

국내 연약지반의 신뢰성있는 비배수 전단강도 추정을 위한 flat DMT와 인공신경망 이론의 적용

Application of Flat DMT and ANN for Reliable Estimation of Undrained Shear Strength of Korean Soft Clay

변 위 용¹ Byeon, Wi-Yong

김 영 상² Kim, Young-Sang

이 승 래³ Lee, Seung-Rae

정 은 택⁴ Jeong, Eun-Taeg

Abstract

The flat dilatometer test (DMT) is a geotechnical tool to estimate in-situ properties of various types of ground materials. The undrained shear strength is known to be the most reliable and useful parameter obtained by DMT. However, the existing relationships which were established for other local deposits depend on the regional geotechnical characteristics. In addition, the flat dilatometer test results have been interpreted using three intermediate indices - material index (I_D), horizontal stress index (K_D), and dilatometer modulus (E_D) and the undrained shear strength has been estimated merely using the horizontal stress index (K_D). In this paper, the applicability of the flat dilatometer to Korean soft clay deposit has been investigated. Then an artificial neural network was developed to evaluate the undrained shear strength by DMT and the ANN, based on the p_0 , p_1 , p_2 , σ'_v and porewater pressure. The ANN which adopts the back-propagation algorithm was trained based on the DMT data obtained from Korean soft clay. To investigate the feasibility of ANN model, the prediction results obtained from data which were not used to train the ANN and those obtained from existing relationships were compared.

요 지

DMT 시험은 연약지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 현장 시험방법으로, 이 방법으로부터 구한 비배수 전단강도는 가장 신뢰성 있고 유용한 매개변수로 알려져 있다. 그러나 국외 다른 지역의 자료를 토대로 기존에 제안된 상관관계식은 지역적인 특성에 의존한다. DMT 시험 결과는 3가지 중간 지수 - 재료지수, 수평응력지수, dilatometer modulus를 사용하여 해석이 이루어지며 특히 비배수 전단강도는 수평응력지수만을 이용하여 예측하고 있다. 본 논문에서는 먼저 DMT 시험의 국내 연약지반에서의 적용성을 살펴보았으며 DMT로부터 비배수 전단강도를 추정하기 위하여 p_0 , p_1 , p_2 , σ'_v 그리고 초기 간극수압을 바탕으로 인공신경망 모델을 개발하였다. 인공신경망 모델은 오차 역전파 알고리즘을 적용하였으며 국내 연약지반에서 수행된 DMT 시험 자료를 이용하여 훈련하였다. 인공신경망 모델의 적용성을 판단하기 위하여 훈련에 이용되지 않은 자료로부터 예측된 결과와 기존에 제안된 상관관계식으로부터 얻은 결과를 서로 비교하였다.

Keywords : Artificial neural network(ANN), Flat dilatometer test(DMT), Soft clay, Undrained shear strength

1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, dyuran@kaist.ac.kr)
2 정희원, 국립여수대학교 해양시스템학부 전임강사 (Member, Prof., Division of Ocean System, Yosu National Univ.)
3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)
4 정희원, (주) 현대산업개발 토목설계팀 과장 (Member, Manager, Civil Engrg. Team, Hyundai Development Co. Ltd.)

1. 서론

1980년 Marchetti에 의해 처음 고안된 flat DMT는 지반 특성을 파악하기 위하여 적용되고 있는 현장 시험 방법으로 매우 신속하고 간편하며 경제적으로 시험을 수행할 수 있을 뿐 아니라 시험자에 거의 상관없이 매우 신뢰성 있는 결과를 제공하는 장점을 가지고 있다. DMT 결과는 Marchetti에 의해 제안된 3가지 중간 지수 식 (1)에 의해 해석이 이루어지며 많은 연구자들에 의해 이들 지수를 이용하여 지반 설계변수들을 예측하는 여러 상관관계식들이 제안되었다. 즉 DMT 자료 분석으로부터 연직 배수 구속 변형계수(M), 비배수 전단강도(s_u), 현장 수평 정지토압계수(K_0), 과압밀비(OCR), 수평압밀 계수(c_h), 단위중량 및 흙의 종류 등 여러 지반 설계변수들을 추정할 수 있다. 특히 이들 중 M과 s_u 값이 DMT 시험에 의해 가장 신뢰성 있고 유용하게 추정될 수 있는 지반 설계변수 값으로 알려져 있다(Marchetti 등, 2001).

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (1a)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (1b)$$

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (1c)$$

여기서 I_D 는 재료지수, K_D 는 수평응력지수, E_D 는 dilatometer modulus, u_0 는 관입전 현장지반의 간극수압, p_0 는 초기 접촉압력, p_1 는 1.1mm 팽창 압력, σ'_v 는 연직유효응력이다.

그러나 비배수 전단강도는 경계 조건, 구속 조건, 초기 조건 그리고 현장 시험 장비 특성 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 국내 지반과는 다른 조건과 특성을 나타내는 자료를 활용하여 제안된 기존의 여러 상관관계식들을 그대로 국내 지반에 적용할 경우, 예측된 결과의 신뢰성을 확보하기 어려운 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 연약지반에서 수행된 DMT 자료를 활용하여 보다 신뢰성 있는 비배수 전단강도를 예측할 수 있도록 인공신경망 이론의 적용성을 검토하였다.

인공신경망은 다양한 입력변수에 대한 검토가 가능하며 현장 지반의 변화와 입력된 자료의 불확실성을 고려할 수 있도록 학습함으로써 기존의 경험적 상관관계보다 높은 신뢰성을 확보할 수 있다(Goh, 1994). 또한 비배수 전단강도는 비교란 시료를 이용한 UU, UC 또는 현장 배인 시험으로부터 구할 수 있으며 여러 연구자들

에 의해 이러한 시험 방법들이 비교적 타당한 결과를 제공하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 UU, UC 그리고 현장 배인 시험을 기준이 되는 시험(reference tests)으로 선택하여 DMT 시험 결과와 비교하였으며 인공신경망 모델 적용 시 최종목표(target) 자료로 활용하였다.

