

재하속도에 따른 압밀특성에 관한 실험적 고찰

An Experimental Study on the Consolidation Characteristics with Loading Rate

채점식¹⁾, Jum-Sik Chae, 소충섭²⁾, Chung-Sub So, 이 송³⁾, Song Lee

¹⁾ (주)삼보기술단 지반공학부 과장, Dept. of Geotechnical Engineering, Sambo Engineering Co. Ltd

²⁾ (주)삼보기술단 지반공학부 전무, Dept. of Geotechnical Engineering, Sambo Engineering Co. Ltd

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The university of Seoul

SYNOPSIS : The purpose of this study is to establish a proper criterion for the constant rate of loading consolidation(CRLC) test which is a kind of the continuous loading consolidation(CLC) and widely used as alternative methods to the incremental loading consolidation(ILC)test. With those results, the preconsolidation pressure estimated by the CRLC test turned out to be comparatively larger than that of the ILC test, and it is increased in proportion to the applied loading rates. However, the compression index in the CRLC test is less influenced on by the loading rates. The coefficient of consolidation and permeability in the CRLC test are dependent on excess pore pressure ratio mainly. In other words, if the pore pressure ratios are too low, the coefficient of consolidation and permeability become smaller than those of the ILC test. On the other hand, if the excess pore pressure ratios are too high, the coefficient of consolidation and permeability become so larger than those of the ILC test. Therefore, loading rates should be carefully determined to generate proper excess pore pressure ratio inside the soil specimen. From this study, good results are obtained from the CRLC test if the excess pore pressure ratios were in the range of 2.5 to 6.0 %, performed with loading rates between 0.0015 and 0.005 kgf/cm²/min.

Key words : *CLC test, ILC test, CRLC test, Loading rate, Excess pore pressure ratio.*

1. 서 론

현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 단계별재하압밀(ILC) 실험방법은 하중증분비가 $\Delta p/p = 1.0$ 이고 각 하중단계의 재하시간이 24시간이다. 따라서, 얻어지는 데이터 부족으로 압밀곡선이 불연속적이고 명확하지 않아 압밀정수산정시 어려움이 있으며, 소요시간이 길어지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하고 실제 현장조건에 적합한 압밀현상 예측법으로 개발된 연속재하 압밀(CLC) 실험은 실험중 일정한 변형속도와 재하속도가 발생하도록 하중을 연속적으로 가하면서 변형률과 하중을 측정한다. 따라서, 실험소요시간이 단축되며, 명확한 압밀곡선을 얻을 수 있어 도해적으로 압밀특성 산정시 개인오차를 줄일 수 있다. 하지만, 이렇게 구해지는 압밀특성은 실험 중에 발생하는 변형 및 재하속도 그리고 과잉 간극수압비에 의해 크게 영향을 받게 되므로 실험 전에 적합한 실험조건을 결정해야 한다. 그러나, 아직까지 국내에서는 이러한 명확한 실험기준이 없어서 실무에서 적용이 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 여러 가지 CLC 실험법 중에서 일정하중율압밀(CRLC) 실험을 실시하였고 이로부터 얻어진 압밀 특성을 비교·고찰하여 재하속도에 대한 영향을 살펴보았으며, 적합한 재하속도의 범위를 제안하였다.

2 이론적 배경

2.1 CRLC 실험의 해석이론

보다 명확하고 연속적인 압밀곡선을 얻기 위해서 하중증분비를 감소시키거나 실험소요시간을 단축시킬 수 있는 실험방법들이 연구(Northey 등, 1953 ; Aboshi 등, 1970)되었다. 그 결과, CRLC 실험방법이 제안되었다. CRLC 실험은 시간에 따른 압밀하중증분을 일정하게 유지시키며 압밀시키는 방법이다. 이처럼 재하속도를 임의로 조절할 수 있으므로 제방이나 댐, 그리고 큰 구조물의 공사시 현장의 하중변화를 보다 유사하게 재현할 수 있으며, 이러한 재하속도변화에 따른 압밀거동을 파악할 수 있다.

