

연약지반 최종침하량의 설계 적용성에 관한 사례연구

Cast study on the Design Application of Final Settlement in Soft Ground

김영수¹⁾, Young-Su Kim, 박시범²⁾, See-Boum Park, 김경태³⁾, Kyung-Tae Kim, 김창현⁴⁾, Chang-Hyun Kim, 김현구⁴⁾, Hyun-Gu Kim, 육일동⁵⁾, Il-Dong Yook, 김홍곤⁶⁾, Hung-Gon Kim

¹⁾ 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University

²⁾ (주)한국종합기술개발공사 도로공항부 대리, Korea Engineering Consultants Corp

³⁾ (주)한국종합기술개발공사 도로공항부 과장, Korea Engineering Consultants Corp

⁴⁾ (주)한국종합기술개발공사 도로공항부 부장, Korea Engineering Consultants Corp

⁵⁾ 한진중공업(주) 건설부문 토목사업부 과장, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd

⁶⁾ 한진중공업(주) 건설부문 토목사업부 차장, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd

SYNOPSIS : In this case of study, Incheon International Airport 2nd phase site preparation 1st section estimated final settlement to improve soft ground. Final settlement is very important in preloading method. Recently, Hyperbolic method, Hoshino method and Asaoka method are used mostly in prediction of final settlement and this paper, Comparing a result of Final settlement, used to Artificial Neural Network.

The structure of Dynamic Artificial Neural Network which predicted Final settlement, has application to Young_Jong Island other site, If new investigation data will be added. Also, It is expected to save measuring_system cost in soft ground.

Key words : Incheon International Airport 2nd phase, Artificial Neural Network, Final Settlement

1. 서 론

최근 국책 프로젝트 및 민간자본투자에 의한 해안지역의 개발이 두드러지고 있으며, 그 규모 또한 대형화 되고 있는 실정이다. 이러한 개발과 더불어 연약지반의 개량공사 또한 필수적인 요소로 부각되고 있다.

연약지반에 상재하중(ΔP)이 작용하면 지반의 간극비 및 간극수압의 변화로 압밀침하가 발생된다. 연약점토지반의 경우 장기적인 침하거동이 예상되며, 합리적인 지반개량 설계 및 지속적인 계측관리가 요구된다. 이러한 연약지반 개량공사를 시행함에 있어 최근들어 많이 도입되는 공법으로 상재하중을 재하하는 방법을 시공현장에서 성공적으로 적용한 사례가 많이 보고되고 있다.(Johnson, 1970).

본 사례 연구는 인천국제공항 2단계 건설 부지조성중 제○공구 공사 관련하여 연약지반 개량공법의 시공 유지관리 시에 필요한 최종침하량 산정에 있어 실내물성시험 및 지반조사시험 결과를 이용한 인공신경망(Artificial Neural Network)에 의한 최종침하량 예측결과와 계측데이터를 이용한 전통적인 최종침하량 추정방법인 쌍곡선법(Hyperbolic Method), Hoshino법, Asaoka법 등과 설계시의 Terzaghi 일차원 압밀침하량 및 2차원 압밀해석 결과와의 비교/검토로, 성토하중과 시간경과에 따른 최종압밀침하량 예측이 가능한 최적의 신경망 구조를 결정하고, 그 결과의 적용성을 검증하는데 본 연구의 목적이 있다.

본 연구에서는 연약지반 압밀침하 거동특성을 예측하기 위한 최적의 인공신경망을 구성하였으며, 인공신경망의 적용은 정적 인공신경망 보다 은닉층(Hidden Layer) 또는 출력층에서 입력층으로 피드백(Feedback)과정이 있는 동적 인공신경망을 적용하여, 점성토 지반의 압밀침하 상태를 구현하였다.

본 연구결과의 연약지반 압밀침하량 예측시 적용된 인공신경망 구조를 영종도 인근지역 연약지반 공사에 적용하여, 일반적으로 약 70~80% 압밀진행 단계에서 계측에 의해 추정이 가능했던 최종침하량을 초기에 예측하여 설계단계에서의 현실적인 압밀침하량 산정으로 경제적인 설계와 시공중 연약지반 계측시 시공장비 등에 의한 계측기의 파손 및 누락 지점의 지속적인 예측관리가 가능할 것으로 판단되어 연약지반개량공사 유지관리시 경비절감의 효과도 있을 것으로 사료된다.