2. 비배수 전단강도

Marchetti(1980)는 Ladd 등(1977)이 제안한 식 (2)를 기초로 해서 비배수 전단강도를 산정하는 경험적인 방법을 제안하였다.

$$(s_u/\sigma'_v)_{OC} = (s_u/\sigma'_v)_{NC} OCR^{0.8} \quad (2)$$

여기서 $(s_u/\sigma'_v)_{NC}$ 는 Mesri(1975)가 제안한 0.22를 사용하며 Marchetti(1980)가 제안한 OCR과 K_D 관계식 (3)을 사용하면 비배수 전단강도를 구하는 상관관계식은 식 (4)와 같이 정의될 수 있다.

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \quad (3)$$

$$s_u = 0.22 \sigma'_v (0.5K_D)^{1.25} \quad (4)$$

한편 Kamei & Iwasaki(1995)는 일본 점토에 대한 일축압축(UU) 시험으로부터 얻어진 비배수 전단강도와 비압밀비배수 삼축압축(UU) 시험 자료를 바탕으로 식 (4)를 보정하여 자국의 지반에 적합한 비배수 전단강도식을 다음과 같이 수정 제안하였다.

$$OCR = (0.47K_D)^{1.43} \quad (5)$$

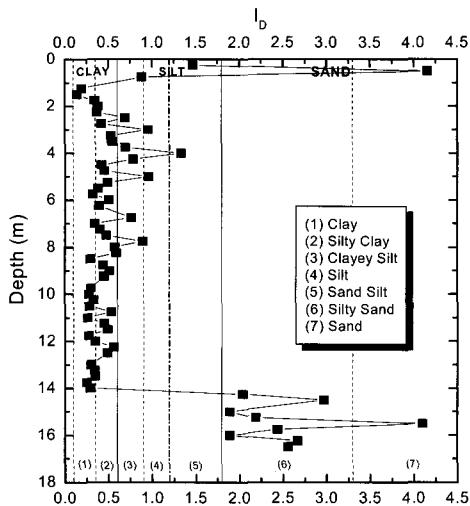
$$s_u = 0.35 \sigma'_v (0.47K_D)^{1.14} \quad (6)$$

이외에도 표 1에 제시된 바와 같이 여러 연구자들이 다양한 지반 조건에서 수행된 DMT 시험으로부터 비배수 전단강도를 구하는 경험적인 상관관계식들을 제안하였다(Mayne & Martin, 1998).

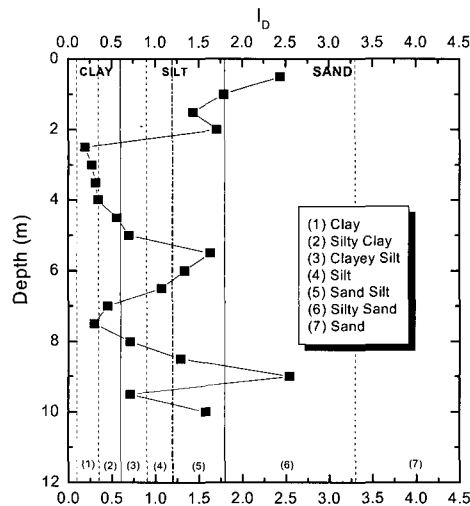
본 연구에서는 국내 서·남해안에 위치한 4개 지역의 연약지반을 대상으로 총 20회의 DMT 시험을 수행하였으며 일축, UU 그리고 현장 배인 시험에서 각각 얻어진 비배수 전단강도를 DMT 시험으로 예측된 값과 비교하였다. 그림 1에는 DMT 시험을 통한 대상 지역의 대표적인 지반 특성을 보여주고 있다(Marchetti, 1980). 대부분 점토 지반으로 구성되어 있으며 Site-2의 경우는 점토층 중간에 실트층과 모래층이 존재하는 지반 특성을 보여주고 있다.

표 1. 기존에 제안된 비배수 전단강도 상관관계식(Mayne & Martin, 1998)

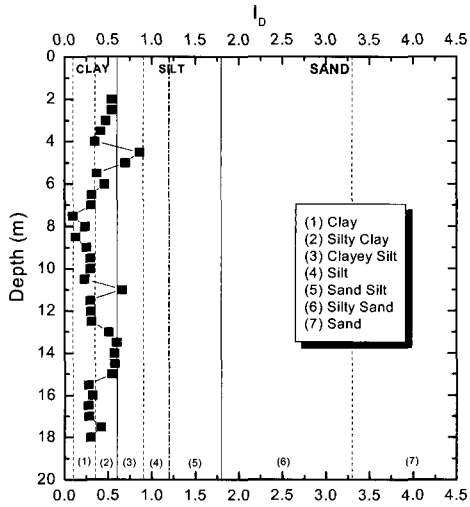
RELATIONSHIPS	NOTE	REFERENCES
Bearing capacity evaluation : $s_u = (p_1 - \sigma_{h0}) / N_c$ where $\sigma_{h0} = K_0 \sigma_v' + u_0$	For Norwegian soils : Brittle clay and silt : $N_c = 5$ Medium clay : $N_c = 7$ Insensitive plastic clay : $N_c = 9$	Roque et al. (1988)
$s_u = 0.20(0.5K_D)^{1.25} \sigma_v'$	Norwegian clays calibrated to triaxial compression	Lacasse & Lunne (1988)
$s_u = 0.19(0.5K_D)^{1.25} \sigma_v'$	Norwegian clays calibrated to field vane results	
$s_u = 0.14(0.5K_D)^{1.25} \sigma_v'$	Norwegian clays calibrated to simple shear data	
Swedish clay data : $s_u = (p_1 - u_0) / F$	Inorganic clays : $F = 10.3$ Organic clays : $F = 9.0$	Larsson & Eskilson (1989)
$s_u = 0.41(0.5K_D)^{0.39} \sigma_v'$	Calibrated with field vane tests in Taiwan clay	Su et al. (1993)
$s_u = 0.27(0.5K_D)^{1.49} \sigma_v'$	Referenced to laboratory UC tests on Taiwan clay	
$s_u = 0.22(0.5K_D)^{1.25} \sigma_v'$	Referenced to UU triaxial tests on Taiwan clay	
$s_u = (p_0 - \sigma_{h0}) / N_{p0}$	Finite element analysis: $N_{p0} = 1.57 \cdot \ln(G/s_u) - 1.75$	Yu et al. (1993)



