

## 변곡점을 이용한 신속한 압밀시험에 관한 연구

민덕기 · 최규환  
지구환경시스템공학부

### <요 약>

일반적으로 점성토의 압밀계수는 하중단계마다 일차압밀이 100% 완료되기까지 충분한 재하시간(24h)을 필요로 하는 표준압밀시험을 통해서 구할 수 있다. 하지만, 표준압밀시험으로는 간극수압을 직접 측정하기가 어렵고, 압밀완료시간이 최소한 1주일 이상이 소요된다. 따라서, 신뢰성 있는 값을 확보하면서 신속한 압밀시험 방법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 Inflection Point Method(Francis R. Cour 1971)[2]를 이용하여 신속히 압밀계수를 구하는 Rapid Inflection Point Method에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과로 얻어진 압밀계수는 Taylor방법, Casagrande방법, Rectangular Hyperbolar방법으로 구한 압밀계수와 비교하였고[1], Rapid Rectangular Hyperbolar(A. Sridharan 등, 1999)방법 [8]으로 구한 압밀계수와 비교·분석하여 그 적용성을 검토하였다. 또한, 본 연구를 통해서 압밀시간 단축에 관한 타당성을 입증하였다.

## Rapid Inflection Point Method of Consolidation Testing

Tuk-ki Min · Kyu-hwan Choi  
School of Civil & Environmental Engineering

### <Abstract>

This study presented the new method for evaluating the coefficient of consolidation by using inflection point method which was based on the fact that time factor,  $T$  corresponding to the inflection point of a semilogarithmic plot of a time curve is fixed and equals to  $T = 0.405$  at 70% consolidation. In the proposed method, the next load increment is applied as soon as the necessary time required to identify the inflection

point. Thus, the coefficient of consolidation may be easily evaluated. The time required to complete the testing using this rapid consolidation method could be as low as 1~5 hours compared with 1 or 2 weeks in the case of the conventional consolidation test.

**Keyword** : consolidation, inflection point, rapid consolidation method

## 1. 서 론

최근에 수행되고 있는 대규모 건설공사가 해안 인접지역과 연약지반이 폭넓게 분포하는 델타퇴적 지역에서 이루어지고 있어, 연약지반의 압축거동특성에 대한 규명이 무엇보다 중요하게 대두되고 있는 실정이다. 그러나, 압축특성을 밝히기 위하여 전통적으로 적용되고 있는 표준압밀시험은 오랜 시간을 요구하므로 많은 학자들에 의하여 보다 신속하게 압밀 시험을 수행할 수 있는 방법에 대하여 연구가 진행하게 되었다. Newland와 Alley(Olson이 인용함.1986)는 어떤 하중 하에서 100%의 압밀이 되자마자 다음 단계의 하중을 적용할 것을 추천하였으며[6], 비슷한 방법이 Su(1958)에 의해서 제안된 바 있다[11]. Leonards와 Ramiah(1959)는 재성형된 점토를 사용하여 재하시간에 따른 간극비-유효응력의 관계를 밝혔고[5], Head(1986)는 Constant Rate of Strain(CRS)방법에 대하여 제안하였다[4]. 최근 Sridharan 등(1994, 1999)은 압축성 점성토에 대하여 각 하중단계에서 단기 재하의 영향을 연구하여 4시간의 짧은 재하 시간을 추천하였고[10], Rectangular Hyperbolar 방법을 이용하여 신속히 압밀시험을 완료하는 방법을 제안하였다[8].

본 연구에서는 Rapid Inflection Point Method를 적용하였으며, 이 방법으로 구한 압밀계수는 전통적인 방법인 Taylor방법, Casagrande방법, Rectangular Hyperbolar방법, 그리고 A. Sridharan 등(1999)이 제안한 Rapid Rectangular Hyperbolar방법으로 구한 압밀계수와 비교·분석하여 흙의 압축거동에 대한 그 적용성을 밝히고자 하였다.

## 2. 해석방법

본 연구에서는 기존의 Inflection Point 방법(Francis R. Cour 1971)[2]을 이용하여 압축( $\delta$ ) - 시간( $\log t$ )관계에서 변곡점을 확인한 후에 다음 하중단계를 결정하고, 하중을 재하하여 신속히 압밀시험을 수행하는 방법을 제안하였다.