Aboshi 등(1970)은 Schiffman(1958)의 이론을 토대로 투수계수와 압밀계수가 일정하다는 가정하에 시간에 따라 하중이 증가하는 경우 압밀지배방정식을 식 (1)과 같이 구성하였다. 이때, 실험조건상 dp/dt 는 일정한 상수이므로 그 수학적 해를 유도하면 시료하부의 과잉간극수압비는 식 (2)처럼 유도된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{u_u}{p} = \frac{16}{\pi^3 T} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{1}{(2m+1)^3} (1 - e^y) \quad (2)$$

$$\text{여기서, } y = \frac{(2m+1)^2 \pi^2 T}{4}$$

위 식은 과잉간극수압비와 시간계수 사이의 유일한 관계를 보여주는 것으로 CRLC 실험에서 u_u/p 을 얻고 이에 대응하는 시간계수를 구하면 식 (3)과 같이 압밀계수를 결정할 수 있다.

한편, 평균 압밀도는 식 (4)로 표현되므로 평균 유효응력은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{\tau H^2}{t} \quad (3)$$

$$U = 1 - \frac{1}{pH} \int_H^0 u dz = 1 - \frac{32}{\pi^4 T} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} (1 - e^y) \quad (4)$$

$$\bar{p}' = p \times U \quad (5)$$

2.2 재하속도 결정방법

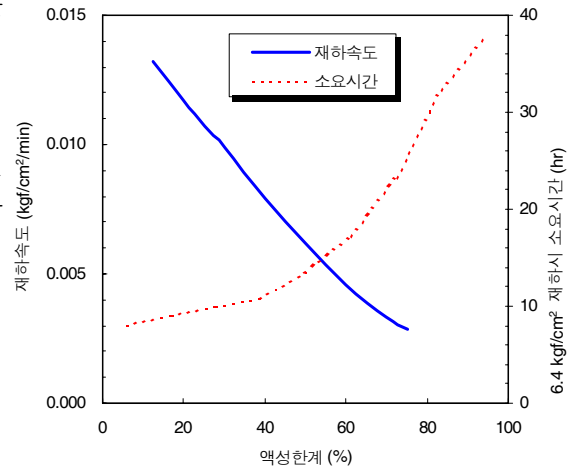
CRLC 실험에서 가장 중요한 재하속도에 대한 기준은 아직도 명확하게 정해지지 않고 있다. 실제로 재하속도를 너무 빠르게 하면 시료하부에서 큰 과잉간극수압이 발생하여 전 시료에 걸쳐 유효응력의 균등성이 확보되지 않는다. 반면, 재하속도를 너무 느리게 하면 균등성은 확보되지만 과잉간극수압비가 너무 작아 압밀계수의 정확도가 떨어진다. 따라서, CRLC 실험 전에는 반드시 적합한 과잉간극수압비가 발생하도록 재하속도를 결정해야 한다. 그러나, 현재까지 재하속도에 대한 명확한 기준은 없으며, 다만 경험상으로 추천 과잉간극수압비 이하가 되는 재하속도를 선택하고 있다.

Aboshi 등(1970)의 연구결과에 따르면 CRLC 실험결과는 정규압밀구간에서 ILC 실험결과와 좋은 일치를 보였고, 과압밀구간에서 일관성있는 결과를 얻으려면 예비재하를 실시해야 하며, 그 값은 선행압밀응력의 1/3~1/2정도이고 적절한 재하속도를 0.05 kgf/cm²/min로 제안하였다.(Von Fay 등, 1986)

또한, 기존 연구사례를 보면, 1975년 Irwin, 1979년 Burghignoli 등은 로우셀을 가지고 CRLC 실험을 실시했으며, 각각 0.001 kgf/cm²/min, 0.001~0.1 kgf/cm²/min 재하속도로 실시하였다.(Head, 1983)

한편, Von Fay 등은 과잉간극수압비가 3~34% 발생하는 재하속도에서 ILC 실험과 유사한 경향을 보인다고 하였고 경험적으로 얻어진 시료의 액성한계와 재하률속도의 관계를 그림 1과 같이 제시하였다.