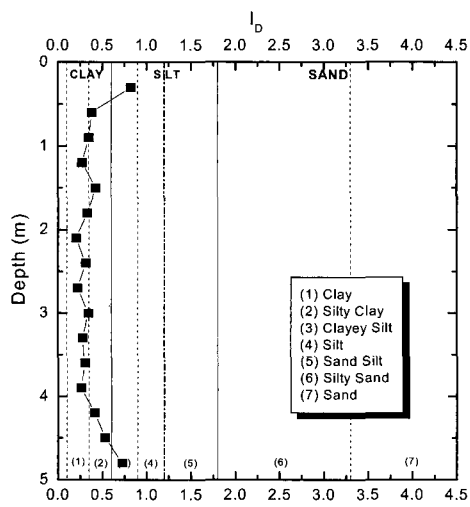
(a) Site-1



(b) Site-2



(c) Site-3

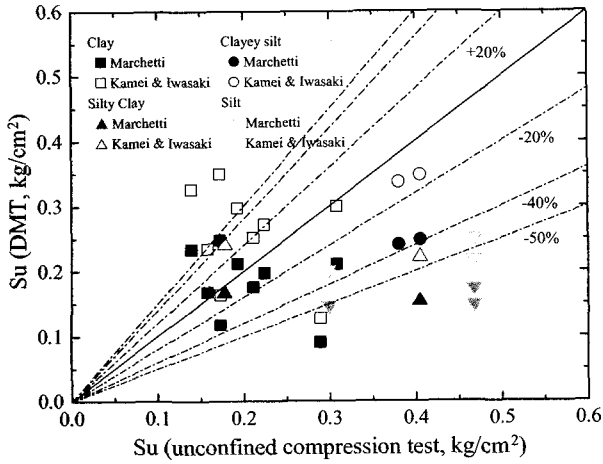


(d) Site-4

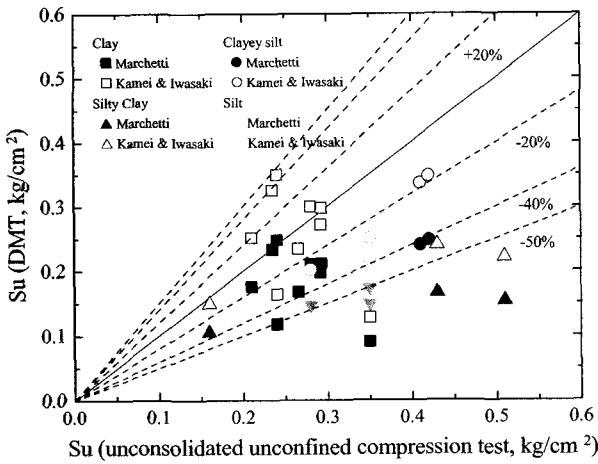
그림 1. 시험 대상 지역의 지반 특성

2.1 비배수 전단강도 비교

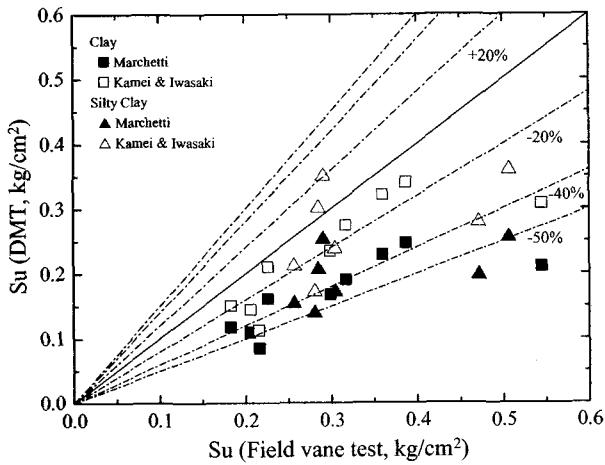
4개 지역의 지반을 대상으로 DMT 시험을 수행한 자



(a) 일축 압축시험과 DMT 시험 결과 비교



(b) UU 시험과 DMT 시험 결과 비교



(c) 현장 베인시험과 DMT 시험 결과 비교

그림 2. 일축, UU 또는 현장 베인시험으로부터 구한 비배수 전단강도와 DMT 시험 결과 비교

료를 활용하여 Marchetti(1980)가 제안한 상관관계식 (4)와 Kamei & Iwasaki(1995)가 제안한 상관관계식 (6)을 이용하여 비배수 전단강도를 추정하였고 기준이 되는 시험(reference tests)으로부터 얻어진 비배수 전단강도와 비교하였다.