2. 계측에 의한 최종침하량 예측방법

연약지반 성토시공 초기부터 계측관리를 실시하고 Pre-loading완료 시점과 방치기간 등을 고려하여 시간-침하량 곡선을 설계시 압밀시험 값을 이용하여 계산한 예측침하-시간 곡선과의 침하경향분석 및 일치여부를 검증하므로써 시공관리를 한다. 그러나 실제의 측정결과가 압밀계산으로부터 구한 것과 완전히 일치하지 않으므로 압밀이론에 관계없이 실측침하 곡선에 적합한 곡선식을 도출하여 앞으로의 최종침하를 예측한다.

그 방법에는 쌍곡선법(Hyperbolic Method), Hoshino법 및 Asaoka법 등이 있으며, 각 기법의 내용은 다음과 같다.

2.1 쌍곡선법(Hyperbolic Method)

쌍곡선법은 시간의 경과에 따른 침하의 진행이 쌍곡선모양으로 감소한다는 가정을 기초로 성토종료후 침하량으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법으로서 침하예측 모델은 식(1)과 같다.

$$S_t = S_0 + \frac{t}{(\alpha + \beta t)} \quad (1)$$

여기서, S_t 는 성토종료후 경과시간 t 일때의 침하량(cm)

S_0 는 성토종료 직후의 침하량(cm)

t 는 성토종료 후부터 측정한 경과시간(day)

α, β 는 그림 1.로부터 구한계수

이 방법의 특징은 ①침하량내에 2차 압밀침하가 포함되어 있으므로 예측값과 실측값이 잘 대응한다. ②데이터의 처리가 간단하고 예측정도가 높으며 예측가능시기가 빠르다. ③추정한 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작으나, 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로 압밀도가 약 70% 이상에서는 오차범위 10%이내에서의 예측이 가능하다. ④시공완료후 장기간 방치한 시점의 침하량을 이용하여 한다.

2.2 Hoshino법

Hoshino법은 전단력에 의한 유동변형을 포함하여 전 침하가 시간의 평방근에 비례한다는 기본원리를 토대로 장래의 침하량을 예측하는 방법으로 \sqrt{t} 법이라고도 한다. 그 모델은 식(2)와 같다.

$$S_t = S_0 + S_d = S_0 + \frac{A \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{1 + K^2 \cdot t}} \quad (2)$$

여기서, S_t 는 성토종료후 경과시간 t 일때의 침하량(cm)

S_0 는 성토종료 직후의 침하량(cm),

t 는 성토종료 후부터 측정한 경과시간(day)

A, K 는 그림 1.로부터 구한계수

2.3 Asaoka법

Asaoka는 Mikasa의 1차원적 미분방정식을 이용하여 현장 침하 자료로부터 임의의 시점에서의 침하량을 구할 수 있는 도식적 방법을 제안 하였다.

1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 경우의 침하량을 나타내는 간편식으로 전 침하량을 구하며, 그 모델은 식(3)의 차분식과 같다.

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{(i-1)} \quad (3)$$

여기서, S_t 는 경과시간 t 를 이산화하여 $t_i = t \times i (i=1, 2, 3, \dots)$ 일때 시간 t_i 에서의 침하량(cm)

S_{i-1} 는 시간 $t_{i-1} = \Delta t \times (i-1)$ 일때의 침하량(cm)

β_0, β_1 은 실측침하량으로 구한계수

3. 설계단계에서의 압밀침하량 예측방법

연약지반 설계단계에서의 압밀침하량 산정은 Terzaghi의 1차원 압밀이론이나 유한변형 압밀이론을 이용하여 구하는 것이 일반적이다. 동일한 지반조건에 대하여 1차원 압밀이론에 의한 방법과 유한요소해석(FEM)을 실시하여 비교하였다.

