

심층혼합처리된 개량토의 일축압축강도 추정을 위한 인공신경망의 적용 Application of Artificial Neural Network Theory for Evaluation of Unconfined Compression Strength of Deep Cement Mixing Treated Soil

김영상¹⁾, Young-Sang Kim, 정현철²⁾, Hyun-Chel Jeong, 허정원¹⁾, Jung-Won Huh,
정경환³⁾, Gyeong-Hwan Jeong

¹⁾ 국립여수대학교 해양공학전공 조교수, Assistant Professor, Division of Ocean Engrg., Yosu National University

²⁾ 국립여수대학교 해양공학전공 석사과정, Graduate Student, Division of Ocean Engrg., Yosu National University

³⁾ (주)동아지질 대표이사, Representative Director, Dong-A Geotechnical Engrg. Co., LTD

SYNOPSIS : In this paper an artificial neural network model is developed to estimate the unconfined compression strength of Deep Cement Mixing(DCM) treated soil. A database which consists of a number of unconfined compression test result compiled from 9 clay sites is used to train and test of the artificial neural network model. Developed neural network model requires water content of soil, unit weight of soil, passing percent of #200 sieve, weight of cement, w-c ratio as input variables. It is found that the developed artificial neural network model can predict more precise and reliable unconfined compression strength than the conventional empirical models.

Key words : Deep cement mixing, Unconfined compression strength, Artificial neural network model

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서는 해안을 개발하여야 할 필요성이 높아 최근 해안개발을 통한 공업단지, 컨테이너 부두건설 등의 건설이 활발히 진행되고 있다. 해안매립을 통한 개발과정에서 연약지반에 대한 안정처리가 주된 관건으로 떠오르고 있으며, 최근 연약지반에 건설되는 구조물의 기초 안정성 확보와 침하대책의 일환으로 심층혼합처리공법(Deep Cement Method)의 사용이 증가하고 있다. 심층혼합처리공법에 의한 지반개량 설계 시에는 시멘트-흙 시스템을 지중구조물로 고려하여 내적·외적 안정성을 평가하며 설계의 가장 중요한 변수로는 시멘트와 혼합되어 개량된 시멘트-흙 개량토의 일축압축강도(q_{uf})이다. 그러나 혼합처리된 개량토는 시멘트와 점성토의 화학반응에 의존하기 때문에 일축압축강도가 종래의 역학적 개량지반에 비하여 함수비, 안정재의 종류, 물-시멘트비, 재령 등의 다양한 요소들이 서로 복잡하게 영향을 받는다.

본 연구에서는 국내에서 시공되어 온 DCM공법 시공사례 중 실내배합시험 조건과 강도시험 결과, 타설 후 현장 개량체에서 시료채취를 통하여 확인된 현장 일축압축강도 등을 database화 하였다. 이와 같이 database화 된 자료들은 원지반 및 안정재의 특성과 기타 설계조건으로부터 개량체의 일축압축강도를 예측하기 위한 인공신경망 모델구축에 활용되었다. 개발된 인공신경망 모델은 개량체 일축압축강도의 영향변수에 대한 국내·외의 예측식과의 비교를 통하여 모델의 신뢰성이 검토되었다.

2. 개량체 강도의 영향 변수 및 일축압축강도

본 연구에서 다루고 있는 DCM(deep cement mixing)은 시멘트슬러리를 현장의 연약한 점성토지반과 혼합하여 짧은 시간에 소요의 강도를 얻을 수 있는 공법이다. 육상시공으로 국내에 처음 도입된 것은 80년대 초로, 도입된 후로 해상현장의 경우 현재까지 광양, 창원, 부산, 진해, 여수 등 10개소 이상의 적용사례가 있다(양태선 등, 2000). 80년대 후반에서부터 현재까지 국내 대학 및 연구소를 중심으로 영향요소의 평가, 새로운 공법의 개발(유찬 등, 1997) 등에 관한 연구들이 이루어져 왔으며, 최근 연구들로는 흙-시멘트 개량토의 화학·물리적 특성 및 역학특성에 관한 기초연구(박성재, 1986; 신방웅 등, 1998; 대한주택공사, 1989), 혼합처리토의 최적배합에 관한 연구(천명식 등, 2000), 심층혼합처리공법에서의 설계기준강도 및 변형계수 도출에 관한 연구(양태선 등, 2000) 등이 주로 이루어져 왔다. 현재 국내에서 이루어진 연구들은 구조물기초설계기준(한국지반공학회, 2003)의 테두리 내에서 대부분 이루어졌다.