앞서 기술한 바와 같이 Marchetti의 제안 식 (4)는 Mesri(1975)가 현장 베인 시험으로부터 제안된 값 $(s_u/\sigma'_{vc})_{NC}=0.22$ 을 사용하여 도출한 상관관계식이며 Kamei & Iwasaki(1995)의 제안 식 (6)은 UU와 UC 실험 결과로부터 얻어진 상관관계식이다. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 현장 베인 시험 결과와 비교한 경우 Marchetti (1980) 식보다는 Kamei & Iwasaki(1995) 식이 다소 유사한 결과를 추정하는 것으로 판단되며 전체적으로 기준에 제안된 상관관계식으로부터 추정된 비배수 전단강도는 기준이 되는 시험결과와는 차이가 나며 분산이 큰 것을 알 수 있다(그림 2). 이러한 이유는 여러 가지가 있으며 이 중에서 몇 가지를 제시하면 다음과 같다.

2.2 단위중량의 과소평가

비배수 전단강도 추정식 (4)와 (6)을 이용하기 위해서는 현장 지반의 현재 응력상태(σ'_v)를 구해야 하며 이때 일반적으로 실내시험으로부터 직접 얻어진 값을 입력하거나 Marchetti & Crapps(1981)가 제안한 상관관계인 그림 3을 이용하면 DMT 시험 결과로 얻어진 단위중량을 추정하여 초기 응력을 구할 수 있다. FHWA(1988)에서는 Marchetti & Crapps(1981)의 제안을 이용하여 깊이 에 따른 단위중량 변화를 고려한 상재하중을 예측하여 해석에 사용하고 있다.

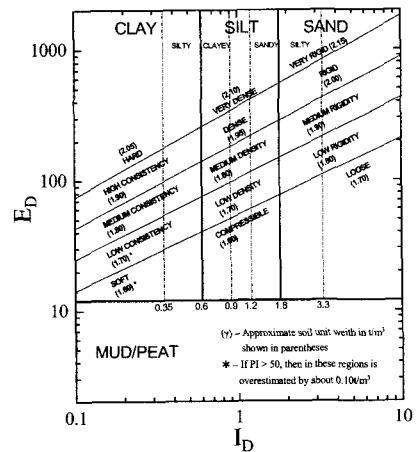


그림 3. Marchetti & Crapps(1981)의 I_D - E_D 도표

표 2. 몇몇 지역 점토의 소성지수

지역	오산	일도	소래	Site-1	Site-2	Site-3
소성지수	15~20	19~25	26~20	4.9~23	2.6~12.2	36.8~54.8

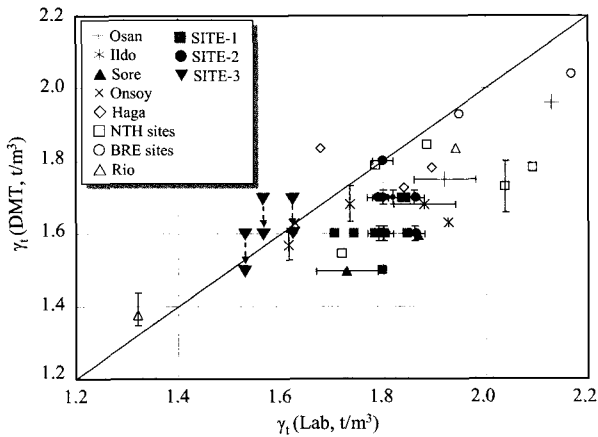


그림 4. 기존 자료를 이용한 여러 지역의 단위중량 비교

그림 4는 국내·외에서 얻어진 지반의 실제 단위중량과 Marchetti & Crapps(1981)의 단위중량 상관관계를 나타내는 그림을 이용하여 예측한 단위중량을 비교한 것으로 국내 자료와 국외 자료에서 모두 예측한 결과가 전반적으로 과소평가되는 경향을 보여주고 있다.

그러나 그림 4에서 Site-3 지역의 경우 다른 지역의 경우와 달리 과대평가하는 경향을 보여주고 있으며 이에 대하여는 다음과 같이 고찰하였다. Marchetti & Crapps(1981)는 I_D - E_D 상관관계에서 소성지수가 50 이상인 경우에는 DMT로부터 추정된 단위중량이 $0.1t/m^3$ 이상 과대평가되며 따라서 감소시켜야 함을 언급하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 Site-3 지역의 경우 소성지수

가 다른 지역보다 다소 높은 경향을 보여주고 있다. 따라서 Marchetti & Crapps의 제안에 의하면 Site-3 지역의 경우 그림 3에 의해 추정되는 단위중량이 과대평가되므로 약 $0.1t/m^3$ 정도 감소시켜야 한다. 그러므로 DMT로부터 구한 단위중량은 전반적으로 과소평가되는 경향이 있으며 이는 비배수 전단강도를 추정하는데 영향을 주게 된다.

2.3 과압밀비 (OCR)

한편 식 (4)와 (6)에는 상재하중과 더불어 비배수 전단강도 추정에 영향을 미치는 요소로 과압밀비가 있으며 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 방법 모두 수평응력계수(K_D)로부터 과압밀비를 예측하고 있다. 이에 대한 예측 결과는 그림 5에서 알 수 있듯이 두 방법이 모두 대체적으로 유사한 경향을 보여주고 있지만 국내 지반과 같이 과압밀비가 크지 않은 지반의 경우에는 차이가 있을 수 있다. 이는 실내시험결과와 비교한 그림 6에서 보다 명확하게 알 수 있다. 즉 그림 6에서 알 수 있듯이 기존의 OCR 상관관계를 이용한 예측은 국내 지반의 경우 OCR을 다소 과대평가하는 것으로 판단되며 이 또한 예측되는 비배수 전단강도에 분산을 야기하는 한 요인으로 사료된다.