이상과 같이, 기존 연구에서 추천되는 재하속도는 일관성이 없어 적용이 곤란하다. 이는 각 나라마다 세립토의 물리, 구조적 특성이 달라 재하속도에 따른 압밀특성이 달라지기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 국내의 해성점토를 가지고 여러 가지 재하속도를 가하여 얻어진 압밀특성과 과잉간극수압의 관계를 비교·분석하였다. 이 결과를 토대로 합리적인 압밀특성을 얻을 수 있는 허용 과잉간극수압비와 재하속도의 범위를 결정해 보았다.



3. 실내시험

3.1 실험 시료

그림 1. 액성한계에 따른 재하속도

본 대상시료는 경남 하동에서 채취한 비교란 해성점토로 각 시료의 토질정수는 표 1과 같다.

표 1. 실험 시료의 토질 정수

구 분	w _n (%)	LL (%)	PI (%)	G _s	e _o	#200 통과율(%)	흙의 분류
A1	71.3	76.5	44.7	2.70	1.903	99.1	CH
A2	33.4	45.0	21.5	2.69	0.903	85.3	CL
A3	82.6	88.1	56.9	2.71	2.163	99.1	CH
A4	72.6	99.1	60.3	2.71	1.949	99.4	CH

3.2 실험 방법

본 연구에서 사용된 CRLC 실험장치는 GEOCOMP사에서 제작한 것으로 먼저 준비된 시료를 압밀링으로 직경 6cm와 높이 2cm로 성형하여 셀을 조립한 다음, 시료 하부에서 배압을 가하여 포화시킨 뒤 미리 결정된 실험조건을 컴퓨터에 입력한 후 실험을 시작하면 자동으로 제어된다. 이때 상부에서는 로드셀과 변위측정계로 하중과 변위를 측정하고, 시료하부와 연결된 간극수압계로 과잉간극수압을 측정하여 컴퓨터에 자동저장 및 계산되어 실험도중에도 모니터 상에서 결과를 볼 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

표 2. 시료별 재하속도 산정결과

4.1 재하속도 산정

시료	산정된 재하속도(kgf/cm²/min)			
	Irwin	Burghignoli	Von Fay	Aboshi
A1		0.01	0.004	0.04
A2	0.001	0.01	0.004	
A3	0.001	0.004, 0.007, 0.01, 0.02	-	0.04
A4		0.004, 0.01	-	

표 2와 같이 기존 추천치와 Von Fay 등이 제시한 시료의 액성한계별 산정도표를 이용하였다. 그 결과, A3, A4 시료는 액성한계가 80% 이상으로 Von Fay 등이 제시한 산정도표를 적용할 수 없어서, Burghignoli 등이 제안한 재하속도 범위 내에서 더 추가하여 실시하였다.

4.2 재하속도에 따른 압밀특성

4.2.1 선행압밀응력

그림 2은 시료 A3에 대하여 ILC 실험 및 재하속도를 달리한 CRLC 실험에서 얻어진 압밀곡선을 나타낸 것으로 CRLC 실험에서 동일한 유효응력에 대응하는 변형률이 ILC 실험에 비해 다소 작게 평가하여 결국, ILC 실험보다 선행압밀응력을 크게 산정하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 재하속도가 증가할수록 명확하게 나타남을 볼 수 있다. 이와 같이 4개의 시료에 대하여 얻어진 압밀곡선을 가지고 Casagrande(1936)가 제안한 도해적인 방법으로 선행압밀응력을 산정하였다. 그리고 CRLC 실험에 의한 선행압밀응력을 ILC 실험에 의한 선행압밀응력으로 정규화하여 얻어진 선행압밀응력비를 재하속도에 따라 도시해 보았다. 그 결과, 그림 3과 같이 재하속도의 대수축적에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서 사용한 경남 하동의 해상점토는 다음 식과 같이 재하률속도의 지수승에 비례하였다.

$$\frac{p_{c(CRSL)}}{p_{c(ILC)}} = 3.56 \cdot r_p^{0.1712} \quad (6)$$

여기서, r_p : 재하속도 (kgf/cm²/min)