시멘트-흙 개량토의 현장 일축압축강도에 영향을 미치는 요소로는 크게 ① 대상토의 성질(점토광물의 종류, 이온교환능력, 유기물함유량, 흙과 간극수의 pH, 입도조성, 함수비, 액성한계와 소성한계 등) ② 혼합처리의 조건(안정재의 종류, 안정재의 품질, 첨가량, 재령, 혼합비 등) ③ 양생환경(온도, 습도) 등이 있다. 심층 혼합처리와 관련된 기존 연구결과들을 종합하면 재령이 길수록, 시멘트의 첨가량이 많을수록, 혼합의 비율이 높을수록, 원지반 점성토의 함수비가 낮을수록 개량토의 강도는 증가하는 것으로 보고되고 있으나 각 요인의 영향을 정량화하기는 매우 곤란하다. 따라서 혼합처리된 개량지반의 설계를 위해서는 실제 대상으로 하는 흙에 시멘트를 혼합하여 공시체를 제작하고 실내에서 일축압축강도를 구하는 방법이 가장 현실적이나 전술한 바와 같이 혼합방법과 양생환경에 따라서도 그 강도가 달라지기 때문에 실내에서 얻어진 실내 배합설계 결과와 동일하게 현장타설을 실시하더라도 현장에서 얻어지는 개량토의 일축압축강도에는 일정한 평균(mean)과 분산(deviation)이 반드시 존재한다.(허정원 등, 2005)

현재 국내에서 수행되는 심층혼합처리공법의 설계에서는 개량체의 내부안정 검토의 기준이 되는 허용 압축응력 σ_{ca} 를 현장일축압축강도 q_{uf} 의 평균값(mean)으로부터 다음 식(1)과 같이 결정하고 있으며 현장 일축압축강도는 실내배합 설계에서 얻어진 일축압축강도 q_{ul} 로부터 식(2)에 의하여 얻어진다.

$$\sigma_{ca} = \frac{1}{F} (\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot q_{uf}) \quad (1)$$

여기서, σ_{ca} : 허용압축응력(KN/m²), F: 안전율, α : 단면유효계수, β : 중첩부분의 신뢰도, γ : 현장강도계수, q_{uf} : 현장 처리토의 일축압축강도의 평균치(KN/m²)

$$q_{uf} = \lambda \cdot q_{ul} \quad (2)$$

여기서, λ 값은 통상 육상공사에서는 1/2, 해상공사중 대형기계에 의한 개량공사에서는 1을 사용하는 경우가 많다. 또한, 해상에서 소형기계를 사용하는 경우에는 육상공사를 기준으로 λ 값을 설정한다.

식(1)에서 현장에 타설된 개량토의 일축압축강도의 분산을 고려하기 위하여 현장강도계수 γ 를 도입하고 있으며 해상공사의 경우 2/3, 육상공사의 경우 1/2를 일괄적으로 적용하고 있다. 이외에도 식(1)에 포함되어 있는 안전율 F는 크리프, 반복재하의 영향을 고려함과 동시에 구조물의 중요성, 하중의 종류, 설계방법의 산정 및 재료의 신뢰성을 고려하여 적절한 값을 선정하도록 하고 있으며 상시의 경우 3.0, 지진 시에는 2.0을 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 계수들은 다분히 경험적 판단에 기초한 것이며 전술한 바와 같은 다양한 요인에 의해 발생된 개량토의 강도에 대한 변동성과 분산을 고려하기에는 과도한 단순화로 인한 많은 불확실성이 포함되어 있다. 한편 현장처리토의 일축압축강도는 실내 배합시험에 의한 일축압축강도(q_{ul})는 식(2)와 같은 관계를 가지며 해상에서 대형장비를 사용한 경우 q_{uf} 와 q_{ul} 은 동일하다. 일본건축센터(1998)에서는 실내배합된 개량토의 일축압축강도 예측을 위해서 다음 표1과 같은

경험식들을 제안하고 있다.