### 2.1 변곡점을 이용한 방법(Inflection Point Method)

#### 2.1.1 기본 개념

Terzaghi는 흙속의 물의 흐름에 있어서 3차원적 흐름을 몇가지 가정들을 사용하여 일차원 압밀의 식을 구했다.

$$U = 1 - \sum_{N=0}^{\infty} \frac{8}{(2N + 1)^2 \pi^2} \exp \left[ -\frac{(2N + 1)^2 \pi^2}{4} T \right] \quad (1)$$

이 식은 압밀도  $U$ 와 시간계수  $T$ 의 관계를 나타내는 식이며, 이 곡선은 이론적인 압밀곡선으로서 그림 1과 같다. 실제 흙의 압축거동은 이론적인 압밀 곡선의 경향을 나타내지 않지만, 경험적으로 불일치성이 그다지 크지 않다.

Inflection point 방법은 Terzaghi의  $U$ - $\log T$ 관계 그래프의 변곡점에서 압밀도( $U$ )가 70%이고, 시간계수( $T$ )가 0.405를 나타내는 것에 기초하고 있다. 따라서, 압밀계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_v = \frac{0.405 \cdot H^2}{t_i} \quad (2)$$

여기서,  $H$ =배수길이,  $t_i$ =압축량- $\log t$  그래프에서 변곡점이 발생하는 지점의 시간

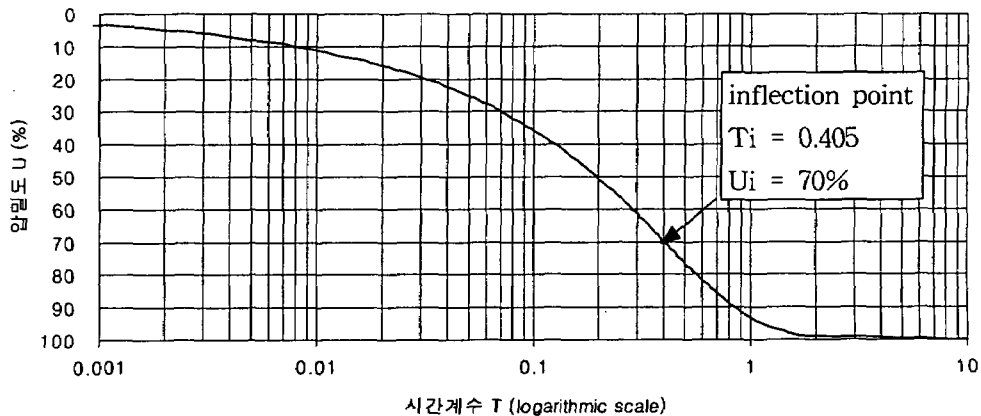


그림 1. 이론적인 압밀 곡선

### 2.1.2 변곡점 결정

변곡점을 이용한 방법에서 압밀계수( $C_v$ )결정을 위한 요구사항은 실제 시간에서 변곡점의 위치를 찾는 것이며, 다음 방법을 이용할 수 있다. 1) 시간 곡선을 반대수 상에 나타내어 변곡점을 결정한다. 2) 시간 곡선의 기울기의 절대값이 최대가 될 때를 변곡점으로 정의한다.

기울기를 이용하는 방법은 시간 곡선이 잘 나타나지 않거나, 더욱 정밀한 변곡점의 위치를 찾고자 할 때 유용하다. 그림 2에서처럼  $M$ 지점의 기울기는 인근 두 점을 연결하는 현으로 결정할 수 있다. 따라서,  $r_n$ 은 압밀 시험동안 연속적인 시간  $t_n$ 에서의 변위읽음값이며,  $M$ 지점에서의 시간곡선의 기울기는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\phi = \frac{|r_{n+1} - r_n|}{\log t_{n+1} - \log t_n} \quad (3)$$

그림 2에서 M지점의 시간은 다음과 같이 결정할 수 있으며, 이것이 변곡점에서의 시간이다.

$$t_i = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \quad (4)$$

연속적인 변위값이 일정한 시간간격으로 얻어진다면  $\frac{t_{n+1}}{t_n} =$  일정 하며, 변곡점은 두 값의 차이가 최대일 때의 지점으로 쉽게 결정할 수 있다.