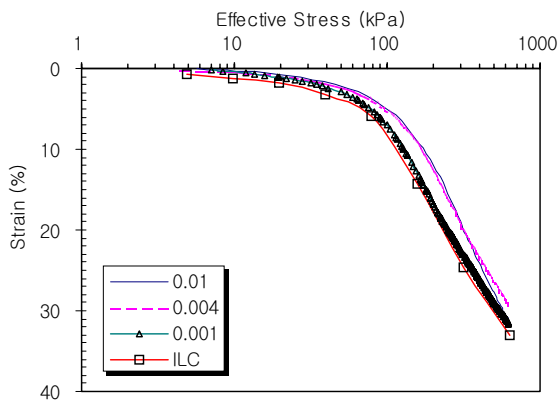


그림 2. CRLC 및 ILC 실험에 의한 $\varepsilon - \log \sigma'$ 곡선

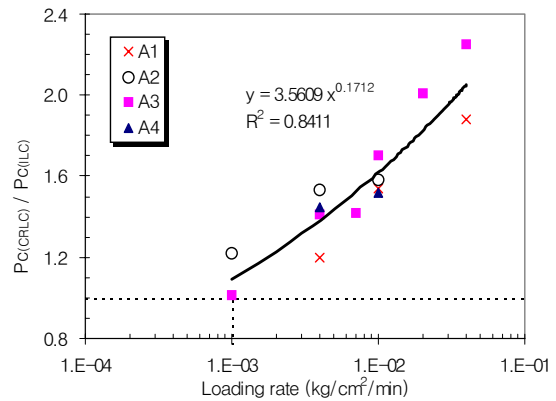


그림 3. 재하속도에 따른 선행압밀응력비

4.2.2 과잉간극수압비

CRLC 실험중 시료하부에서 발생하는 과잉간극수압의 변화를 살펴보면, 과압밀구간에서는 거의 변화가 없으나, 선행압밀응력을 지나면서 급격하게 증가하는 거동을 보이고 실험 중반부에서는 과잉간극수압이 감소하는 경향을 보인다. 이는 CRLC 실험에서 하중율을 일정하게 발생시키게 되므로 고응력단계에서 변형률이 작아지고 과잉간극수압도 작아지기 때문이다.

그림 4는 실험중 발생하는 과잉간극수압에 대하여 가해진 유효응력을 선행압밀응력으로 정규화하여 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 실험 초기 및 과압밀 구간에서는 과잉간극수압의 크기가 미소하고 불규칙하게 발생하여 과잉간극수압비가 작고 불규칙하게 나타나며, 선행압밀응력 부근에서 급격히 증가하기 시작하여 정규압밀구간에서 꾸준히 증가하다가 실험 중반부에 과잉간극수압의 감소로 다시 감소하는 경향을 보였다. 이러한 과잉간극수압비의 변화는 주어진 재하속도에 따라 크기만 다를 뿐 유사한 거동을 보였다.

그러므로, 본 연구에서는 그림 5와 같이 재하속도에 따른 평균 과잉간극수압비의 변화를 도시해 보았다. 그림에서 보듯이 재하속도가 증가할수록 평균 과잉간극수압비는 지수형태로 증가되는 상관관계를 보였으며, 이를 회기분석한 결과, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{u_v}{\sigma_v} = 334.21 \cdot r_p^{0.9614} \quad (7)$$