표 1. 실내배합 28일 강도 $\bar{q}_{u/28}$ 의 추정식

토질	식 (E-1) (고화재 첨가량 C와 건조밀도 ρ_t 에 의함) $\bar{q}_{uc1} (\text{MN/m}^3)$, C (kg/m^3), ρ_d (t/m^3)	식 (E-2) (고화재/물비 C/ W_r 에 의함) $\bar{q}_{uc2} (\text{MN/m}^3)$, C (kg/m^3), W_T (kg/m^3)
유기 질토	$\bar{q}_{uc1} = (0.0067C + 0.032)\rho_d + (0.0045C - 0.98)$	$\bar{q}_{uc2} = 11.7(C/W_T) - 2.02$
고유기 질토	$\bar{q}_{uc1} = (0.01C - 0.67)\rho_d + (0.0033C - 0.67)$	$\bar{q}_{uc2} = 11.0(C/W_T) - 1.86$
		$W \geq 400\% \quad \bar{q}_{uc2} = 2.58(C/W_T) - 0.21$
垆	$\bar{q}_{uc1} = (0.0037C + 0.88)\rho_d + (0.015C - 3.09)$	$\bar{q}_{uc2} = 15.1(C/W_T) - 2.40$
점성토	$\bar{q}_{uc1} = (-0.0045C + 2.53)\rho_d + (0.019C - 3.05)$	$\bar{q}_{uc2} = 11.4(C/W_T) - 0.45$
사질토	$\bar{q}_{uc1} = (0.027C - 3.74)\rho_d + (-0.013C + 3.06)$	$W < 20\% \quad \bar{q}_{uc2} = 7.37(C/W_T) - 0.49$
		$W \geq 20\% \quad \bar{q}_{uc2} = 14.4(C/W_T) - 1.67$

여기서, \bar{q}_{uc1} , \bar{q}_{uc2} : 기준자료를 근거로 유도된 실내배합 재령 28일 강도 추정식, C: 고화재 첨가량, ρ_d : 건조밀도, W_T 는 원지반 흙 1m³당의 총 수량 [$W_T = W + 1000\rho_t \{w/(1+w)\}$], w: 함수비

표 1은 일본건축센터에서 개량체 일축압축강도를 예측하기 위해 제안된 경험식으로 토질종류에 따라 다르며 본 연구에서는 점성토에 대한 식(E-1)과 식(E-2)을 인공신경망 모델 예측 결과와 비교하는데 이용하였다.

3. 개량토의 28일 일축압축강도 추정을 위한 인공신경망 모델

3.1 대상지역

본 연구에 사용된 자료는 그림 1의 지역에서 시공된 실내배합조건에 따른 개량체의 일축압축강도 145개이며, 대상지역에 대한 물리적 특성을 살펴보면 표 2에 정리된 바와 같이 액성한계는 44.4%~84.6%, 소성한계는 20%~53.5%, #200 통과량은 80%~98%, 함수비는 52.1%~96.67%의 범위를 보이며 통일분류법상 토질 분류는 울산남방파제 일부를 제외하고 CH가 주를 이루고 있다.



그림 1. 대상지역

표 2. 대상지역의 물리적 특성 및 사용 data

지역	액성한계(%)	소성한계(%)	#200 통과량(%)	함수비(%)	USCS	사용 data
가덕도	66.3	22.9	95	60.3	CH	11
여수항	74.6	26.6	85	77.0	CH	25
부산부두	61.6	23.6	80	52.1	CH	24
부산신항	66.8	26.3	97	58.89	CH	12
부산신항 남컨 2-3단계	55.7	22.3	91	57.09	CH	17
부산신항 남컨 2-4단계	65.8	24.3	94	59	CH	8
울산남방파제 (CH)	84.6	53.5	89	96.67	CH	21
울산남방파제 (ML)	57.4	32.5	90	83.01	MH	21
대불부두	44.4	20	98	52.41	CL	6

3.2 인공신경망 이론과 최적모델

인공신경망 이론은 인간의 뇌구조에서 학습되고 축적되는 기존 지식의 운용체계를 모사한 컴퓨터 모델로 최근 지반공학 분야에서도 다양한 문제에 적용되고 있다. 본 연구에서도 그림 2와 같은 모델을 통하여 개량체의 일축압축강도를 예측하였다.