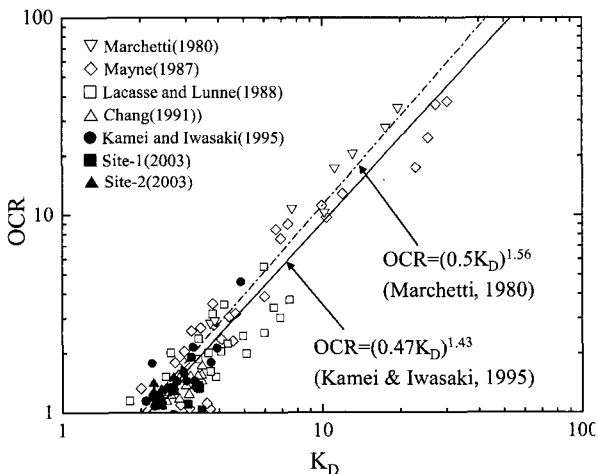


그림 5. 연약지반에서의 OCR- K_D 간의 관계

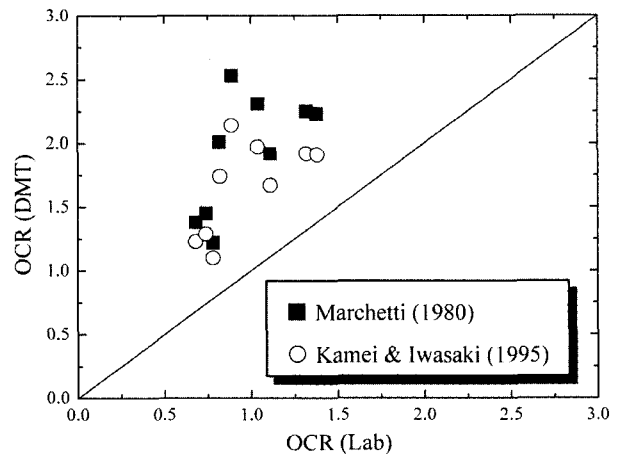


그림 6. 실내시험과 DMT 시험으로부터 구한 OCR 비교

3. ANN 모델의 적용

연약지반의 비배수 전단강도를 예측하기 위해 이용되는 기존의 방법들은 앞에서 제시한 영향 요인 뿐 아니라 그 외 다양한 인자들이 결과에 영향을 미치므로 이들 각 요소간의 복합적인 작용을 기존의 간단한 상관관계 식만으로는 표현하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 DMT 자료로부터 직접 이러한 상호 연관성을 고려하여 비배수 전단강도를 예측하기 위하여 인공신경망 모델의 적용성을 검토하였다.

인공신경망 이론은 인간의 뇌 구조에서 학습되고 축적되는 기존 지식의 운용체계를 모사한 컴퓨터 모델로 최근 지반공학 분야에서도 다양한 문제에 적용되고 있다(Toll, 1996; 이성진 등, 2002; 김영상, 2003). 인공신경망 모델은 먼저 기지의 입력과 결과를 이용하여 각 층에 존재하는 뉴런간의 연결강도를 조정하는 훈련단계와 훈련과정을 통하여 구축된 모델을 검증하는 단계로 이루어져 있다.

3.1 데이터베이스(database)

본 연구에서는 4개 지역의 대상 연약지반지역에서 수행된 DMT 자료들과 실내시험 결과들을 이용하여 인공

표 3. 훈련단계 자료

p ₀	p ₁	p ₂	u ₀	σ _{v'}	s _u
2.172	2.437	1.733	0.653	0.396	0.224
2.57	2.937	2.121	0.836	0.569	0.28
2.529	2.927	2.09	0.836	0.508	0.293
2.6	3.059	1.958	0.734	0.554	0.235
2.906	3.416	2.264	0.887	0.643	0.24
2.152	2.59	1.611	0.683	0.52	0.21
1.968	2.417	1.479	0.632	0.39	0.265
2.58	3.059	2.345	0.704	0.9	0.209
4.344	5.099	3.62	1.55	1.139	0.26
2.631	3.11	2.243	0.948	0.749	0.24
1.83	2.371	1.479	0.602	0.559	0.19
2.621	3.314	1.886	0.663	0.515	0.291
2.661	3.416	1.886	0.846	0.81	0.285
1.22	1.4	0.77	0.29	0.26	0.173
2.2	2.77	1.32	1.6	0.55	0.178
1.28	1.64	0.9	0.41	0.304	0.16
3.457	3.62	2.906	0.897	1.016	0.243
1.723	1.937	1.428	0.296	0.685	0.153
2.121	2.447	1.784	0.5	0.79	0.166

신경망 모델을 훈련, 검증하였다. 표 3과 4에 제시된 바와 같이 인공신경망 모델을 학습하기 위하여 19개의 학습 자료를 구축하였으며 구축된 모델을 검증하기 위하여 7개의 자료를 사용하였다.

3.2 인공신경망 모델 구성

본 연구에서 구축된 인공신경망 모델은 매트랩 툴박스(Matlab neural network toolbox)를 이용하였으며 오차 역전파 알고리즘을 학습 모델로 사용하였다. 오차 역전파 알고리즘은 입력값과 결과값의 비선형적인 관계를 구축하는 함수근사화에 매우 효율적인 방법으로 알려져 있다(김영상, 2003). 또한 본 연구에서는 인공신경망 모델의 적용시 발생하는 문제 중에 하나인 과적합(overfitting) 문제를 해결하기 위하여 이용되는 일반화 기법 중에 하나인 Bayesian 방법을 적용하였다. 그리고 인공신경망 모델을 효과적으로 학습하기 위하여 식 (7)을 이용하여 각각의 입력 자료와 출력 자료들을 최대값과 최소값을 기준으로 (-1, 1) 사이에서 정규화(normalized)하여 사용하였다. 또한 식 (8)로부터 정규화된 결과값을 다시 실제값으로 전환하는 과정을 거쳤다.