3.1 일차원 압밀방정식에 의한 산정

Terzaghi의 일차원 압밀이론에 의한 침하량 산정은 침하의 메카니즘이 열전도형 방정식에 지배되어 간단한 경계조건에서는 정해를 구할 수가 있다. Terzaghi의 압밀이론에 의한 침하량 산정식은 정규압밀 점토일 경우에 다음 식(4)와 같다.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_o' + \Delta P'}{P_o'} \quad (4)$$

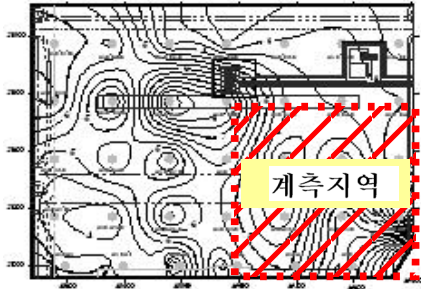
여기서, e_0 : 재하전의 초기간극비, C_c : 압축지수, H : 압밀층의 두께(m),

$\Delta P'$: 외부하중으로 발생된 점토층 중앙에서의 유효응력 증가량(kg/cm^2),

P_o' : 외부하중 작용전 점토층 중앙의 유효연직응력(kg/cm^2)

3.1.1 적용대상지반

1차원 압밀침하량 모델링 대상지반은 인천국제공항 2단계 건설 부지조성공사 제○공구 연약지반 개량 공사 지역이며, 이 지역의 지반특성은 항공기 운행지역으로 평균공용후 하중(ΔP)이 약 9.0t/m^2 이며 평균 연약층 심도는 약 6.0m이며, 상부지층은 1단계공사시 약 1.0m 내외의 준설토의 유입으로 SM 및 ML로 구성되어 있으며, 개량대상 연약지반은 N치는 5/30이하 실트섞인 점토로 구성되어 있다.



구분		적용현황
연약층 심도(m)		4.5 ~ 11.2
압축지수(c_c)		0.25
초기간극비(e_0)		0.96
압밀계수 (cm^2/sec)	C_v	2.45×10^{-3}
	C_h	3.50×10^{-3}
전단강도 (tf/m^2)	상부	1.1 ~ 1.6
	하부	2.3 ~ 3.5

그림 1. 적용 연약지반 분포현황 및 전체 지반특성

3.1.2 산정결과

설계단계에서 지반조사 및 실내시험결과를 이용하여 식(4)를 이용한 압밀침하량 산정 결과는 아래 표 1.과 같다.

표 1. 일차원 압밀방정식에 의한 침하량 산정결과

구분	연약층 심도 (m)	초기 유효응력 ($P_0, \text{tf/m}^2$)	공용후 하중(tf/m^2)						공용후침하량(cm)		
			$\Delta P1$ (항공기)	$\Delta P2$ (포장)	$\Delta P3$ (노상)	$\Delta P4$ (노체)	$\Delta P5$ (S/M)	ΔP (합계)	1차침 하량	2차침하 량	총 침하량
Project I	7.2	2.88	1.72	2.28	1.95	1.26	1.26	8.47	40.6	4.8	45.4
Project II	10.5	4.20	1.14	2.28	1.95	1.11	1.26	7.74	55.0	7.2	62.2
Project III	6.5	2.60	1.65	2.28	1.95	2.07	1.26	9.21	43.1	4.9	48.0

3.2 유한요소해석(FEM)에 의한 추정

유한요소해석에 의한 최종침하량 추정방법은 실제의 계축치를 기준으로 Parameter Study에 의한 역 해석(Back Analysis)이 가능하다. 본 연구에서는 시간-압밀침하량을 범용 유한요소해석 프로그램인 Crisp ver.4에 기본물성치를 이용하여 MCC모델(Modified Cam-Clay model)을 적용한 유한요소해석을 수행하였다.

3.2.1 유한요소해석 모델링

일차원 압밀침하량 산정지반과 동일한 지반에 대하여 모델링 하였으며, 유한요소 해석시 2차원 평면 변형률 조건으로 해석하였으며, 4절점 4각형 요소를 사용하였다. 경계조건은 하부 지지층 고정, 양측면은 수직 변위허용, 내부는 수직, 수평 변위 허용으로 설정하였으며, 배수조건은 일면배수로 하였다. 지하수위는 현장조건을 고려하여 원지반 상부까지 포화된 것으로 모델링 하였다. 본 해석에 적용된 모델도 및 성토후 연직변위는 그림 2.와 같고, 해석시 사용된 입력변수의 적용값은 표 2.와 같다.