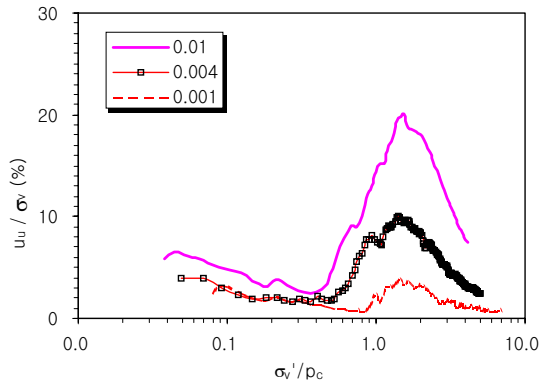


그림 4. 재하속도에 따른 과잉간극수압비

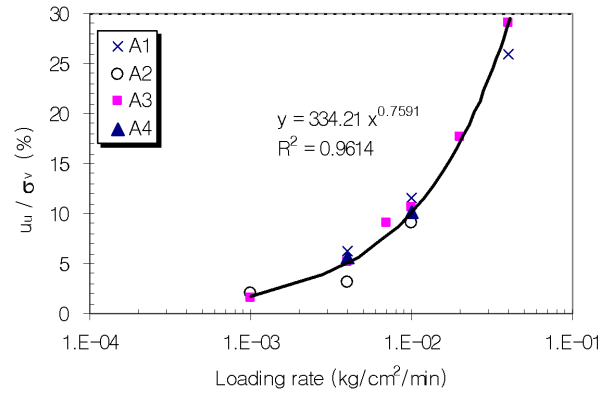


그림 5. 재하속도에 따른 평균 과잉간극수압비

4.2.3 압축지수

본 CRLC 실험결과를 가지고 재하속도에 따른 압축지수의 영향을 분석한 결과, 일관된 경향성은 없는 것으로 나타났다. 재하속도 0.001~0.04 kgf/cm²/min 범위에서는 압축지수비가 0.9~1.25 사이로 ILC 실험결과로 얻어진 압축지수와 유사하게 산정되었다. 다만, 재하속도가 0.01%/min 이상인 경우에는 대체로 압축지수비가 1 이상으로 나타나 ILC 실험에 의한 압축지수보다 크게 산정하는 경향을 보였다. 그러나, 이 결과는 국한된 실험결과에 의한 것이므로 향후 더 많은 실험과 분석이 필요하다.

4.2.4 압밀계수 및 투수계수

한편, 재하속도를 달리하여 얻어진 CRLC 실험의 평균 압밀계수 및 투수계수와 ILC 실험에 의한 평균 압밀계수 및 투수계수로 정규화하여 재하속도에 따른 변화를 분석해 보았다. 여기서, 평균 압밀계수 및 투수계수는 압밀하중 전구간에서 얻어진 압밀계수와 투수계수를 산술평균하여 산정한 값이다. 압밀계수의 경우 그림 6에서 보듯이 재하속도가 증가할수록 평균 압밀계수비도 지수형태로 증가되는 경향을 보였다. 그리고, 투수계수의 경우도 그림 7과 같이 압밀계수비와 유사한 경향을 보였다. 본 연구에서 얻어진 평균 압밀계수비 및 투수계수비와 재하속도의 상관관계는 다음과 같다.

