연속재하 압밀시험에서 적정 간극수압비에 관한 연구

A Study on the Proper Pore pressure ratio in Continuous Loading Consolidation tests

채점식* 이 송**
Chae, Sum-Sik Lee, Song

ABSTRACT

Continuous loading is applied the sample has been developed to overcome some of the problems associated with the incremental loading consolidation test. Therefore, it is able to reduce the test time and provide a well defined the curve of effective stress versus strain due to continuous stress-strain points. Also, the constant rate of strain consolidation(CRSC) test has been accepted widely as a standard method in foreign countries because of its many advantages. However, in Korea the CRSC test has not been used in engineering practice and experimentally verified. Because there is not a precise criterion of testing despite consolidation characteristics are influenced on strain rate and Pore pressure ratio. Consequently, it is difficult to apply in engineering practice.

In this study, artificial neural networks are applied to the estimation of th proper strain rate and pore pressure ratio of the CRSC test. This study shows the possibility of utilizing the artificial neural networks model of estimation of the strain rate and pore pressure ratio in the CRSC test

1. 서 론

실제 현장조건에 적합한 압밀현상 예측법으로 개발된 연속재하 압밀시험법은 기존 단계별 재하 압밀시험의 문제점을 극복하기 위하여 시험중 일정한 변형속도와 재하속도가 발생하도록 하중을 연속적으로 가하면서 변형률과 하중을 측정한다. 따라서, 시험 소요시간을 단축시킬 수 있으며, 명확한 압밀곡선을 얻을 수 있어 압밀특성 산정시 개인오차를 줄일 수 있다. 하지만, 이렇게 얻어지는 압밀특성들은 시험 중에 발생하는 변형속도와 간극수압비에 의해 크게 영향을 받게 되므로 시험 전에 적합한 값을 산정해야 한다. 그러나, 아직까지 국내에서는 이러한 명확한 시험기준이 없어 연속재하 압밀시험의 많은 장점에도 불구하고 실무에서 사용이 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 실내시험에서 얻어진 각종 토질정수 및 압밀시험 데이터를 가지고 인공신경망의 학습을 수행하여 변형속도와 간극수압비 결정시 영향을 미치는 요인을 규명하고 적절한 산정기준을 마련하였다. 또한, 불교란 해성점토를 가지고 일정변형률 압밀시험과 단계별재하 압밀 시험을 실시하여 그 결과를 비교·분석함으로써 그 적용 가능성을 연구하였다.

* 서울시립대학교 박사수료, 정회원
** 서울시립대학교 교수, 정회원

2. 이론적 배경

2.1 해석이론

본 CRS 시험결과는 1971년 Wissa가 제안한 근사해를 이용하여 압밀해석을 수행하였다. Wissa는 미소변형을 근거로 압밀계수는 임의 시간에서 시료의 깊이에 따라 일정하며, 시료내의 간극수압분포를 포물선으로 보고 1식과 같이 압밀지배방정식을 제시하고 시험의 경계 및 초기조건과 무차원변수 $X = z/H, T_v = c_v t/H^2$ 를 적용하여 해를 유도하였다. 그리고, 정상상태에서 비선형거동을 하는 경우 압축지수가 일정하다는 가정하에 시료내의 평균유효응력과 압밀계수를 식 2, 3과 같이 산정하였다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \tag{1}$$

$$\overline{\sigma_{ave}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_h + \sigma_v u_h^2)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

$$C_v = -\frac{H^2 \log(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}})}{2\Delta t \log(1 - \frac{u_h}{\sigma_v})} \tag{3}$$

그러나, Wissa 이론은 압밀특성을 결정하는 해석방법이 지배방정식의 이론적 해에 기초한 것으로 많은 가정사항을 포함하고 있어 산정된 압밀특성이 압축성, 압밀도에 영향을 받게된다. 기존 연구결과, Cv가 일정하다는 가정은 정규압밀구간에서 타당하지만, 과압밀 구간에서는 타당하지 않는 것으로 나타났다. 이는 압밀과정중 정상상태가 이루어지지 않음에도 불구하고 정상상태로 가정한 것으로 실제로 $Tv \geq 0.5$ 일때 정상상태로 가정할 수 있지만, $T < 0.5$ 이면 전이상태가 발생하여 변형률 분포는 Tv와 일치하지 않게 된다. 이러한 전이상태는 대개 하중재하 직후 일어나고 큰 과잉간극수압을 발생시키는 고변형속도에서 일어난다.