$$pn = \frac{2(p - \min p)}{(\max p - \min p)} - 1 \quad (7a)$$

$$tn = \frac{2(t - \min t)}{(\max t - \min t)} - 1 \quad (7b)$$

$$t = 0.5(tn + 1)(\max t - \min t) + \min t \quad (8)$$

여기서 p=입력 자료; t=출력 자료; pn=정규화된 입력 자료; tn=정규화된 출력 자료; min p=최소값을 갖는 입력 자료; max p=최대값을 갖는 입력 자료; min t=기준되는 시험을 통해서 구한 최소값을 갖는 실측값; max t=기준되는 시험을 통해서 구한 최대값을 갖는 실측값

또한 표 5와 같이 최적의 인공신경망 모델을 선정하

표 4. 검증단계 자료

p ₀	p ₁	p ₂	u ₀	σ _{v'}	s _u
1.407	2.549	0.438	0.275	0.286	0.28
4.048	4.691	3.467	1.203	1.196	0.295
1.56	2.039	1.224	0.367	0.305	0.257
0.806	1.071	0.459	0.041	0.098	0.183
1.254	1.632	0.765	0.163	0.167	0.226
0.857	1.122	0.561	0.092	0.132	0.206
4.818	5.787	4.053	1.805	1.335	0.31

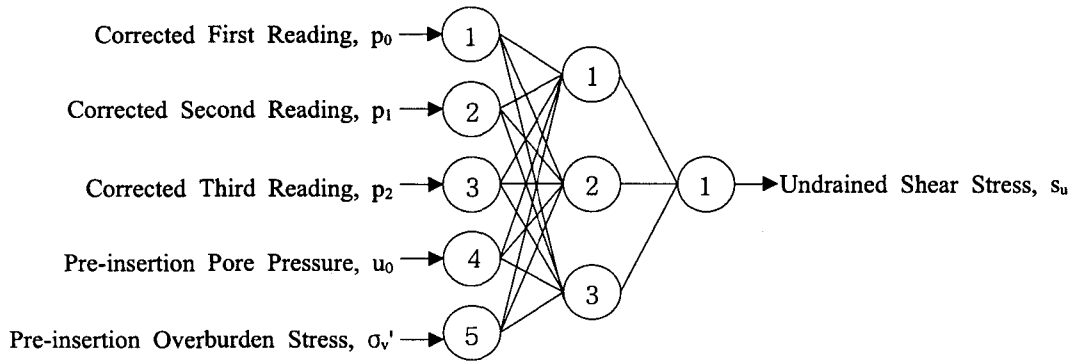


그림 7. DMT 자료를 활용한 비배수 전단강도 추정 인공신경망 모델

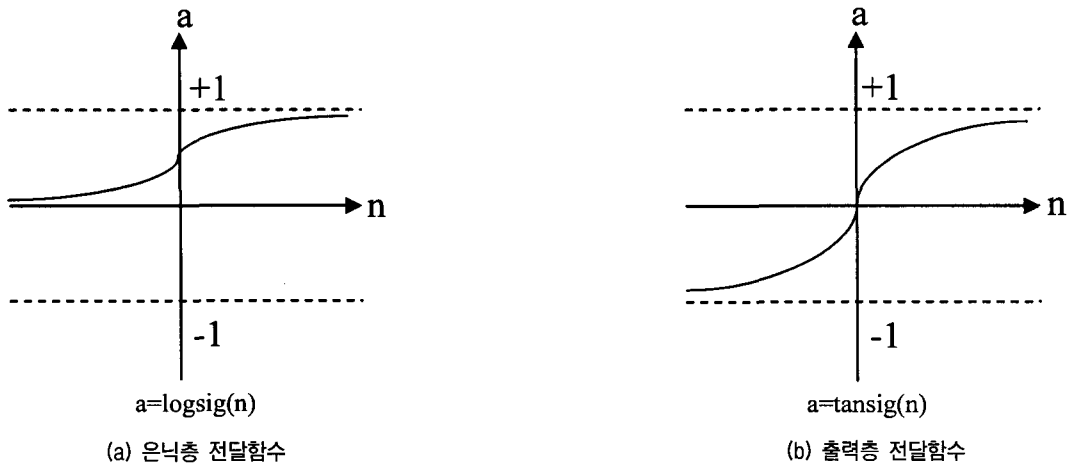


그림 8. 인공신경망 모델에 사용된 전달함수

표 5. 검토된 인공신경망 구조

은닉층의 뉴런 수	전달 함수		상관계수 (R)	
	은닉층	출력층	훈련 단계	검증 단계
3	logsig	tansig	0.9060	0.9742
3	tansig	logsig	0.6961	0.7955
3	purelin	logsig	0.6567	0.7932
3	purelin	tansig	0.8885	0.9758
3	tansig	purelin	0.8947	0.9760
3	logsig	purelin	0.8939	0.9751

기 위하여 다양한 전달 함수들의 조합을 통해서 인공신경망 모델을 검토하였다.

결과적으로 본 연구에서 DMT 시험 자료를 활용한 비배수 전단강도를 추정하기 위한 인공신경망 모델은 그림 7과 같으며 이는 그림 8에 제시된 전달함수를 이용한 5-3-1 구조로 p_0 , p_1 , p_2 , u_0 , σ_v' 으로 구성된 입력층 (input layer)과 3개의 뉴런으로 구성된 단일 은닉층 (hidden layer) 그리고 비배수 전단강도를 제공하는 출력층 (output layer)으로 모델이 되었음을 의미한다.