표 2. 해석에 적용된 기본 물성값

입력변수	κ	λ	e_{cs}	M	v'	γ_{bulk} (kN/m ³)	k_o	σ_v' (kN/m ²)	σ_h' (kN/m ²)	p_c' (kN/m ²)
적용값	0.022~ 0.074	0.110~ 0.135	2.656~ 3.152	0.877~ 0.924	0.3	18.0~ 18.8	0.43	85.2~ 98.56	38.34~ 61.4	109.5~ 138.0

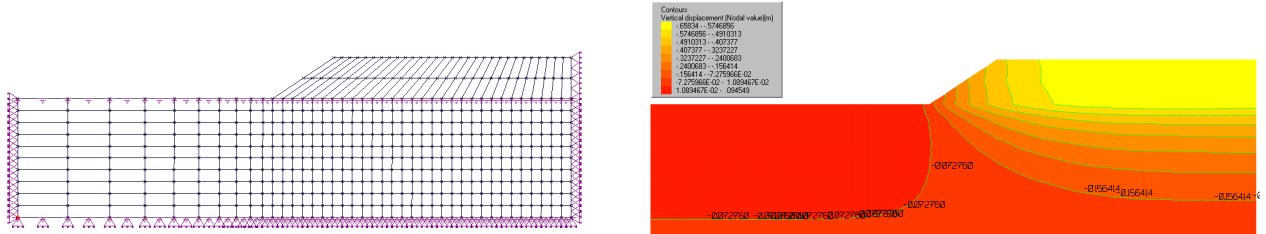


그림 2. 해석단면 모델도 및 성토후 Y-Displacement(Project II)

3.2.2 해석결과

2차원 압밀해석을 수행한 결과로 산정된 침하량은 다소 과대평가 되었으며, 각 47.71cm(Project I), 62.5cm(Project II), 50.3cm(Project III)의 결과를 얻을 수 있었다. 준설패립지반 및 퇴적환경 등의 지반 고유 이방성을 고려한 변위의 해석에 다소 한계가 있었으리라 판단된다.

4. 인공신경망에 의한 최종침하량 예측

4.1 개요

인공신경망은 인식이나 의사결정 등에 있어서 생물학적 신경세포의 특성을 모델링화 하여 프로그래밍 함으로, 뉴런이라 불리는 인간의 신경세포와 유사한 처리소자들의 병렬분산처리로 학습(Learning) 및 예측(Prediction)이 가능하다. 이러한 인공신경망의 특징은 각 신경세포가 완전히 독립적인 기능을 갖고 있어 병렬처리에 의한 연산속도가 빠르며, 무수히 많은 연결강도를 통한 정보의 분산표현 및 처리가 가능하다. 또한 지속적인 학습을 통하여 연결강도를 조정함으로써 새로운 정보를 추가하거나 변경할 수 있는 특징이 있다. 특히, 토목분야 중에서 대상재료의 특성상 많은 불확실성을 포함하고 있는 지반공학 분야에서 최근 들어 연구사례가 급증하고 있는 추세이다.

4.2 순환형 신경망(RNN)

인공신경망 모델의 출력형태는 정적개념의 순방향(Forward)구조와 동적특성을 가진 순환(Recurrent) 구조의 2가지로 구분할 수 있다. 시간경과에 따른 패턴인식에 더욱 효과적인 순환층을 가진 동적 신경망을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있으며 기존의 인공신경망보다 더욱 효과적임을 알 수 있다(Ellis et al 1992). 표 3.는 각 신경망의 특성을 나타내고 있다.

Elman Network 모델은 그림 3.에서와 같이 은닉층(Hidden Layer)의 출력값을 입력층으로 피드백(Feedback) 시키는 순환형태의 신경망 구조이며, 시간상 전단계 은닉층의 정보를 함축적으로 보유하고 있어 입력데이터의 동적특성 및 연속성을 구현할 수 있다. 신경망 내의 노드들은 활성화 기억 능력의 여부에 따라 은닉층은 동적노드로 구성되며 그 외의 입력, 출력층의 노드들은 정적노드로 구성된다.

