

현장 계측 결과와 시공단계를 고려한 역해석기법을 이용한 연약지반의 특성값 재산정에 관한 연구

A Verification for Determination of Soil Properties Using Field Measurement and Back Analysis

이규진* · 이상조† · 윤형석**

Lee, Kyujin* · Lee, Sangjo† · Yoon, Hyeongsuk**

Abstract

□□A primary factor affecting on the design of soft ground is to determine the soil properties (Compression index, Coefficient of consolidation) and the depth of soft ground. It could be the basic sources to estimate settlement behavior of soft ground. Even though the reliable soil examination equipment was used to examine soil to determine the depth of soft ground, it's very hard to find out the accurate properties of soft ground, because the condition of indoor experiment cannot reproduce the circumstances of ground perfectly. Therefore, this study was re-estimated to find out the most reliable soil properties by using back-analysis with field monitoring data of "Site preparation for Airplane Mooring of Incheon International Airport Phase II Development" for 317days.

Keywords : Compression index, Coefficient of consolidation, Settlement behavior, Back-analysis

요 지

연약지반 설계시 영향을 미치는 주요 요인으로는 연약지반의 심도 및 지반의 특성값(압축지수, 압밀계수)을 결정하는 것이다. 이것은 연약지반의 설계시 지반의 침하거동을 예측할 수 있는 기초 자료가 된다. 신뢰성이 높은 지반 조사 장비로 연약층의 심도를 결정하였다더라도, 연약지반의 역학적 특성을 찾기 위한 실내시험 조건이 실제 지반환경을 완벽하게 재현하지 못하기 때문에 정확한 지반 특성값을 결정하는 것은 상당히 어려운 것이 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 가장 신뢰성 있는 지반 특성값을 재산정하기 위해 인천국제공항 2단계 여객계류장 부지조성시의 317일간의 현장 계측데이터를 역해석 기법을 이용하여 지반의 특성값을 재산정하였다.

주요어 : 압축지수, 압밀계수, 침하거동, 역해석

* 정회원, 인천국제공항공사 허브화추진실 AirportCity팀장

† 비회원, (주)공간종합건축사사무소 CM사업본부 차장(E-mail : givetable@bcline.com)

** 비회원, 인하공업전문대학 지구환경시스템공학부 토목환경과 교수

1. 서론

인천공항 2단계 건설사업과 같이 연약지반처리 지역이 대단위 사업인 경우 연약지반의 거동 특성에 따라 사업비 및 공기에 영향을 크게 끼치며, 특히 연약지반의 거동 특성은 흙 입자의 성분, 응력이력, 연약지반 심도 등에 따라 큰 변동성을 나타내므로 경제적이고 합리적인 연약지반 설계를 위해 토질특성에 대한 정확한 분석 및 평가는 매우 중요하다. 특히, 인천국제공항 2단계 부지조성공사 설계시 연약지반의 심도의 결정 방법은 표준관입저항치와 피조콘 관입저항치의 관계를 적용하여 정확한 연약층의 심도를 결정하고자 하였다. 연약지반의 심도는 전체적인 지반의 침하량 및 압밀 기간과 밀접한 관계가 있어 설계시 및 시공 중 심도에 대한 정확한 분석이 미흡할 경우, 원지반의 침하가 과다 또는 과소 평가될수 있다. 또한, 설계시 고려된 지반의 특성값(압축지수 및 압밀계수)중 압밀 해석시 압축지수는 전체적인 침하량, 압밀계수는 지반의 압밀기간과 밀접한 관계가 있으므로 이에 대한 정확한 평가에 의해 인접한 구역 공사시에 지반의 거동 해석이나 후속공정 시점을 결정하는데 중요한 인자로 작용한다. 따라서, 본 연구에서는 인천공항 2단계 부지조성 설계시에 정확한 지반의 심도를 결정을 위해 표준 관입시험 및 콘관입시험이 실시되었다. 또한, 가장 정확한 지반의 거동을 평가할 수 있도록 실내 시험시에 산정된 지반 특성값에 대한 재평가를 실시하였으며 이를 위해 시공 단계에 따른 지반의 거동을 해석에 적용하여 원지반의 거동을 파악함으로써 적용된 지반 특성값의 신뢰도를 평가하였고, 원지반의 거동과 상이한 결과를 나타낼 경우, 지반특성값에 대한 재평가를 위해 역해석(Back-Analysis)기법을 적용하여 평가하였다.

2. 일반적인 연약지반의 심도 결정

2.1 연약지반의 판정 기준

연약지반이란 강도가 약하고 압축되기 쉬운 흙으로 이루어진 연약토를 말하며, 연약지반의 판정 시 중요 사항

은 연약한 정도에 따른 것으로 지반에 가해지는 하중의 크기에 따라 연약성의 크기가 결정되며, 일반적인 연약지반의 판정기준은 표 1, 2와 같다.