3.3 구성된 모델의 훈련

19개의 학습 자료를 이용하여 선정된 인공신경망 모델을 학습한 결과가 그림 9에 제시되어 있으며 그림 10에는 학습되어 추정된 비배수 전단강도를 기존 상관관계식들의 결과와 비교하였다. 학습된 인공신경망 모델

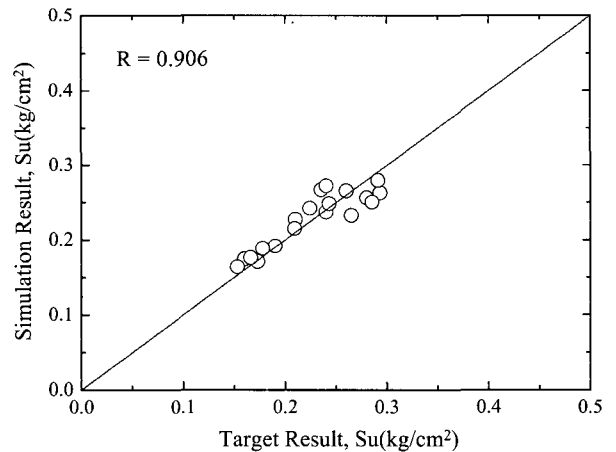


그림 9. 기존 자료를 이용한 훈련 결과

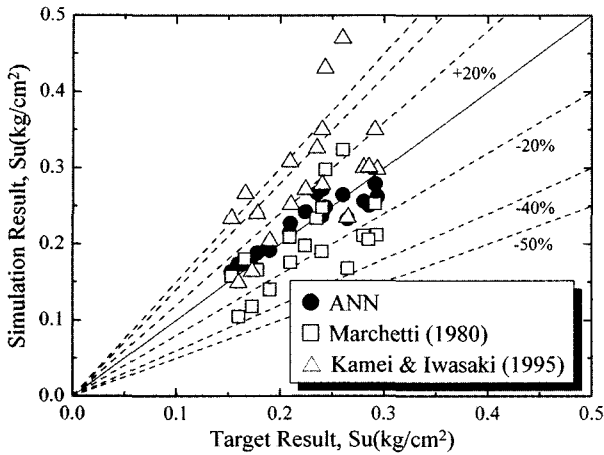


그림 10. 인공신경망 모델 결과와 기존 식을 이용한 결과의 비교

의 예측결과가 기존 상관관계식보다 매우 적은 분산을 보이며 실험으로 얻어진 비배수 전단강도와 잘 일치하는 신뢰성 있는 결과를 제시하는 것으로 볼 때 구축된 신경망 구조가 효율적으로 구축되었음을 알 수 있다.

3.4 구축된 ANN 모델의 검증

구축된 모델을 검증하기 위하여 모델 구축 시 사용되지 않은 총 7개의 자료를 활용하여 인공신경망 모델을 검증하였으며 결과는 그림 11과 같다. 또한 인공신경망 모델을 통해서 추정된 비배수 전단강도 예측 결과를 기존 상관관계식들로 예측된 결과와 비교하여 그림 12에 도시하였다. 그림 12에서 알 수 있듯이 기존의 Marchetti (1980)와 Kamei & Iwasaki(1995) 식에 의한 결과는 상당한 분산을 가질 뿐 아니라 과대 또는 과소평가하는 등 일관성이 결여된 것으로 보이는 반면 인공신경망 모

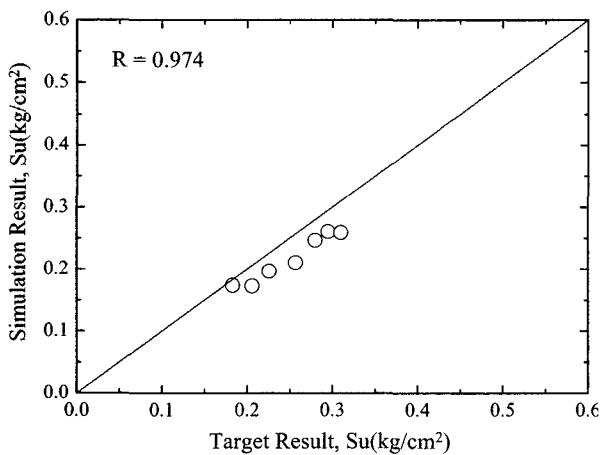


그림 11. 인공신경망 모델의 검증 결과

델은 기존 상관관계식에 비하여 좀더 합리적인 비배수 전단강도를 추정하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 현장 시험 방법 중에 하나인 flat DMT를 이용하여 연약지반의 신뢰성 있는 비배수 전단강도를 추정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 기존에 제안된 Marchetti(1980) 방법과 Kamei & Iwasaki(1995) 방법을 적용하여 실내시험인 일축과 UU시험 그리고 현장 시험인 현장 베인 시험을 통해서 구한 비배수 전단강도를 비교하였다. 현장 베인 시험의 경우 Kamei & Iwasaki (1995) 방법이 비교적 실험값과 일치하는 경향을 보이지만 전반적으로 Marchetti(1980)와 Kamei & Iwasaki (1995) 방법 모두 분산이 크고 일관성이 결여된 결과를 도출하는 경향을 보인다. 또한 이들 방법들은 모두 OCR- K_D 간의 상관관계와 σ_v' 를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하고 있으므로 단위중량 평가와 OCR- K_D 간의 상관관계에 의해 큰 영향을 받을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Marchetti가 제안한 지수가 아닌 DMT 시험 자료인 p_0 , p_1 , p_2 를 직접 이용하여 대상 지반의 다양한 공학적 특성을 포함할 수 있도록 인공신경망 모델을 구축하였다. 이는 기존에 제안된 통계적 회귀분석 모델에 포함된 오류나 현장 지반 조건의 다양성 등으로 발생하는 경험적 상관관계의 오차 등을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 총 26개의 자료 중 19개의 학습자료와 7개의 검증자료를 구분하여 인공신경망 모델을 구축하고 검증하였으며 기존에 제안된 상관관계식으로부터 얻어진 비배수 전단강도와 비교하였을 때