$$\frac{C_{v(CRLC)}}{C_{v(ILC)}} = 35.709 \cdot r_p^{0.5392} \quad (8)$$

$$\frac{k_{v(CRLC)}}{k_{v(ILC)}} = 47.675 \cdot r_p^{0.6843} \quad (9)$$

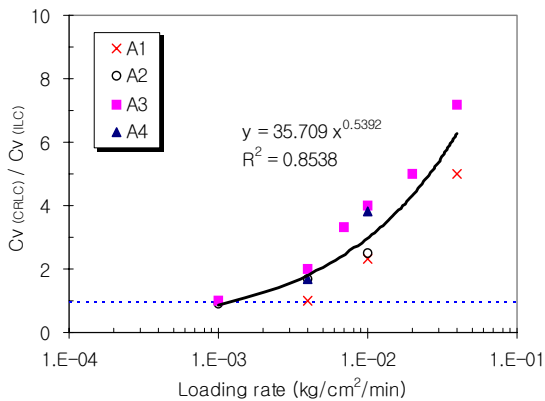


그림 6. 재하속도에 따른 압밀계수비

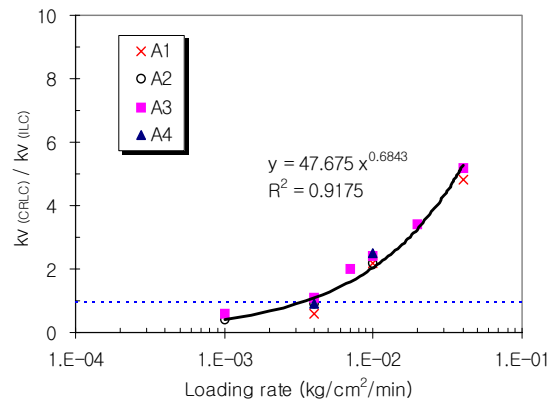


그림 7. 재하속도에 따른 투수계수비

4.3 과잉간극수압비에 따른 영향

일반적으로 CRLC 실험에서 얻어지는 압밀계수와 투수계수의 정확성은 실험중 발생하는 과잉간극수압비와 관련이 깊다. 왜냐하면, 시료하부에 과잉간극수압이 너무 크면 시료 내에 동수구배도 실제 현장보다 크게 형성되어 전이상태가 발생하게 된다. 반대로, 과잉간극수압비가 너무 작으면 동수구배가 발생하지 않아 압밀계수와 투수계수의 산정이 불가능해진다.(Wissa 등, 1971) 따라서, 본 연구에서는 과잉간극수압비에 따른 압밀계수 및 투수계수의 변화를 분석하여 허용 과잉간극수압비의 범위를 고찰하였다.

그림 8과 9는 평균 과잉간극수압비에 따른 압밀계수비 및 투수계수비의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 CRLC 실험으로 산정되는 압밀계수와 투수계수는 ILC 실험에 의한 압밀계수 및 투수계수보다 높게 산정되는데, 과잉간극수압비가 증가함에 따라 지수형태로 증가하는 것으로 나타났다. 특히, A1 시료의 경우 압밀계수비가 다소 작게 나타났는데 이는 동일한 재하속도에서 과잉간극수압비가 약간 크게 발생한 결과로 판단된다. 이러한 경향을 회귀분석으로 상관식을 구해보면 다음과 같다.

$$\frac{C_v(CRLC)}{C_v(ILC)} = 0.6139 \cdot \left(\frac{u_v}{\sigma_v}\right)^{0.6783} \quad (10)$$

$$\frac{k_v(CRLC)}{k_v(ILC)} = 0.2753 \cdot \left(\frac{u_u}{\sigma_v}\right)^{0.8596} \quad (11)$$

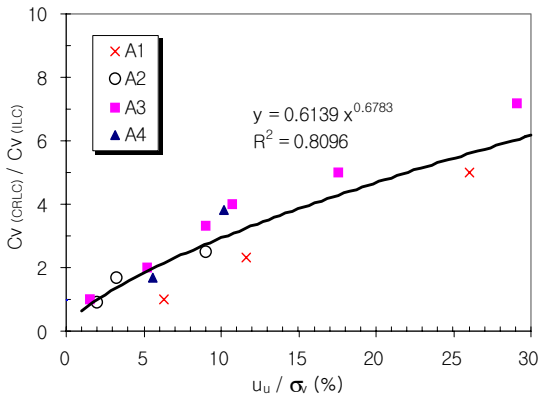


그림 8. 과잉간극수압비에 따른 압밀계수비

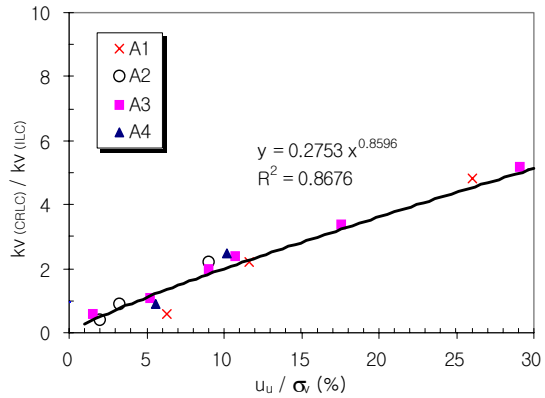


그림 9. 과잉간극수압비에 따른 투수계수비

4.4 재하속도의 기준 고찰

현재, 재하속도에 대한 명확한 기준은 없으며, 다만 경험상 추천되는 과잉간극수압비 이하가 되도록 재하속도를 선택하고 있다. 다음은 기존 연구에서 제안된 여러 재하속도로 실험한 결과를 나타낸 것이다. 그림 10에서 보듯이 CRLC 실험으로 ILC 실험과 동일한 선행압밀응력 및 압축지수를 얻기 위해서는 재하속도를 0.001 kgf/cm²/min 이하로 실시하는 것이 적합하였다. 그러나, 이 재하속도를 적용할 경우, 실험 시간이 다소 오래 걸려 실용성이 다소 떨어진다. 한편, 그림 11은 재하속도에 따른 압밀계수, 투수계수 그리고 과잉간극수압비의 변화를 나타낸 것이다. 투수계수의 경우 재하속도를 0.001 kgf/cm²/min 이하로 실시할 경우 과잉간극수압비가 너무 작아서 ILC 실험결과보다 더 작게 산정하는 경우도 나타났다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 과잉간극수압비에 대한 허용 최대치와 최소치 기준을 마련할 필요가 있다. 그러나, 이러한 과잉간극수압비는 시료특성과 실험조건에 따라 크게 달라지므로 정확하게 예측하는 것은 어렵다. 하지만, 앞에서 살펴보았듯이 과잉간극수압비에 가장 큰 영향을 주는 주요인자는 재하속도이므로 본 연구에서는 재하속도와 과잉간극수압비를 동시에 고려해 보았다.