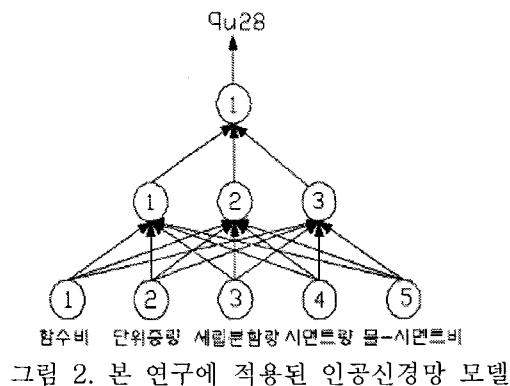


그림 2. 본 연구에 적용된 인공신경망 모델

구축된 인공신경망 모델은 기존 상관관계식을 정리하여 개량체의 일축압축강도에 큰 영향을 미치는 영향 인자를 찾았으며, 그림과 같이 원자반의 함수비, 단위증량, 세립분합량, 시멘트량, 물-시멘트비의 5가지 입력변수를 선정할 수 있었다. 인공신경망 모델의 구축과정은 크게 두 단계 또는 세 단계로 나눌 수 있으며, 먼저 기지의 입력과 결과값을 이용하여 그림 2와 같이 각 층에 존재하는 뉴런간의 연결강도를 조정하는 훈련단계(training phase)로 이 과정을 통하여 신경망 모델은 주어진 자료들을 일반화할 수 있는 최적의 연결강도를 스스로 학습(learning)하게 된다. 다음은 훈련과정을 통하여 구축된 모델을 이용하여 학습에 사용되지 않은 기지의 결과값을 가지는 입력값을 이용하여 학습된 네트워크의 정확성을 평가하는 단계(testing phase)이다. 마지막으로 학습과 훈련과정을 통하여 최적으로 구성된 모델에 미지의 자료(validation data)를 적용하여 예측을 수행한다.

표 3. 데이터의 구분

구분	비율(%)	개수
Training data	70	101
Testing data	20	29
Validation data	10	15

전체 자료중 인공신경망 구축에 있어서 훈련(training)과 예측(testing) 및 신경망 모델의 정확성 평가(validation)를 위하여 전체 자료를 각각 70%, 20%, 10%의 비율로 구분하였으며 입력변수로 사용된 5개의 요인(함수비, 단위중량, 세립분 함량, 시멘트량, 물-시멘트비)중 가장 큰 변화요소인 사용 시멘트량 및 물-시멘트비의 통계특성을 표4에 정리 하였다.

표 4. 데이터의 통계특성

구분	Training data		Testing data		Validation data	
	시멘트량	물-시멘트비	시멘트량	물-시멘트비	시멘트량	물-시멘트비
Max.	24.67	2.0	23.75	1.3	22.11	1.33
Min.	5.99	0.6	6.03	0.6	12.18	0.7
Mean.	18.28	0.9	18.07	0.8	18.9	0.87
S · D.	4.49	0.2	5.01	0.15	2.59	0.16

최적 인공신경망 구축을 위하여 전달함수로는 Logsig, Tansig, Linear함수를 다양한 형태로 조합하여 사용하였으며, 각 모델에서 최적의 예측능력을 보이는 뉴런의 수를 찾고, 뉴런수에 바탕으로 각 모델에서 얻어진 예측결과를 비교하였다. 각 모델 비교에서 Tansig-Linear 모델이 가장 최적화된 결과를 보였으며, 최적 뉴런 수 결정(그림3)을 통해 Tansig(3)-Linear Model의 개량체 일축압축강도 예측 결과를 그림4에 나타내었다.

표 5. 경험식들과 인공신경망의 예측결과 비교

모델	결정계수(R^2)		
	Training data	Testing data	Validation data
ANN	0.73	0.63	0.51
식(E-1)	0.19	0.30	0.004
식(E-2)	0.16	0.29	0.014