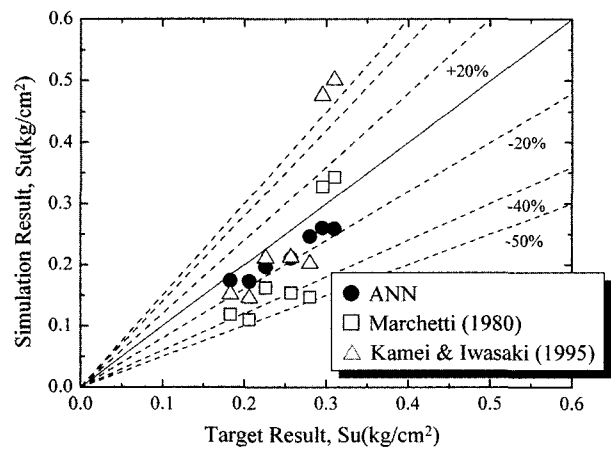


그림 12. 기존 식 결과와의 비교

신뢰성 있는 결과를 제공하는 것을 알 수 있었다. 이는 제안된 인공신경망 모델이 현장 지반 조건의 다양성과 입력된 자료의 부적절성까지 학습할 수 있으므로 기존의 경험적인 상관관계보다 높은 신뢰성을 제공할 수 있기 때문에 사료된다.

추후 국내 지반에 대한 보다 많은 실험 자료가 추가 될 경우 기존의 인공신경망 모델을 재학습함으로써 손쉽게 수정할 수 있으며 이로부터 국내 지반에 보다 적합한 모델을 구축할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설연구센터(생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김영상 (2003), "피에조콘을 이용한 점토의 비배수전단강도 추정에서의 인공신경망 이론 적용", 한국지반공학회논문집, 제 19권, 4호, pp.287-298.
2. 김영상, 변위용, 이승래 (2003), "DMT를 활용한 국내 연약지반의 구속압축계수와 비배수 전단강도의 평가", 한국지반공학회 연약지반기술위원회 2003 학술세미나, pp.33-45.
3. 김운태 (1991), Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질 추정에 관한 연구, 석사학위논문, KAIST, pp.19-20.
4. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), "인공신경망 모델을 이용한 불포화도 겔보기점착력 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제22권, 제3-C호, pp.331-344.
5. Demuth, H. B. and Beale. M. (2000), *Neural Network Toolbox for use with Matlab*.
6. Goh, A.T.C. (1994), "Seismic liquefaction potential assessed by neural-networks", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.9, pp.1467-1480.
7. Kamei, T. & Iwasaki, K. (1995), "Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a flat dilatometer", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, June, pp.111-116.
8. Lacasse, S. and Lunne, T., (1988), "Calibration of Dilatometer Correlations", Penetration Testing 1988, (Proceedings, ISOPT-1, Orlando), Vol.1, Balkema, Rotterdam, pp.539-548.
9. Ladd, C.C., Foot, R., Ishihara, K., Poulos, H.G. and Schlosser, F. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", *Proc. 9th ICSMFE*, Vol.2, State-of-the-Art-Paper, pp.421-494.
10. Larsson, R. and Eskilson, S. (1989), "Dilatometerforsok I organisk jord", Report No.258, Swedish Geotechnical Institute, Linkoping, pp.1-78.
11. Marchetti, S. (1979), "The In-Situ Determination of an Extended Overconsolidation Ratio", *Proceedings, 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, Brighton, U.K., pp.239-244.
12. Marchetti, S. (1980). "In situ tests by flat dilatometer". *ASCE Jnl GED*, Vol.106, No.GT3, Mar., 299-321.
13. Marchetti, S. and Crapps, D. K. (1981), "Flat dilatometer manual," GPE Inc., Gainesville, FL.
14. Marchetti S., Monaco P., Totani G. & Calabrese M. (2001), "The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations" A Report by the ISSMGE Committee TC 16. Proc. IN SITU 2001, Intl. Conf. On In Situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia, May 2001, 1-41.
15. Mayne, P.W. and Martin, G.K. (1998), "Commentary on Marchetti Flat Dilatometer Correlations in Soils", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.21, No.3, September 1998, pp.222-239.
16. Mesri, G. (1975), Discussion of "New design procedure for stability of soft clays," by Ladd, C.C. and Foot, R., *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.GT4, pp.409-412.
17. Roque, R., Janbu, N., and Senneset, K. (1988), "Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests", Penetration Testing 1988, (Proceedings, ISOPT-1, Orlando), Vol.1, Balkema, Rotterdam, pp.577-587.
18. Schmetmann and Crapps, inc. (1988), "Guideline Summary for Using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design", Rept. No.FHWA-PA-87-014+84-24 Submitted to PennDot, Office of Research and Special Studies, Harrisburg, PA, Feb., in 4 volumes with the three below concerning primarily the DMT.
19. Su, P.C., Chen, Y.C., Sun, C.Y., and Wang, G.S. (1993), "The Flat Dilatometer Tests in Clay", *Proceedings 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp.205-210.
20. Toll, D. (1996), "Artificial Intelligence applications in geotechnical engineering", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Premiere Issue.
21. Yu, H.S., Carter, J.P., and Booker, J.R. (1993), "Analysis of the Dilatometer Test in Undrained Clay", *Predictive Soil Mechanics*, Thomas Telford, London, pp.783-795.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)