그림 12에서 보듯이 압밀특성비가 1~2 범위 이내로 ILC 실험결과와 유사한 압밀특성을 얻기 위한 허용 과잉간극수압비는 2.5~6% 정도로 나타났으며, 이러한 허용 과잉간극수압비를 만족시키는 재하속

도의 범위는 0.0015~0.005 kgf/cm²/min 이내로 나타났다. 그러나, 이러한 결과는 경남 하동지역에 분포한 점토에 대한 실험결과에 한정된 것으로 지역의 점토특성에 따라 그 증가율은 다를 수 있다.

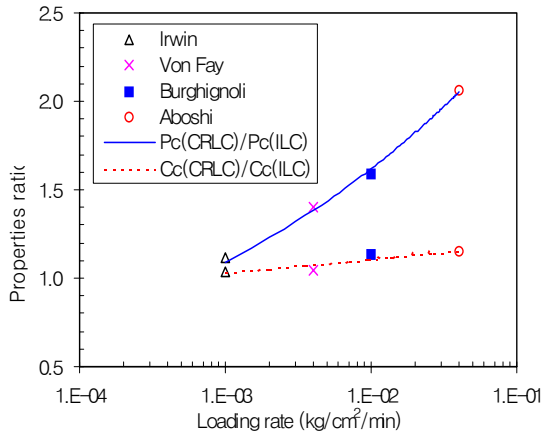


그림 10. 추천 재하속도별 압밀특성비 I

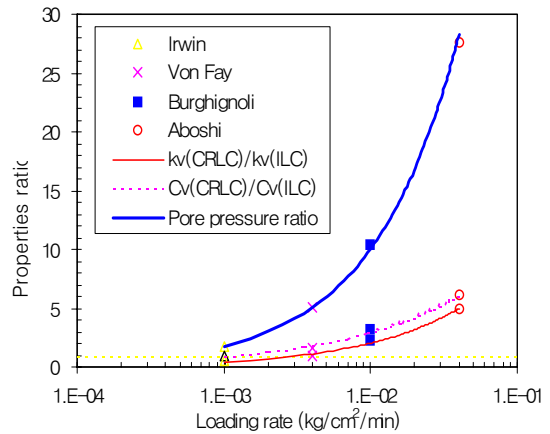


그림 11. 추천 재하속도별 압밀특성비 II

따라서, 본 논문에서 추천한 재하속도 범위의 타당성 여부를 검증하기 위해서 표 4와 같은 새로운 3개의 비교란시료를 가지고 검증실험을 실시하였다. 여기서, B1 시료는 서해안에서 채취한 해성점토이다.

표 4. 검증실험용 시료의 토질 정수

구 분	w _n (%)	LL (%)	PI (%)	G _s	e _o	#200 통과율(%)	흙의 분류	재하속도 (kgf/cm ² /min)
A5	71.8	72.8	47.1	2.70	1.949	99.1	CH	0.0030
A6	61.2	61.6	38.3	2.69	1.647	99.5	CH	0.0043
B1	39.8	44.8	24.4	2.70	1.139	99.2	CL	0.0050