표 3. 각 신경망의 특성

신경망 구조	특성 및 적용
BPNN (Back-Propagation Neural Network)	<ul style="list-style-type: none"> 가장 전형적인 신경망. 시간에 따라 변화하는 연속성을 구현하지 못함. 지반특성값이나 지반상수 등의 결정론적 변수추정에 적합. 신경망 학습에 많은 시간을 필요로 함.
RNN (Recurrent Neural Network)	<ul style="list-style-type: none"> 시간에 따라 변화하는 연속성을 구현할 수 있음. 은닉층의 출력값을 입력층으로 피드백(feedback) 함. 지반공학분야에서 지반재료의 응력-변형등과 같은 재료의 거동예측에 적합.

본 연구에서 사용된 인공신경망 구조는 Matlab toolbox를 이용하여 프로그램 되었으며, 최적의 신경망 설계를 위해 학습율과 모멘텀은 사용자의 주관적인 판단을 배제한, 자동적으로 초기화 수정되는 Adaptable 모델을 적용하여 보다 신속하며 상황에 따라 변화하여 적용되는 정확성을 확보하게 하였다.

4.3 인공신경망의 학습(Learning)결과

인공신경망 학습을 위하여 9개소의 자료를 선정하여 표 4.에서와 같이 물리시험, 역학시험, 현장조사 시험, 시공현황 등의 영향인자들을 정규화(Normalization)과정을 통하여 학습에 수행하였다.

표 4. 학습에 사용된 자료

입력변수	물리시험결과			역학시험결과		현장조사시험결과			시공현황	
	G_s	LL	PI	e_0	c_c	P_0	ΔP	연약층심도 (H_1)	재하일수 (day)	성토고 (H_2)
학습자료	2.68~	25.40~	3.30~	0.86~	0.17~	1.88~	8.20~	3.71~9.70	226~	6.0~
	2.71	37.60	18.60	0.96	0.26	3.88	9.72		289	6.8

본 연구에서는 은닉층을 1개로 적용하였으며, 은닉뉴런의 수는 10, 30의 2경우로 학습하였으며, 학습 반복횟수(Epochs)는 1×10^6 , 목표 오차값(Goal)은 0.005이하로 수렴하는 경우에 종료하도록 프로그램 되었다.

인공신경망 학습결과 그림 4.에서와 같이 10개의 은닉뉴런을 가지는 구조가 30개의 은닉뉴런을 가지는 인공신경망 구조보다 상관계수가 더 높게 나타났으며 학습속도 또한 우수한 것으로 나타났다.

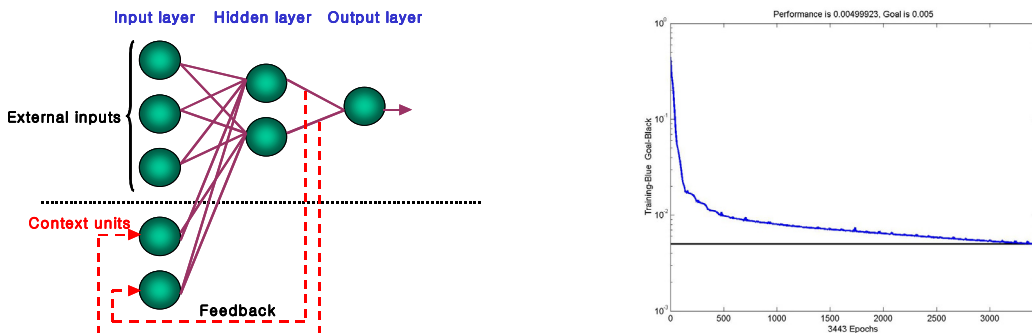


그림 3. Elman 모델 신경망 구조 및 학습 결과(Epochs & Goal)