2.2 변형속도 산정기준

변형속도는 ASTM(1982)의 추천치와 Armour & Drnevich(1986)의 제안식을 이용하여 결정하였다. Armour 등은 Wissa의 이론을 근거로 식 4와 같은 산정식을 제안하였다. 여기서, P_a는 대기압을 나타내고 C는 대상지반의 지수특성에 의존하는 계수이며, Ho와 ko는 각각 시료의 초기 높이와 투수계수를 나타낸다. 본 연구에서는 경험식을 이용하여 ko를 산정하였고, 시료하부에서 발생하는 최대 간극수압비$(ub/\sigma)max$는 ASTM(D 4186)에서 추천하는 30%를 적용하였다.

$$r = -\frac{C P_a k_0}{\gamma_w H_0} \log\left[1 - \left(\frac{u_b}{\sigma}\right)_{max}\right] \tag{4}$$

여기서, $C = \exp(8 - 3LI)$ (5)

2.3 간극수압비 $(u_b/\sigma_v)_{max}$ 기준

여러 가지 제안된 방법으로 변형속도가 결정되면, 선정된 변형속도의 타당성과 유효성을 검증하기 위하여 실험결과로부터 간극수압비를 계산한다. 만약, 간극수압비가 너무 높으면 유효응력, 압

밀계수 등에 많은 오차를 내포할 수 있으므로 오차를 최소화하고 합리적인 해를 얻기 위하여 간극수압비의 범위를 결정해야 한다. 간극수압비의 범위는 주로 시료의 초기 간극비상태, 구조적특성, 압축성과 투수성을 나타낸다. 도표 1은 기존 CRSC 시험에서 추천되는 간극수압비를 나타낸 것으로 5~70% 범위에 있다.

도표 1. 간극수압비 추천치

참고 문헌	$(u_b/\sigma_v)_{max}$ 추천치 (%)
Smith & Wahls (1969)	50
Wissa et al. (1971)	5
Gorman et al. (1978)	50
Janbu et al. (1981)	70
Lee (1981)	70
Armour and Drnevich(1986)	40~50
Larsson and Sallfors (1986)	15
Sandbaekken et al. (1986)	5~10
Znidaricic et al. (1986)	30~50
ASTM D4186 (1989)	3~30

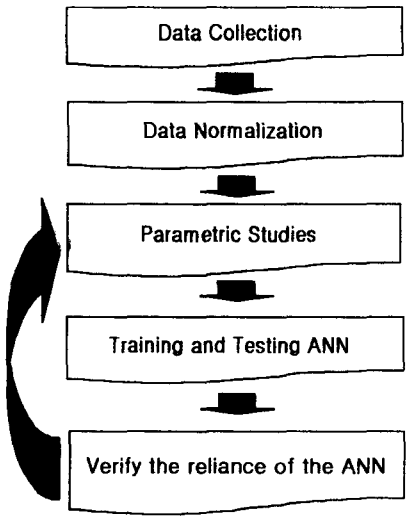

그림 1. 신경망 프로그램밍 흐름도

3. 인공신경망의 설계 및 적용

3.1 인공신경망의 설계

디지털 컴퓨터는 프로그램에 의해 순차적으로 업무를 수행할 뿐 인간과 같이 판단하며 인식할 수 있는 능력이 없기 때문에 인간 두뇌의 신경망 조직과 판단 과정을 모델링하여 프로그램밍 하는 것을 뉴로컴퓨터 또는 인공신경망이라 한다. 이러한 구조를 가진 신경망은 입력 데이터를 통하여 학습되어지는 특성을 가지며 프로그램 되지 않는다. 즉, 전통적인 방식의 컴퓨터와 같이 미리 정해진 순서에 따라 수행되는 프로그램이 아닌 입력값과 출력값이 주어지면 원하는 결과를 낼 수 있도록 학습하는 것이다. Eberhart(1990) 등은 신경망 이론에 역전파 이론을 적용할 때 그림 1과 같은 순서를 거쳐야 한다고 제안하였다.

먼저, 다수의 데이터와 학습은 비선형 함수에 대한 정확한 이해를 가능하게 되므로 우선 다양한 조건을 가진 충분히 많은 데이터를 수집하여야 한다. 또한, 학습 후 수렴 정도를 높이기 위해서는 인공신경망에 학습을 시키기 전에 데이터를 0~1사이의 값으로 정규화 하여야 한다. 본 논문에 사용된 정규화 방법은 Master의 방법(1993)을 따르기로 한다. 그러나 중요인자가 아닌 인자들을 이용한 학습은 오히려 정확도의 감소는 물론 수렴 여부도 불확실하게 되므로 입력 인자와 출력 인자간의 상관관계를 파악하여 최소의 중요 영향인자를 파악하는 것이 중요하다.