표 1. 연약지반판정기준(일본토목공법 연구회)

구분	연약층 두께(m)	N치	qc (kg/cm ²)	qu (kg/cm ²)
이탄질 및 점성질 지반	D ≤ 10	4이하	8이하	0.6이하
	D ≥ 10	6이하	12이하	1.0이하
사질토		10이하	40이하	-

표 2. 토질특성에 따른 연약지반 판정 기준(한국도로공사)

지반 구분	토층 및 토질 구분		토질 정수			
			Wn(%)	e _s	qu (kg/cm ²)	N치
이탄질 지반	고유기 질토	Peat	300이상	7.5이상	< 0.4	< 1
		흑니	300-200	7.5-5.0		
점토질 지반	세립토	유기질토 화산회질 점토	200-100	5.0-2.5	< 1.0	< 4
		Silt	100-50	2.5-1.25		
		Clay				
사질 지반	사질토	SM, SC	50-30	1.25-0.8	≧ 0	< 10
		SP-SC SW-SW	< 30	< 80		

2.2 표준관입저항치(N)와 콘관입저항치(qc)의 관계

Robertson 등은 표준관입시험과 피조콘시험 결과를 상호 비교하여 상관관계를 평가한 연구 성과를 많이 발표하였으며, 또한 Robertson & Campanella(1983)는 입도분포(D₅₀)에 따른 피조콘관입저항치와 표준관입저항치의 관계를 표 3과 같이 나타내었다(한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 2003).

표 3. 표준관입저항(N)과 콘관입저항(qc) 관계

제안자	관계식
Robertson & Campanella	$q_c = (1.0 \sim 8.0) N$
Robertson et al	$q_c = (1.0 \sim 9.0) N$

재료의 특성에 따라 표준관입저항과 피조콘관입저항과의 관계는 다양한 결과를 나타내며, 지역 및 현장여건에 따라 상이하게 나타나므로 일률적인 기준을 적용

하기에는 무리가 있다. 그러므로 본 현장에서는 설계시 현장 조사된 자료를 바탕으로 현장여건에 맞는 표준관입저항치와 피조콘관입저항치와의 관계를 파악하여 연약지반 심도가 결정되었다.

인천국제공항 2단계 연약지반 설계보고서(운동실 등, 2002)에서 연약지반 심도 결정은 평가 지역별 표준관입저항치(N=5)를 기준으로 연약지반 심도를 결정하고, 동일한 심도에서 피조콘 관입저항치의 평균값으로 산정하였다. 또한, 연약지반 상에 선행압밀하중 이상의 하중이 작용할 때 지반은 과도한 압축이 발생하며, 이러한 압축이 발생하는 위치를 파악하여 표준관입저항치와 피조콘 관입저항치를 비교 분석하였으며, 시공시 안전율을 고려하여 신윤섭 등(2003)은 $q_c=(2.0)N$ 에 근거하여 $q_c=10\text{kgf/cm}^2$ 을 기준으로 연약지반 심도를 결정하였다. 표 4, 5는 표준관입저항치와 선행압밀하중 고려시 대상 지역별 평가 결과이다.

표 4. 대상지역 평가 결과(N=5 기준시)

위 치	연약층 평균 심도(m)	N치	q_c (kgf/cm ²)	q_c/N
활주로 남측	7.5	5	8.14	1.63
활주로 중앙	4.0	5	5.45	1.09
활주로 북측	4.9	5	5.51	1.10
여객계류장 (가-6,10,16,18, 20-26-27)	3.0	5	5.55	1.11
분 석	▶ 연약지반 심도에 따른 N와 q_c 와의 관계 ⇒ $q_c = (1.09 \sim 1.63)N$			

표 5. 대상지역 평가 결과(선행압밀하중고려시)

위 치	N치 평균	$q_c(\text{kg/cm}^2)$ 평균	q_c/N
활주로 남측	3.40	5.81	1.71
활주로 중앙	3.22	5.27	1.64
활주로 북측	2.80	5.55	1.98
여객계류장 (가-6,10,16,18, 20-26-27)	2.43	2.94	1.21
분 석	▶ 연약지반 심도에 따른 N와 q_c 와의 관계 ⇒ $q_c = (1.21 \sim 1.98)N$		

3. 역해석에 관한 기본 이론

3.1 역해석(Back-Analysis)

역해석 기법(장찬수 등, 2002)은 응력, 변형을 및 변위 등의 응답변수로부터 설계변수의 하중 및 재료의 물성치를 역으로 구하는 것을 말하며, 역해석 기법으로는 빠른 시간에 다변수 함수를 최적화하는 매우 효율적 방법인 수학적 역해석 기법이 주로 사용되었다. 수학적 역해석 기법은 크게 역산법(Inverse Method)와 직접법(Direct Method)이 있는데 각 기법의 특징은 다음과 같다.