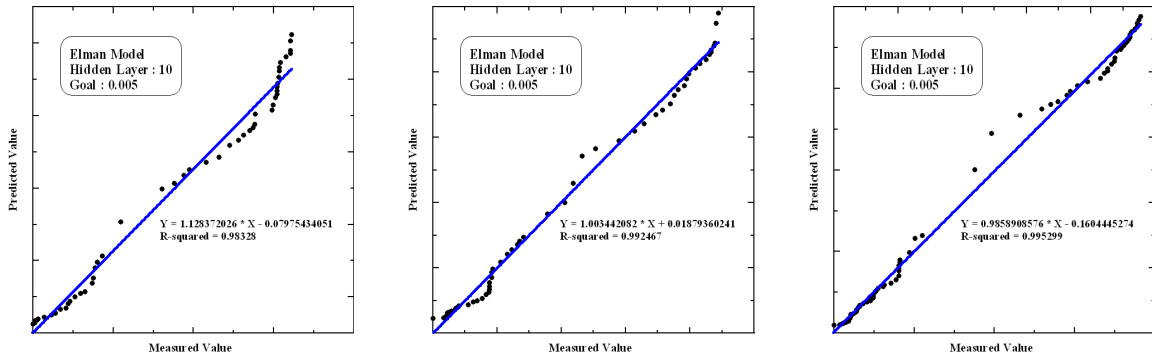


그림 4. 10개의 은닉뉴런을 가지는 인공신경망 학습결과(Project I, II, III)

4.4 최종침하량 예측(Prediction)

인공신경망을 통한 최종침하량 예측은 총 12개소의 계측 및 지반조사시험자료 중 9개소의 학습을 통하여 3개소(Project I, II, III)를 예측하였으며, 그림 4.와 같이 비교적 침하패턴이 유사하게 나타났다. 실측값의 다른 최종침하량 예측값과 비교 분석함으로써 적용성과 효용성을 판단 할 수 있다.

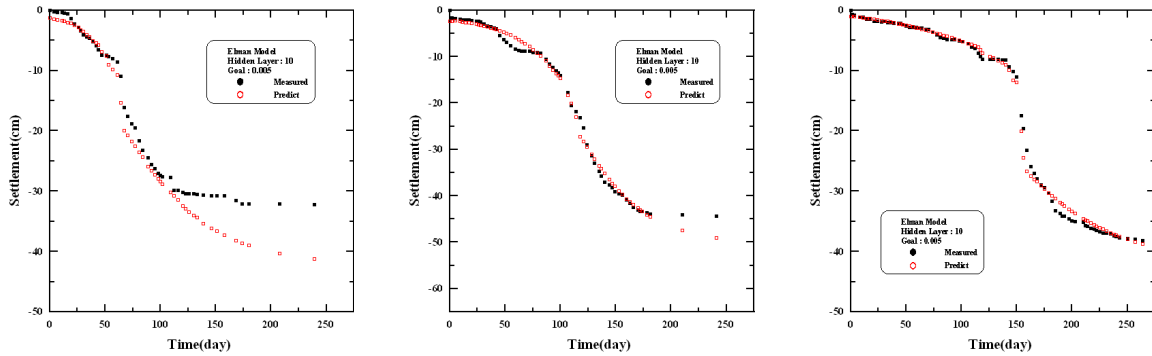


그림 5. 10개의 은닉뉴런을 가지는 인공신경망의 예측결과(Project I, II, III)

5. 최종침하량 산정 결과분석

연약지반 최종침하량 산정에 있어 설계단계에서의 1차원 압밀침하에 의한 계산, 유한요소해석에 의한 2차원 해석방법, 시공중 계측자료에 의한 쌍곡선법 등의 최종침하량 결과와 지반조사시험 및 초기 계측 자료를 이용하여 인공신경망에 의해 예측된 최종침하량을 비교하면 그림 6.과 같다.