인공신경망의 학습은 은닉층의 수와 은닉 층에서의 Node의 수를 변화시켜가며 오차 제곱의 합이 최소가 되는 신경망을 최적의 신경망으로 규정하여 학습을 수행하였다. 또한, 학습이 종료된 후에 학습에 사용되지 않은 데이터를 가지고 신경망의 신뢰성을 검증하여야 하며, 이때 검증에 사용되는 데이터의 정규화 된 입력 변수 값은 0~1 사이의 값을 가져야 한다. 만약 이 범위에 포함되지 않는다면 학습에 의한 Mapping된 범위를 벗어나게 됨으로써 신뢰성 검증에 합당한 결과를 산출하지 못하게 되는 우를 범하게 된다.

도표 2. 학습 데이터의 토질정수

토질정수	범위
Wn (%)	38.8 ~ 142.8
LL (%)	44.0 ~ 120.2
PI (%)	22.9 ~ 74.2
LI	0.75 ~ 1.69
Gs	2.42 ~ 2.71
e_o	1.049 ~ 3.499
γ_d(g/㎤)	0.542 ~ 1.318
# 200 통과량	79.8 ~ 99.6
변형속도(%/min)	0.004 ~ 0.250
$p_{c(CRSC)}/p_{c(ILT)}$	0.93 ~2.60
$c_{c(CRSC)}/c_{c(ILT)}$	0.79 ~1.61
$(u_b/\sigma_v)_{max}$	4.4 ~45.1

도표 3. 인공신경망 검증을 위한 데이터

구분	A	B	C
Wn (%)	105.3	69.9	72.3
LL (%)	95.4	68.2	57.8
PI (%)	62.9	37.7	34.7
LI	1.16	1.05	1.42
Gs	2.60	2.68	2.70
e_o	2.762	1.909	1.953
γ_d(g/㎤)	0.691	0.924	0.914
# 200 통과량	85	83.5	95.3
변형속도(%/min)	0.02	0.02	0.046
$p_{c(CRSC)}/p_{c(ILT)}$	1.16	1.06	1.07
$c_{c(CRSC)}/c_{c(ILT)}$	1.05	1.08	1.21
$(u_b/\sigma_v)_{max}$	6.88	5.33	9.1

3.2 인공신경망의 적용 및 검증

본 인공신경망의 학습에 이용된 시험데이터는 총 35개로 이중에서 32개를 학습자료로 이용하였으며, 3개를 검증자료로 이용하였다. 학습 데이터의 토질정수는 도표 2와 같다. CRSC 시험의 적정변형속도를 예측하기 위하여 12개의 학습인자를 가지고 학습시킨 결과 첫 번째 은닉층과 두 번째 은닉층의 수가 각각 9개 그리고 학습률 0.1, 모멘텀 상수가 0.1인 상태에서 학습오차가 가장 작게 나타났다. 그림 2와 같이 50000번의 학습이 수행된 후에 학습오차가 2×10^{-5} 정도의 정밀도가 나와 충분한 정밀도를 가지고 학습이 수행됨이 나타났다. 또한, 선행압밀응력비, 압축지수비, 압밀계수비, 투수계수비 등 각종 압밀특성과 최대 및 평균 간극수압비에 영향을 미치는 인자에 대하여 상대적인 중요도를 파악한 결과 그림 3에서 보듯이 변형속도(r)와 입도가적곡선에서 60% 통과 율에 해당되는 입경(D_{60})이 가장 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 같이 설계한 인공신경망의 신뢰성을 검증하기 위하여 표 3과 같은 학습에 사용되지 않은 3개의 데이터에 대하여 인공신경망으로 각종 압밀특성비와 간극수압비를 예측하고 이를 실제 시험 값과 비교한 결과 그림 4와 같이 선행압밀비와 압축지수비는 아주 높은 상관도를 나타내었으며, 압밀계수비 및 투수계수비 그리고 간극수압비도 비교적 높은 상관도를 나타내었다.

