작용 응력에 따른 함수비의 변화가 매우 늦게 일어나기 때문이라고 하였다. 즉 빠른 변위속도에 대응하여 작용응력이 빠르게 재하되더라도 함수비의 변화가 느리기 때문에 간극수의 소산이 더디게 일어남으로써 높은 과잉간극수압이 발생한다고 하였고 이 외부응력의 변화와 흙의 함수비 변화의 응답사이의 차이를 시간지체(time lag)라고 하였다. 반면 소성적인 성질이 적고 함수비가 낮은 인천국제공항시료의 경우는 압밀응력이 월등히 가덕도 시료보다 큼에도 불구하고 과잉간극수압의 발생이 현저히 낮음을 알 수 있었다.

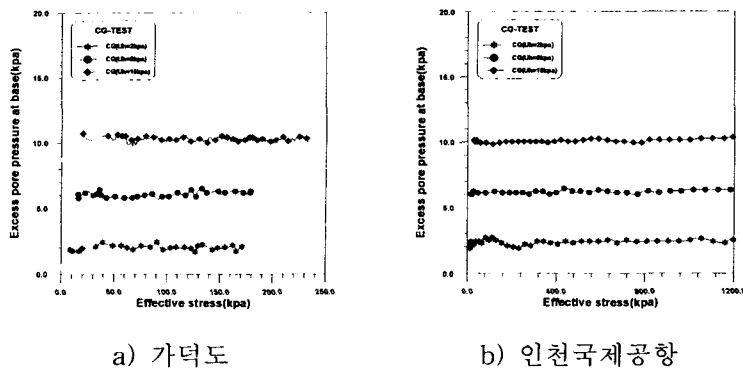


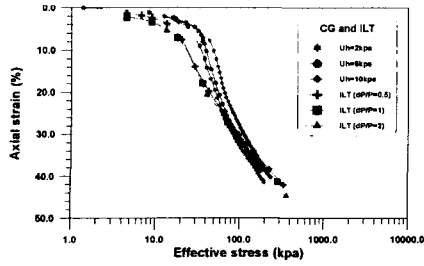
그림 3. CG실험시 간극수압-유효응력 관계

CG실험의 경우 <그림 3>에서 보는 바와 같이 간극수압-유효응력관계는 실험 시작할 때 정해 준 비배수면의 과잉간극수압이 실험도중 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

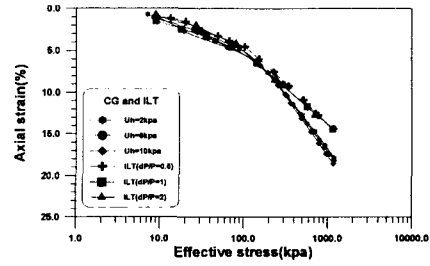
### 3.3 간극수압계수-연직유효응력 관계

CRS실험의 경우 가덕도시료는  $P_c$  부근에서 간극수압계수가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있으며 변위속도가 클





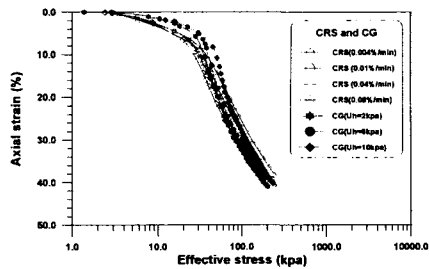
a) 가덕도



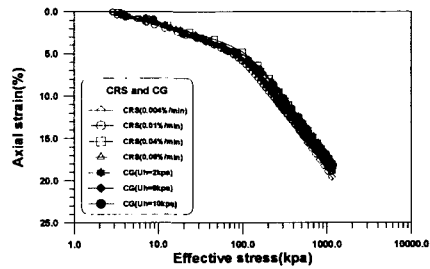
b) 인천국제공항

그림 6. CG실험시 연직변형률-유효응력 관계

CG실험의 경우 또한 가덕도시료에서는 동수구배가 커질수록 동일한 압밀응력하에서 압축성이 저하되는 경향을 보였으나 간극수압계수의 발생이 미미한 인천국제공항시료에서는 이런 경향을 뚜렷이 찾아 보기 힘들었다.  $P_c$  부근에서 큰 간극수압계수를 나타낸 가덕도시료는  $P_c$  부근에서 ILT곡선과 상당한 차이를 보였다.