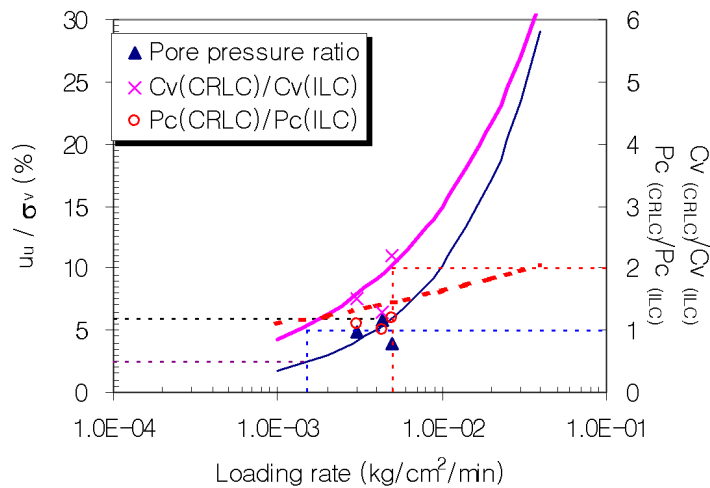


그림 12. 추천 재하속도로 검증한 결과

그림 12는 시료별로 본 연구에서 추천하는 재하속도로 실험한 결과 얻어진 압밀특성치와 과잉간극수압비를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 대부분 압밀특성비가 1에 근접하고 허용 과잉간극수압비도 만족하여 ILC 실험결과와 유사하게 나타났다.

이상과 같은 결과는 국내 일부지역에 국한된 것이므로 신뢰성이 떨어지지만, 보다 많은 실험 자료들이 제공된다면 정확한 실험기준이 마련이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 연약지반의 압밀특성을 산정하는데 있어 기존 단계별재하 압밀실험의 대체적인 방법으로 사용되고 있는 연속재하 압밀실험중에서 CRLC 실험에 대한 제반특성을 연구하여 적절한 재하속도의 범위를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 선형압밀응력은 재하속도의 지수승에 비례하여 증가하였으며, 압축지수의 경우우는 실험조건에 관계 없이 유사하게 평가되었으며, 재하속도의 영향은 적었다.
- (2) 압밀계수와 투수계수도 재하속도가 증가함에 증가되는 경향을 보였으나, 주로 과잉간극수압비의 크기에 따라 결정되었다. 즉, 과잉간극수압비가 너무 작으며, 압밀계수와 투수계수가 단계별재하 압밀 실험보다 작게 산정되고 과잉간극수압비가 높은 경우에는 단계별재하 압밀실험의 결과보다 크게 나타났다. 따라서, 과잉간극수압비에 대한 허용 최대치와 최소치 기준을 마련할 필요가 있다.
- (3) 여러 가지 재하속도를 적용한 결과, 단계별재하 압밀실험과 유사한 압밀특성을 얻기 위한 허용 과잉간극수압비는 2.5~6% 정도로 나타났으며, 이러한 허용 과잉간극수압비를 만족시키는 재하속도는 0.0015~0.005 kgf/cm²/min 범위 인 것으로 나타났다.
- (4) 본 논문에서 제안한 재하속도로 검증실험한 결과, 실험시간 및 얻어진 과잉간극수압비가 적합하였으며, 압밀특성도 단계별재하 압밀실험 결과에 근접하였다. 하지만 본 연구는 국내 일부지역에 국한된 것으로서 보다 많은 자료들이 제공된다면 재하속도 결정시 기초자료로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이 송, 채점식(2003) CRLC 실험에서 재하속도 기준에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 제 23권, 제 4C호, pp.185-193.
2. Aboshi, H., Yoshikuni, H. and Maruyama, S.(1970),“Constant Loading Rate Consolidation Test”. *Soils and Foundations*, Vol. 10, pp. 43-56.
3. Head, K, H.(1983),“Continuous consolidation testing” ; *Ground Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 24-25.
4. Head, K, H. (1986),“Soil Laboratory Testing”, *Pentech Press London*, Vol .3, pp.1197-1225.
5. Northey, R. D.(1953),“Rapid consolidation test for routine investigations”, *Proc. 2nd Aust-N.Z. Conf. Soil Mech* 20.
6. Von Fay, K. F. and Cotton, C. E.(1986),“Constant Rate of loading Consolidation Test”. *Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, ASTM STP 892, Philadelphia*, pp.236-256.
7. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heilberg, S.(1971),“Consolidation at Constant Rate of Strain”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM10, pp.1393-1413.