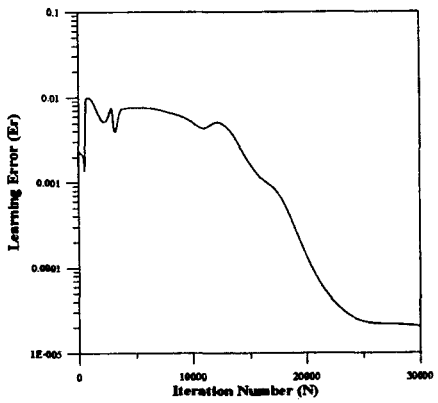

그림 2. 학습횟수에 따른 Er

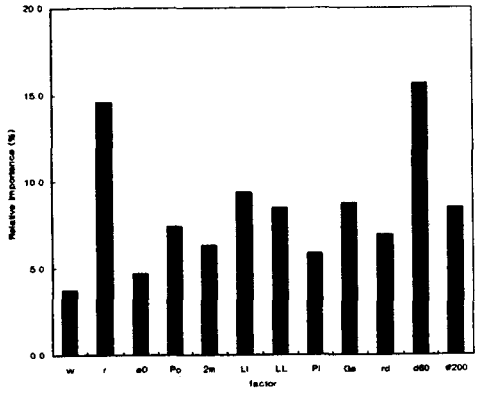

그림 3. 영향인자의 상대적인 중요도

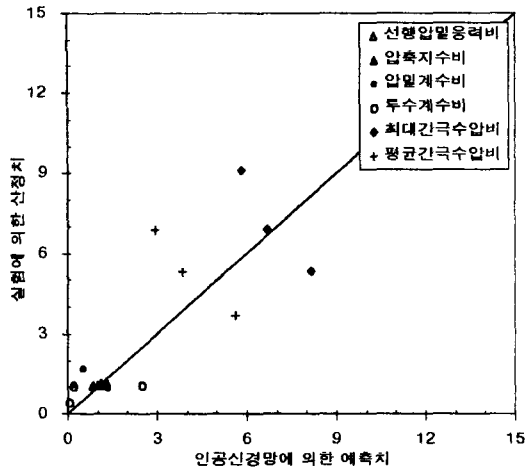

그림 4. 시험치와 예측치의 상관도

도표 4. 시료별 토질정수와 산정된 변형속도

시료구분		BH-1	BH-2	BH-3
Wn (%)		77.4	63.5	68.7
LL (%)		79.0	70.7	72.8
PI (%)		45.4	43.3	47.1
LI		0.96	0.83	0.91
Gs		2.70	2.70	2.70
e_o		2.029	1.720	1.774
γ_d(g/㎤)		0.891	0.989	0.970
# 200 통과량		99.5	98.3	99.1
변형속도 (%/min)	ASTM	0.004	0.004	0.004
	Armour	0.040	0.015	0.080
	인공신경망	0.010	0.010	0.008

4. 실내시험

본 연구에서 사용된 시료는 서해안 하동지역에서 채취한 연약한 해성점토로 도표 4와 같이 전체적으로 간극비와 함수비 등의 시료조건이 유사한 상태를 선별하여 실시하였다. 본 연속재하 압밀시험은 단계별재하 압밀시험과 같이 직경이 6.0㎝, 높이가 2.0㎝인 동일한 시료 크기로 실시하였으며, 정확한 간극수압을 측정하기 위해 97% 이상 포화시킨 후에 표 4와 같이 세가지 변형속도 기준으로 산정된 변형속도로 시험을 실시하였다. 한편, 단계별재아 압밀시험의 하중증분비와 단계별 재하시간은 각각 1.0과 24시간으로 하였다.