a) 가덕도



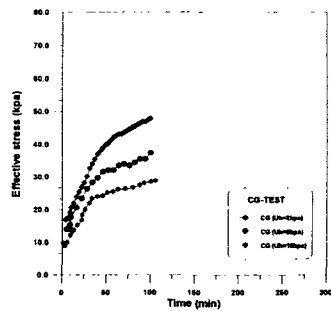
b) 인천국제공항

그림 7. CRS, CG실험시 연직변형률-유효응력 관계

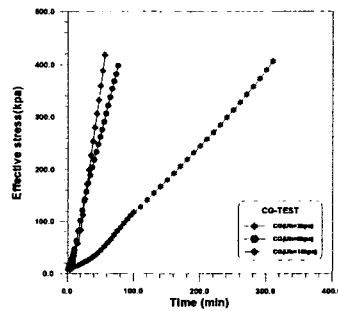
실험방법에 따라 간극수압계수 발생지점이 상이한 가덕도시료는 압밀곡선의 형태가 서로 다르게 나타났으나, 간극수압계수의 경향이 적은 인천국제공항시료는 CRS, CG실험시의 압밀곡선이 거의 일치함을 보였다. 이 결과로 볼 때 간극수압계수의 값이 클수록 시료의 압축특성에 많은 영향을 끼침을 알 수 있었다.

### 3.5 선행압밀하중( $P_c$ )의 결정

ILT실험은 기존의 Casagrande(1936)의 도해법, CRS실험의 경우는 Gorman et al.(1978)이 제안한 간극수압-유효응력 관계 그리고 CG실험에서는 Lowe et al(1969)이 제안한 응력-시간관계로부터 선행압밀하중을 결정하였다.



a) 가덕도



b) 인천국제공항

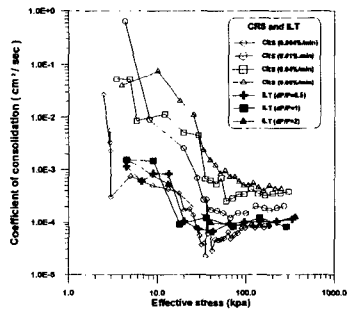
그림 8. CG실험시 유효응력-시간 관계

다음의 <표 2>와 같이 기존의 Casagrande의 도해법으로 구한  $P_c$ 는 두 시료 모두 변위속도나 동수구배가 클수록 표준압밀실험에 비해 과대평가 되어지는 것을 볼 수 있었고 특히 큰 간극수압계수가 발생된 가덕도시료의 CG실험의  $P_c$ 는 상당히 크게 산정되었다. 또한 Gorman et al.(1978)이 제안한 간극수압-유효응력 관계 그리고 CG실험에서는 Lowe et al(1969)이 제안한 응력-시간관계로부터 선정된  $P_c$ 는 CRS, CG실험결과를 Casagrande의 도해법으로 구한  $P_c$ 의 결과보다 ILT에 근접하는 경향을 보여 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

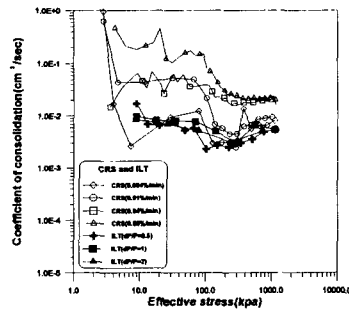
표 2. 표준압밀실험 ( $-\frac{\Delta P}{P} = 1$ )의  $P_c$  와 CRS, CG실험으로부터 구한  $P_c$ 의  
 선형압밀하중비( $P_{c(CRS)}/P_{c(CMV)}$  와  $P_{c(CG)}/P_{c(CMV)}$ )비교

종류	ILT-test (표준압밀) $-\frac{\Delta P}{P} = 1$	CRS-test								CG-test					
		e- log $\sigma_v'$				Uh- log $\sigma_v'$				e- log $\sigma_v'$			$\sigma_v'$ -time		
		strain rate (%/min)				strain rate (%/min)				pore pressure (kpa)			pore pressure (kpa)		
		.004	.01	.04	.08	.004	.01	.04	.08	10	6	2	10	6	2
G	1	1.05	1.35	1.55	1.65	1.25 ~ 1.50	1.25 ~ 1.50	1.25 ~ 1.50	1.25 ~ 1.50	2.40	1.70	1.50	2.00	1.60	1.20
H	1	1.00	1.00	1.09	1.22	0.91 ~ 1.00	0.91 ~ 1.00	0.91 ~ 1.00	0.91 ~ 1.00	1.45	1.36	1.27	1.36	1.18	1.09