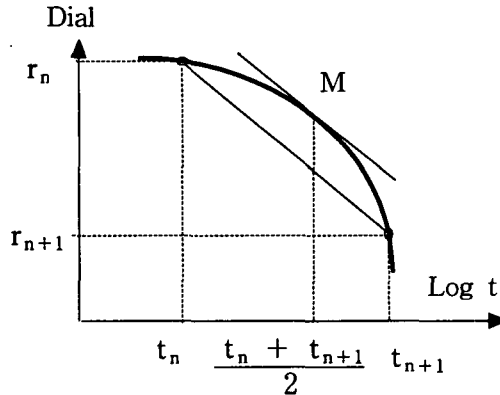


그림 2. 압축-시간곡선에서 기울기 결정

## 2.2 신속한 방법(Rapid Inflection Point Method)

Inflection Point Method의 신속한 방법의 적용은  $\delta - \log t$  관계에서 변곡점이 발생한 후에 하중재하를 멈추고, 이때 압밀도가 70%인 사실을 이용하여 다음 하중 증가량을 결정하고, 하중을 재하하여 진행한다. 대부분 재하 초기단계에서 70%의 압밀이 이루어지므로 많은 시간을 절약할 수 있다.

### 2.2.1 해석방법

하중증가를 일정하게 유지하고, 재하시간을 충분히 주는 목적은 Taylor나 Casagrande의 curve-fitting 과정을 이용하여  $C_v$  값을 구하기 위해서이다. 표준 압밀시험에서 정확한 압밀도를 구할 수 있다면 하중증가는 가능한 빠르게 적용할 수 있다. 따라서, 특정상태의 압밀도를 구하기 위한 방법이 요구되며, 간극수압을 직접 측정하지 않고 다음 하중증가량을 결정하는데 사용될 수 있다. Inflection Point Method는 변곡점을 정확히 찾을 수 있다면

압밀도가 70%로 고정되어서 압밀도를 특별히 계산할 필요가 없으므로 다른 curve-fitting 보다 간단하다. A. Sridharan 등(1999)은 Rectangular Hyperbolar 방법을 이용한 압밀 시험에 관한 연구에서 직접 간극수압을 측정하지 않고, 유효응력을 산정하여 하중증가량을 결정하는 신속한 방법을 제안하였다[8]. 표 1은 양산시료에 대한 전응력 및 유효응력 증가량에 대한 설명을 보여준다. 압밀이 100%완료되지 않은 상태에서 다음 단계로 넘어가면 소산되지 않은 간극수압은 다음 하중증가량에 포함되게 된다.

표 1. 전응력 및 유효응력 증가량 (양산시료)

전응력	하중증가량 (전응력)	잔여 간극수압	실하중 증가량	시간	압밀도	유효응력 증가량	전 유효응력	하중 증가율	간극비
(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	$\Delta \sigma$	(min)	U(%)	$\Delta \sigma'$	$\sigma'$	LIR	e
0	0.05	0	0.05	1440	100	0.05	0.05	1	1.384
0.05	0.05	0	0.05	12	70	0.035	0.085	0.7	1.377
0.1	0.1	0.015	0.115	6	70	0.081	0.166	0.95	1.372
0.2	0.2	0.035	0.235	8	70	0.164	0.330	0.99	1.35
0.4	0.4	0.070	0.470	8	70	0.329	0.659	0.99	1.32
0.8	0.8	0.141	0.941	8	70	0.659	1.318	0.99	1.281
1.6	1.6	0.282	1.882	12	70	1.318	2.635	0.99	1.222
3.2	3.2	0.565	3.765	10	70	2.635	5.271	0.99	1.099
6.4	6.4	1.129	7.529	10	70	5.271	10.541	0.99	0.93
12.8									0.756

### 2.2.2 시험순서

압밀시험에서 Rapid Inflection Point 방법은 각 하중단계에 적용되는 시간이 훨씬 작은 것을 제외하고는 표준시험과 근본적으로 같다. 압밀시험과정 동안 압밀도는 70%로 고정되고, 하중은 하중증가율이 1에 가깝게 유지하면서 증가된다. 시험순서는 다음과 같다.