5. 시험결과 및 고찰

표 4에서 보듯이 변형속도 산정방법에 따라 그 추천변형속도가 매우 상이한 것을 알 수 있다. ASTM 추천 변형속도는 너무 느려서 시험 소요시간이 너무 과대하게 소요된다. 이에 반하여 Armour등의 추천 변형속도는 너무 빠르게 산정되어 간극수압비가 너무 크게 산정되어 그 결과 얻어지는 압밀특성들이 신뢰성이 떨어지는 경향이 있다. 한편, 인공신경망은 두 가지 추천치의 중간정도의 변형속도를 가지는 것으로 나타나 시험 소요시간 및 산정되는 압밀특성의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 나타났다. 그림 5는 각각의 변형속도 예측법으로 산정된 변형속도를 가지고 실시한 연속재하압밀시험을 결과와 단계별 압밀시험결과로 얻어진 압밀특성비 및 간극수압비를 나타낸 것이다. 분석결과, 모든 선행압밀비와 압축지수비가 1에 근접하여 단계별 재하압밀시험결과를 예측하는데 무리가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 압밀계수비와 투수계수비의 경우는 ASTM 및 Armour 제안치로 시험한 결과는 다소 상이한 결과를 나타내었으며, 인공신경망에 의한 결과는 적합한 결과를 나타내었다. 이는 연속재하압밀시험중 발생하는 간극수압비가 압밀계수와 투수계수 값을 산정하는 데 큰 영향을 미치기 때문인데, 그림에서 보듯이 느린 ASTM 변형속도로 시행하여 발생되는 간극수압비가 너무 작게 나타나고, 아주 빠른 Armour의 변형속도는 시행된 결과에서는 간극수압비가 다소 크게 나타나 전이상태가 발생하기 때문이다. 이에 반해 인공신경망에 의하여 산정된 변형속도로 실험한 결과 간극수압비가 15% 이내로 나타났으며, 그 결과 얻어지는 압밀계수와 투수계수가 ILC 시험결과에 근접한 것으로 나타났다. ASTM 에서는 최대간극수압비를 30%까지 보고 있으나 본 연구결과 다소 과대한 것으로 판단되므로 향후 간극수압비에 대한 연구가 진행되어야 한다.

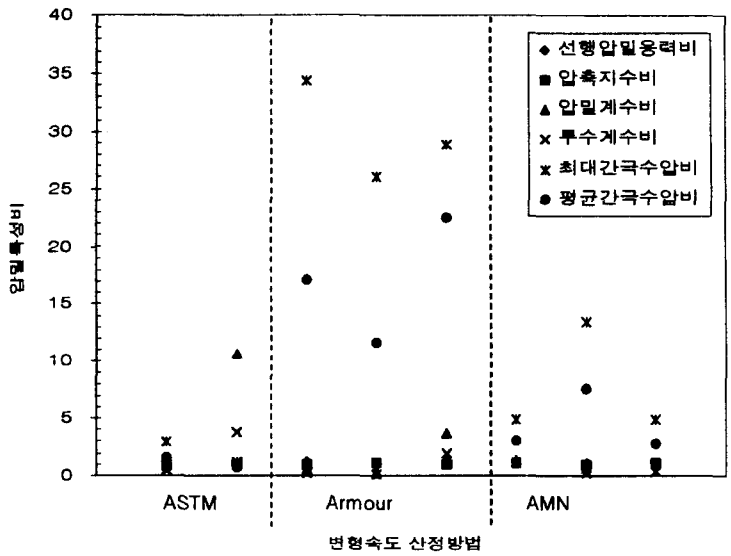

그림 5. 변형속도 산정방법별 압밀특성비

6. 결 론

본 연구에서는 인공신경망을 적용하여 연속재하압밀시험시 적합한 변형속도와 간극수압비를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인공신경망 학습결과 연속재하압밀시험으로 얻어지는 각 압밀특성비에 영향을 미치는 주요인자는 시험조건인 변형속도와 시료특성인 입도가적곡석 60% 통과 입경으로 나타났다.
2. 인공신경망을 적용하여 변형속도를 산정한 결과, 그 값이 ASTM 추천치와 Amour의 산정치의 중간정도의 범위로 시험 소요시간 및 압밀특성 산정결과가 적합한 것으로 나타났다.
3. 인공신경망에 의한 변형속도로 시험하여 얻어진 간극수압비가 15% 이내로 그 결과로 얻어지는 압밀특성들이 적합한 것으로 나타났으며, 다른 추천치의 변형속도로 실험한 결과보다 단계별재하 압밀시험결과에 근접한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 이송, 이규환, 채점식(1999) CRS시험의 적정변형속도 산정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제19권 III-4호, pp. 821-829.
2. 이송, 박증배, 채점식(2001) 연속재하압밀시험방법에 따른 점성토 지반의 압밀특성, 대한토목학회논문집, 제21권 제 3-C호, pp. 299-309.
3. 채점식, 박형규, 김형건, 이 송(2001) 인공신경망을 이용한 적정 변형속도 산정, 대한토목학회 2001년도 학술발표회 논문집.
4. Armour, D. W. and Drnevich, V. P. (1986) Improved Techniques for the Constant Rate of Strain Consolidation Test, Consolidation of Soils : Testing and Evaluation. ASTM STP 892. Yong, R. N., and Townsend. F. C., Eds., Philadelphia, pp. 170-183.
5. 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.