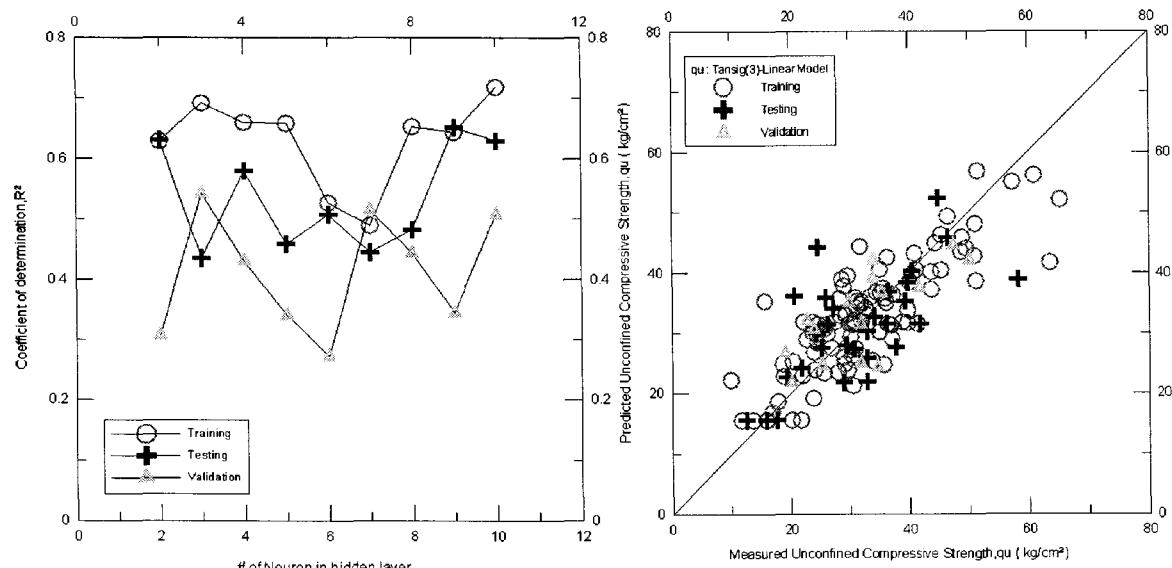


그림 3. 은닉층 뉴런수에 따른 예측 결정계수

그림 4. Tansig(3)-Linear Model의 예측 일축압축강도 비교

그림 4에서 실내배합 조건에 따른 일축압축강도와 인공신경망 모델을 통해 예측된 일축압축강도를 비교한 결과 training data, testing data, validation data의 분포형태 및 분산이 고르게 나타났으며 결정계

수 값은 각각 0.73, 0.63, 0.51이였다. 한편 경험식 (E-1)과 (E-2)를 이용한 예측에 대한 결정계수 값은 인공신경망을 통한 결과보다 현저히 낮았으며 전체적으로 0.3이하의 값을 보였다. 따라서 일축압축 강도 예측에 있어서 기존 경험식보다 인공신경망을 통한 결과가 더 정확성을 보인다는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 연구를 통한 모델의 예측 결정값이 개선의 여지 있다고 판단되어지는바 최종 모델 구축과 관련하여 영향인자에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 국내 해안지역의 DCM 시공사례가 있는 9개 지역에서 실시된 DCM 실내배합시험 결과와 일축압축강도 자료를 database로하여 인공신경망이론을 적용하여 개량체의 일축압축강도를 예측하는 최적의 신경망 구조를 도출하였다. 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 기존 이론식을 바탕으로 개량체의 일축압축강도에 중요한 영향요소 중 원지반의 함수비, 단위중량, 세립분 함량, 시멘트량, 물-시멘트비를 입력변수한 인공신경망 모델 구축하였다.
2. 9개 지역의 실내배합 조건에 따른 개량체의 일축압축강도 145개의 값을 database화 하였으며, 인공신경망 모델 구축을 위하여 전체 자료를 training, testing, validation별로 70%, 20%, 10%로 구분하여 각각 101개, 29개, 15개를 사용하였다.
3. 구축된 인공신경망 모델을 기존의 경험식에 비해 예측 정도가 뛰어나며 예측에 대한 분산이 크지 않아 신뢰성이 높을 것으로 판단된다.
4. 현재 최적모델 구축과 영향인자를 위한 검토연구가 진행중에 있다.

참 고 문 헌

1. 대한주택공사(1989), “고화안정처리에 의한 지반개량공법 연구”
2. 도덕현, 공길용, 오창목, 유찬(1995), “고화제를 이용한 천층 및 심층혼합처리공법의 현지 적용성에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp.1003~1013
3. 박성재(1986), “심층혼합처리공법”, 한국지반공학회 학술발표회 강연집
4. 박옥주, 허정원, 김영상(2005), “심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 외적안정성에 대한 신뢰성해석”, 대한토목학회학술발표대회
5. 신방웅, 정태욱, 이중범, 조상윤, 이재영(1998), “시멘트 개량액으로 보강된 해성점토지반의 심층혼합 공법에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회(Ⅱ), pp.265~268
6. 양태선, 정경환, 여봉구, 이상수(2000), “심층혼합처리공법에서 설계기준강도와 변형계수에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회논문집(Ⅱ), pp.615~618
7. 유찬, 도덕현, 한우선(1997), “DWM 심층혼합처리공법의 연약층 개량효과에 대한 고찰”, 한국지반공학회 봄학술발표회논문집, pp.147~152
8. 유찬, 장병욱, 이창노, 노광하(1999), “배합조건에 따른 고결사질토의 강도특성”, 한국지반공학회 연약지반처리위원회, pp.84~95
9. (주) 동아지질(2004), “시멘트계 심층혼합처리공법의 설계와 시공 메뉴얼”
10. (주) 동아지질(2004), “시멘트계 심층혼합처리공법의 적용을 위한 기술 검토 보고서”.
11. 천병식, 김진춘, 최현석(2000), “연약지반 표층안정처리를 위한 고화재의 최적조합 산정에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회논문집, pp.17~24
12. 천병식, 임해식, 전진규(2004), “시멘트계 고화재에 의해 혼합처리된 지반의 설계정수에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 16권, 제 2호, pp.79~89
13. 한국지반공학회(2003), “건설교통부제정 구조물기초설계기준 해설”