### 3.6 압밀계수-유효응력관계

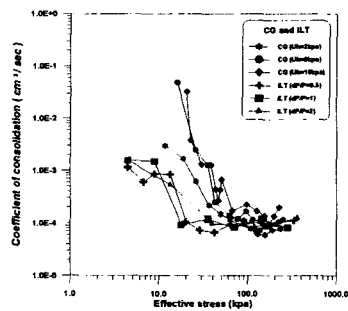


a) 가덕도

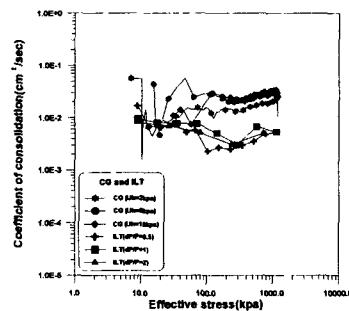


b) 인천국제공항

그림 9. CRS실험시 압밀계수-유효응력 관계



a) 가덕도



b) 인천국제공항

그림 10. CG실험시 압밀계수-유효응력 관계

두 시료 모두 CRS실험과 CG실험시 재압축구간에서는 시료의 교란, 불균질성등의 이유로 인해 압밀계수( $C_v$ )가 다소 불규칙한 분포를 나타냈으나  $P_c$ 를 지난 처녀압축구간에서는  $C_v$  값이 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 이런 이유를 Gorman et al.(1978)은 실험초기의 상태는 정상상태로 보기 어렵기 때문에 실험결과 해석을 정상상태의 식으로 구한  $C_v$  는 상당히 과대평가되고 믿을만한 결과를 얻을 수 없다고 하였다. 또한 변위속도나 동수구배가 클수록  $C_v$  가 ILT의 결과보다 과대 평가되고 멀어지는 경향을 보였다.

#### 4. 결론

가덕도 인근 해성점토시료와 인천국제공항시료를 이용해 단계별하중재하압밀실험과 변형율을 변화시킨 CRS, 그리고 비배수면의 간극수압을 달리한 CG실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가덕도 시료와 같이 연약하고 함수비가 높은 소성적인 시료인 경우는 압축특성이나 압밀정수에 영향을 끼치는 간극수압계수가 크게 나타났고, 큰 간극수압계수의 영향으로 압밀지연현상, 즉 동수역학적 시간지체(hydrodynamic time lag)현상이 발생된 것으로 생각된다. 또한 간극수압계수의 영향으로 가덕도시료는 인천국제공항시료와 달리 CRS, CG실험시 압밀곡선의 형태가 실험방법에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다.
2. 선행압밀하중이나 압밀계수, 투수계수등은 두 시료 모두 CRS, CG실험에서 변위속도나 비배수면의 과잉간극수압의 크기가 클수록 증가하고 ILT값에서 멀어지는 경향을 나타내었다. 변위속도나 동수구배가 작을수록 ILT에 근접하는 경향을 보였다. CRS실험시 ASTM에서 액성한계를 기준으로 규정한 변위속도의 적용시 ILT와 잘 일치함을 알 수 있었다.
3. CRS나 CG실험에서 얻을 수 있는  $P_c$  나  $C_v$  등은 실험중에 발생하는 간극수압계수의 값에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있었으며, 또한 이 간극수압계수는 시료의 소성적인 성질에 좌우됨을 알 수 있었다. 특히 가덕도 시료와 같이 함수비가 높고 소성적인 성질이 큰 시료는 더욱 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 가덕도와 같은 시료의 연속재하압밀실험시에는 변위속도나 비배수면의 과잉간극수압의 결정에 많은 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

1. 이우진, 임형덕, 이원제 (1998), “일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구”, 한국지반공학회지, 제 14권, 제 4호, pp. 47-60.
2. 채영수, 방의석 (1997), “일정변위압밀실험에 의한 한강오니토의 압밀특성에 관한 실험적 연구”, '97 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 123-130.
3. ASTM, (1989), “Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soil Using Controlled-Strain Loading”, ASTM, D4186-89, pp. 1-5.
4. ELE International Limited. (1986), “Soil Laboratory Testing”, Vol. 3, Pentech Press London, pp. 1197-1225.
5. Gorman., C. T., Hopkins., T. C. , Deen., R. C. , & Dmевич., V. P. (1978) “Constant-Rate-of-Strain and Controlled-Gradient Consolidation Testing”, Geotechnical Testing Journal, Vol, No. 1, pp. 3-15.
6. Lowe, J., III, Jonas, E., & Obrician, V, (1969), “Controlled Gradient Consolidation Test”, Journal of Soil Mech. and Found. Division, ASCE, Vol.95, SMI, pp.77-79.
7. Terzaghi, K., Peck. R. B. (1967), “Soil Mechanics in Engineering Practice”, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc, New York, pp. 100-102, 106, 114-115
8. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., & Heiberg, S. (1971), “Consolidation at Constant Rate of Strain”, Journal of Soil Mech. and Found. Division, ASCE, Vol. 97, SM10, pp. 1393-1413.