- (1) 최초 하중은 seating load(0.05kg/cm<sup>2</sup>)에서 증가되는데, 증가율은 1이다.
- (2) 시간-압축량은 일정한 시간간격으로 읽는다.
- (3) 명확한 변곡점(최대 기울기)이 발생하면 실험을 멈춘다.
- (4) 초기유효응력을  $\sigma'_i$ 라 하고,  $\Delta \sigma$ 는 응력증가량(전응력에 근거), U는  $\Delta \sigma$ 아래에서 압밀도, 따라서 전체 유효응력은  $\sigma'_i + U \cdot \Delta \sigma$ 이다. U가 70%로 고정되어 다음 응력증가량

은  $\sigma_i' + 0.7 \cdot \Delta\sigma$ 로 주어진다. 응력 증가율은 유효응력에 근거하여 거의 1과 같다.

- (5) 압력은 70%압밀도에서 유효응력이 결정된 후 증가된다.
- (6) 같은 과정이 최대 예상 압력이 될 때까지 반복된다.

본 실험에서 변위읽음 시간간격은 1~2분으로 일정하게 하였고, 최대 기울기가 발생한 후 확인을 위해 압밀을 더 진행시킨 후에 실험을 멈추었다. 하중증가량은 위 순서에 의해서 결정(표 1 참고)하였으나, 비교를 위해 표준시험과 동일한 하중을 재하하였다.

그림 3은 표준시험과 rapid 시험에 의한 시간-압축량 그래프를 나타내는데 rapid 방법이 기존의 방법보다 압축량이 작다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 시간에 따른 기울기를 나타내는 것으로 최대기울기가 같은 시간에서 발생함을 알 수 있다. 따라서, 70%압밀도가 같은 시간에서 발생하므로 식(2)에 의해 산정된 압밀계수는 표준시험과 rapid시험이 유사함을 알 수 있다.

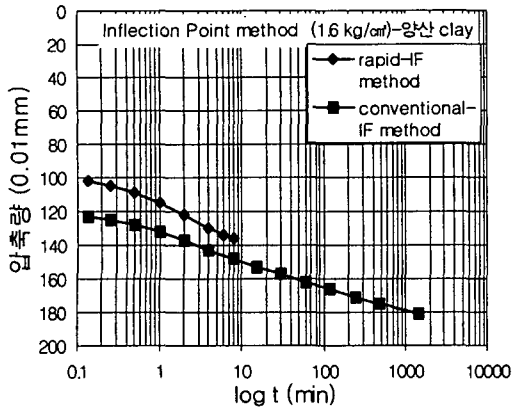


그림 3. 압축량-시간 그래프

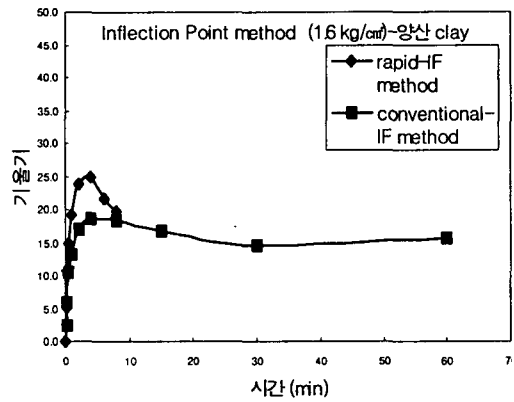


그림 4. 기울기-시간 그래프

### 3. 실내시험

실내시험은 기본적인 토성시험을 실시하였고, 압밀시험은 각 시료에 대해 표준압밀시험, Rapid Rectangular Hyperbolar 시험과 Rapid Inflection Point 시험을 실시하였다.