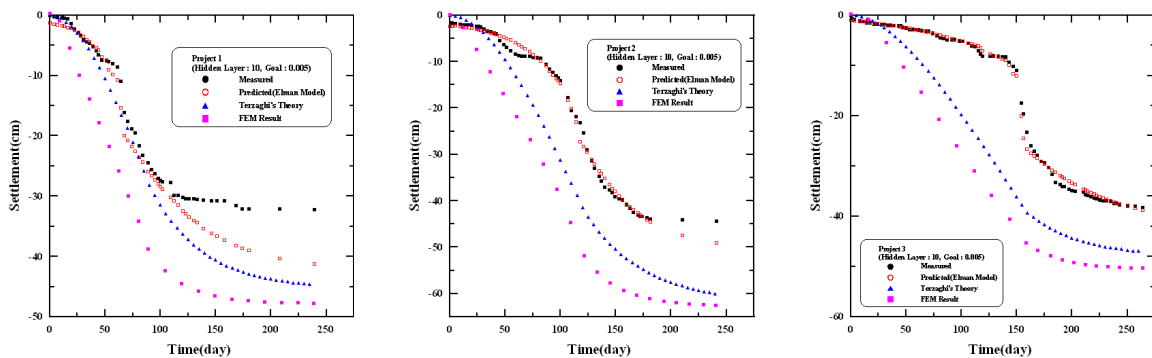


그림 6. 연약지반 압밀침하의 최종침하량 예측결과 비교(Project I, II, III)

각기 다른 방식으로 최종침하량 산정결과 3가지 경우 모두 초기 계측자료 및 지반조사시험결과를 학습한 Elman Model의 인공신경망 예측결과 값이 실측자료와 유사한 침하경향 및 최종침하량 값을 가지는 것으로 나타났으며, Terzaghi 일차원 압밀침하 및 2차원 유한요소해석(FEM) 결과 값은 다소 과대평가 되었다.

표 5. 최종침하량 산정결과 비교

구분	시공중 현장계측(cm)			설계시 계산(cm)		인공신경망예측 (cm)
	Hyperbolic법	Hoshino법	Asaoka법	Terzaghi's	FEM	
Project I	32.2	32.296	32.23	45.4	47.71	41.184
Project II	45.0	46.6	44.72	62.2	62.5	49.053
Project III	39.8	42.8	39.1	48.0	50.3	38.788

6. 결론

인천국제공항 2단계 건설 연약지반 개량공사 구간을 대상으로 지반조사시험 및 계측자료의 학습을 통하여 인공신경망을 이용한 최종침하량을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최종침하량 예측을 위한 최적의 신경망 구조결정시 Elman Model에 대하여 10개의 은닉뉴런수와 목표 오차값 0.005를 적용하였을때 98%이상의 높은 상관성을 보였다.
2. 인공신경망에 의한 예측결과 설계단계에서 Terzaghi Method, FEM해석보다 실측값에 근접함을 보여 설계시에도 최종침하량의 합리적 예측이 가능할 것으로 기대된다.
3. 연약지반 유지관리시 최종침하량 추정법(쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법)과 같이 도해적인 해석을 이용하는 것이 아니라 기존자료의 학습에 의해 예측됨으로 기율기의 부분적인 변화에 동요하지 않고 예측이 가능하리라 기대된다.

본 연구에서 제안된 인공신경망 구조는 연약지반 압밀침하 경향 및 최종침하량의 예측능력이 우수하며, 향후, 다수의 연약지반 조사시험결과 및 초기 계측데이터 등의 학습을 통하여 영종도 인근지역의 연약지반 개량공사시 설계단계에서 보다 합리적인 최종침하량 예측이 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김대수(1992), “신경망의 이론과 응용(I)”, 하이테크정보.
2. 김병탁(2000), “비균질 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구”, 박사학위논문, 경북대학교.
3. 김영수, 정성관, 이상웅, 이동현(2003), “인공신경망을 이용한 현장지반의 장래 침하량 산정”, **한국지반공학회논문집**, 제19권, 5호 pp.27~33.
4. 김영수, 박시범, 김현구, 이종구, 성기광, 김영웅(2003), “인공신경망을 이용한 토량환산계수의 적용 사례”, **대한토목학회 정기학술대회**, pp.3728~3733.
5. 인천국제공항 부지조성공사 연약지반처리 계측관리 용역(1997), “종합보고서”.
6. 인천국제공항 2단계 건설 부지조성공사 기본 및 실시설계용역(2002-2003), “지반조사보고서”.
7. Ellis, G.W., Yao, C., and Zhao, R.(1992), "Neural Network modeling of the mechanical behavior of sand", *Proc., 9th Conf., ASCE Engrg. Mech.*, ASCE, New York, N.Y., pp.421~424.
8. Jeffery, L, Elman.(1990), "Finding structure in time", *Cognitive* 14, pp.179~211.
9. Johnson, S. J.(1963), Precompression for Improving Foundation Soils, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 89, no. SM2, pp.115~143.