#### 3.1 기본물성시험

본 연구에 사용된 시료는 해성점토인 울산시료와 양산시료 및 육성점토를 사용하였고, 또한, 상업용 카올리나이트와 벤토나이트를 사용하여 비 팽창성 점토와 팽창성 점토에도 적용해 보았다. 각 시료의 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 사용된 흙의 기본 물리적 성질

시료 종류	Gs	WL	WP	PI	sand(%)	silt(%)	clay(%)
울산 A	2.68	75	30	45	1.9	53.1	45
울산 B	2.67	68	27	41	0.1	67.9	32
양 산	2.65	54	30	24	27.7	43.3	29
육성점토	2.75	38	21	17	12	60	28
kaolinite	2.67	24	18	6	0	88	12
bentonite+sand(50%)	2.70	102	29	73	50	40	10

### 3.2 압밀시험

시료는 불교란시료 및 교란시료를 사용하였고, 교란시료는 함수비를 액성한계 상태로 유지하여 압밀링에 재성형하였다. 표준 Oedometer를 사용하여 각 시료에 대한 표준 시험과 rapid 시험을 수행하여 압밀계수 및 압축지수, 유효응력별 간극비, 체적변화계수, 투수계수 등을 산정하였으며, 이를 비교하여 rapid 방법의 효율성을 증명하였다.

## 4. 결과 분석 및 고찰

### 4.1 해석방법에 따른 압밀계수( $C_v$ )의 비교

각 시료를 이용하여 표준압밀시험에 의해 결정된 압밀계수와 rapid-RH시험 및 rapid-IF 시험에 의해 결정된 압밀계수는 표 3과 같으며, 시료에 상관없이 거의 유사한 관계를 보이고 있다. 그림 5는 해석방법에 따른 압밀계수의 변화를 나타낸 것이다. 본 그림의 결과를 통해 rapid-IF시험에 의한 압밀계수는 표준압밀시험을 통한 Taylor 방법 및 Casagrande 방법에 의해 구해진 압밀계수와 유사한 값이 나타난 것을 확인하였다.

표 3. 표준시험과 rapid시험에 따른 압밀계수의 비교 ( $C_v = a \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

시료종류	하중 증가량 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Taylor method	Casagrande method	RH method	IF method	rapid-RH method	rapid-IF method
울산 A	0.2~0.4	0.54	0.19	0.34	0.57	1.47	1.05
울산 B	0.2~0.4	1.72	1.19	1.20	0.98	1.87	1.05
양 산	0.2~0.4	3.61	2.06	0.45	3.06	4.98	3.23
육성점토	0.2~0.4	4.68	4.51	8.78	7.47	36.60	8.21
Kaolinite	0.2~0.4	6.69	0.66	0.96	0.13	11.79	2.06
Bentonite+sand(50%)	0.2~0.4	0.08	0.04	0.39	0.06	0.83	0.14

\* RH : Rectangular Hyperbola

IF : Inflection Point

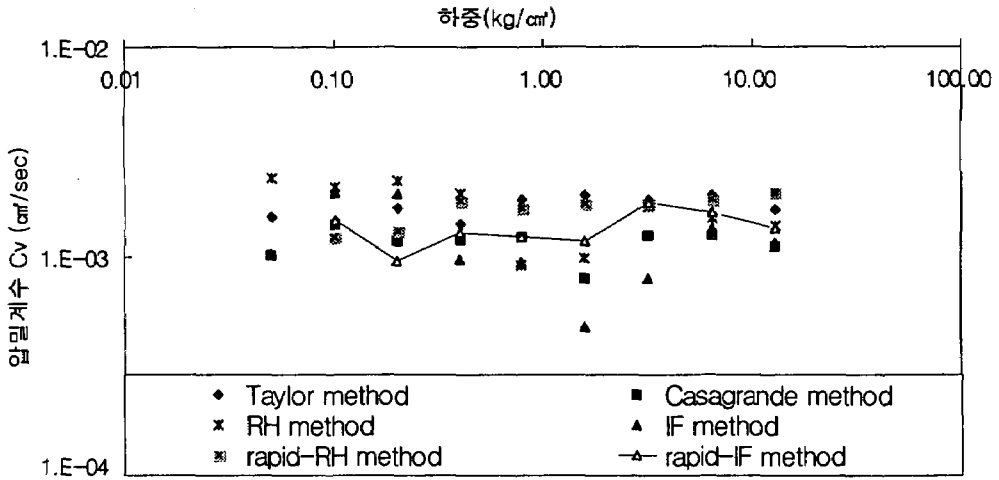


그림 5. 울산B 시료의 시험방법에 따른 압밀계수 ( $C_v$ )의 변화

#### 4.2 해석방법에 따른 압축지수 ( $C_c$ )의 비교

표준시험과 rapid 시험에서의 압축지수값을 비교한 것이 표 4와 같으며, 같은 시료에 대해서는 거의 유사한 값을 보인다. 그림 6은 양산시료의 간극비-유효응력 관계를 나타낸 것으로서 기울기가 거의 유사하며, 선행압밀하중 ( $P_c$ )은 신속한 시험에서 1.9~2.3kg/cm<sup>2</sup>를 보이고, 표준시험에서 1.4kg/cm<sup>2</sup>를 나타내어 점토의 압축성에 대한 시간의 효과에 관한 연구 (Duncan, J. M 등 1996)와 같이 재하시간이 짧을수록 선행압밀하중 ( $P_c$ )이 크게 나타나는 경향을 보인다[3]. 다른 시료에 대한 간극비-유효응력 관계에서도 같은 관계를 나타내는 것으로 보아, 표준시험과 비교했을 때 신속한 시험에서 압축지수의 변화는 미소하다.

표 4. 시험방법에 따른 압축지수 ( $C_c$ )의 변화

시료종류	Standard test	rapid-RH test	rapid-IF test
울산A	0.60	0.58	0.57
울산B	0.46	0.44	0.43
양산	0.54	0.57	0.57
육성점토	0.25	0.21	0.24
Kaolinite	0.11	0.12	0.11
Bentonite+s and(50%)	1.52	1.65	1.62

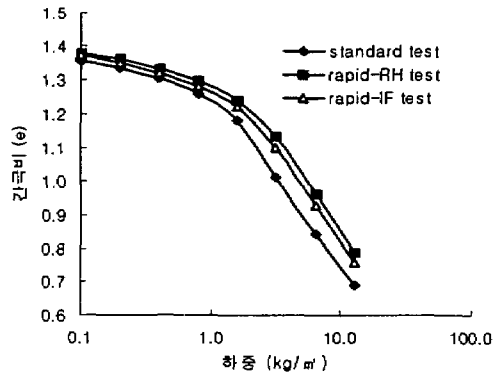


그림 6. 간극비 - 유효응력 (양산시료)



### 4.3 체적변화계수( $m_v$ )와 투수계수( $k$ )의 비교

그림 7과 8은 울산B시료의 표준시험과 신속한 시험에서 체적변화계수의 변화와 투수계수의 변화를 나타내는 것으로 초기에는 표준시험이 신속한 시험보다 큰 값을 보이다가 유효응력이 증가할수록 표준시험의 체적변화계수와 투수계수가 작은 값을 나타낸다. 이것은 일차압밀이 100%완료되므로써 압축량이 rapid 시험보다 커서 간극비의 변화가 크기 때문 일 것으로 판단된다. 그러나, 변화의 폭이 좁고, 여러 시료에서도 같은 경향을 보일 뿐만 아니라 최종값이 수렴하고있다. 따라서, 신속한 시험에 따른 체적변화계수 및 투수계수의 영향은 미소하다.

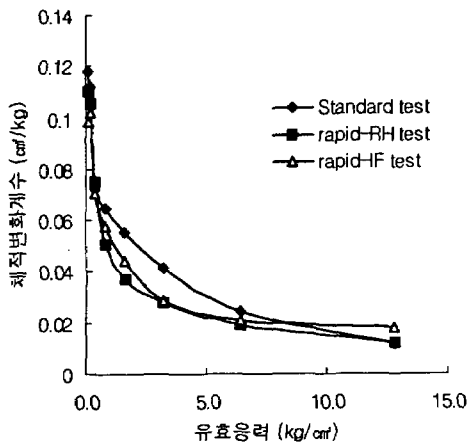


그림 7. 울산B시료의 체적변화계수 변화

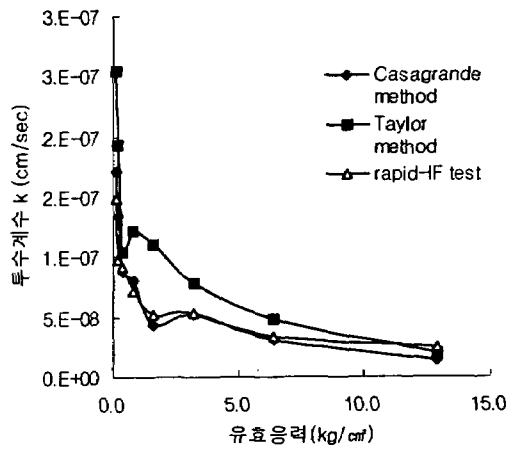


그림 8. 울산B시료의 투수계수 변화

## 5. 결 론

본 연구에서 Rapid Inflection Point 압밀시험을 수행하고, 각각의 방법과 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압밀시험에서 Rapid Inflection Point방법에 의한 압밀계수는 표준시험의 Taylor 방법과 Casagrande 방법에 의해서 구해진 압밀계수 값과 유사한 값을 보인다.
- 2) Rapid Inflection Point방법에 의한 압축지수는 표준시험의 압축지수와 비교했을 때, 거의 유사한 값을 보인다. 선행압밀하중은 Rapid Inflection Point방법에서 큰 값을 나타내는데, 재하시간이 짧을수록 선행압밀하중이 큰 값을 보이는 일반적인 경향을 나타낸다.
- 3) 체적변화계수 및 투수계수의 변화는 Rapid Inflection Point방법에 의한 값이 초반에는 작은 값을 보이다가 유효응력이 증가할수록 표준시험에 의한 값보다 큰 값을 나타내는데, 이것은 재하시간이 짧아서 압축량이 작기 때문이다. 그러나, 변화폭은 아주

미소하며 rapid 방법에 따른 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

- 4) Rapid Inflection Point방법에 의한 압밀 완료시간은 1~5시간 소요되어 일주일 이상 소요되는 표준 시험과 비교했을 때 상당한 시간을 단축할 수 있다.

본 연구에서 Rapid Inflection Point방법을 적용하여 압밀시험한 결과는 표준시험의 압밀 정수들과 유사하나, 결점으로는 2차압밀에 관한 정보를 얻을 수 없고, 선행압밀하중이 표준시험보다 커진다는 것이다. 따라서, rapid 시험방법으로 선행압밀하중의 결정방법 및 2차 압밀정수를 결정할 수 있는 연구가 계속 수행되어야 한다.

### 참고문헌

1. Bowles, J.E.(1996), "Foundation analysis and design". 5th ed. McGraw-Hill Book Company, New York: 66-68
2. Cour, F.R.(1971), "Inflection point method for computing  $c_v$ ". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(5): 827-831
3. James Micheal Duncan, Jean-Pierre Rajot & Vincent J. Perrone(1996), "Coupled Analysis of Consolidation and Secondary Compression" Proceedings of Second International conference on Soft Eng. Vol. 1: 3-27
4. Head, K.H.(1986), "Manual of soil laboratory testing" Vol. 3. Effective stress tests. 1st de. Pentech Press, London : 1208-1213
5. Leonards, G.A., and Ramiah, B.K.(1959), "Time effects in the consolidation of clays". In Symposium on time rates of loading in soil testing. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication STP 254: 116-130
6. Olson, R.E.(1986), State of art: "consolidation testing". symposium on consolidation of soils: Testing and evaluation. Edited by R.N. Yong and F.C. townsend. American Society for Testing and Material, Special Technical Publication STP 892: 7-70
7. Sridharan, A., Murthy, N. S., and Prakash, K.(1987), "Rectangular Hyperbolar Method of Consolidation Analysis" Geotechnique, Vol. 37: 355-368
8. Sridharan, A., Nagaraj, H.B., Srinivas, N.(1999), "Rapid method of consolidation testing" Canadian Geotechnical Journal. 36: 392-400
9. Sridharan, A., and Prakash, K.(1997), "The log  $\delta$ -log t method for determination of the coefficient of consolidation" Proceedings of the Institution of the Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 125(1): 27-32
10. Sridharan, A., Sivapullaiah, P.V., and Stalin, V.K.(1994), "Effect of short duration of load increment on the compressibility of soils" Geotechnical Testing Journal, 17(4): 488-496.
11. Su, H.L.(1958), "Procedure for rapid consolidation test" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 84(3): 1-13