① 역산법(Inverse Method)

응답변수인 변위, 응력 등으로부터 직접 역해석의 대상인 설계변수를 정의하는 방법으로 일반 해석에 이용되는 지배방정식을 역으로 하여 변위 등 계측자료가 주어졌을 때 대상 지반에 대한 설계 변수를 구하는 방법으로 탄성문제에만 적용 가능하고 비선형이나 점탄성 문제에 적용할 수 없는 제한성을 지니고 있다.

② 직접법(Direct Method)

응답변수인 변위, 응력 등의 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 정해진 범위 내에 들 때까지 수치해석과정의 반복계산을 통해 역해석 대상인 설계 변수를 수정하는 방법으로 계측결과와 해석 결과의 차이를 목적 함수로 정의하고, 이를 최소화하는 설계 변수를 찾는 방법이다.

정해석 과정과 계측결과와 해석 결과의 차이인 오차를 최소화하기 위해 설계변수의 효율적 추적 과정이 결합되어 오차가 허용범위에 수렴할 때까지 반복 과정을 수행한 것으로 복잡한 수학적 바탕이 없어도 기존의 정해석 프로그램을 수정하여 사용할 수 있다. 적용이 광범위하여 비선형 문제에도 적용이 가능하다. 그러나, 수학적 역해석 기법은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

① 다수의 해가 있는 문제에서 전역적인 최적해가 아닌 국부적인 해에 빠질 수 있다.

② 탐색의 초기값에 따라 결과가 달라진다.

따라서, 실무 적용시에 한지점에서 역해석 기법을 적용하여 구한 설계 변수값을 전체적인 지점에 적용할

경우, 상당한 오차를 유발할 수 있으므로 가능 많은 지점에서 얻어진 자료를 종합적으로 분석하여 적용하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

3.2 역해석(Back-Analysis)의 적용

역해석 기법은 현장의 지반 거동과 일치하거나 유사한 거동을 나타낼 수 있는 지반의 특성값을 산정하여 향후 인접 지역이나, 지반의 상태가 비슷한 지역에 적용하여 지반의 거동을 미리 예측하기 위한 기법으로 본 연구에서는 인천국제공항 2단계 건설 사업에서 연약지반 설계시 적용된 지반의 특성값에 대해 계측결과를 적용하여 성토에 따른 지반 거동 차이를 파악하고, 분석하여 실제의 지반 거동과 일치하는 지반 특성값으로 재산정하였다. 지반의 특성값이 과대하거나 과소한 경우, 지반의 불균질성이나 조사시의 한계성, 시험 및 조사시의 오류에 따른 지반의 특성값 선택에 의한 경우와 지반내 Sand Seam이나 모래 자갈층이 존재하는 경우에 나타날 수 있다.

우선적으로 지반 특성값을 재산정하기 위해 성토체의 단위체적 중량은 현장 시공 중 조사된 현장 실험 자료를 적용하였으며, 현장 계측된 지반의 거동과 거의 일치할 수 있는 결과값을 도출하도록 압밀도 및 침하량을 종합적으로 분석하여 지반의 특성값을 재산정하였다.

지반의 특성값을 재산정하기 위한 역해석 기법은 직접법으로 최소자승법의 원리를 적용하여 실제의 지반 거동을 나타내는 지반의 특성값을 산정하지만, 최소자승법의 원리를 적용해도 시행착오법(Trial and Error)으로 실제 지반의 거동에 근접할 후 있도록 해석 그래프를 현장 계측값에 Curve Fitting시켜 지반의 특성값을 산정한다. 따라서, 본 연구에서는 최소자승법 및 시행착오법을 조합하여 사용하는 대신 지반 특성값의 변동에 따른 해석 그래프의 Curve Fitting시키는 시행착오법(Trial and Error)만을 통해 특성값의 변화에 따른 지반 거동을 확인하면서 현장 계측값 대비 해석값의 차이의 오차율이 5%이내 일 때의 값을 지반 특성값으로 산정하였다.

그림 1은 현장 조사에 의한 성토체의 단위체적 중량

및 성토고, 그 외의 지반 특성값을 나타내는 것으로 기초조사된 자료를 바탕으로 역해석 전에 적용된 7개 지점 중 대표적인 한 지점을 나타내었다.

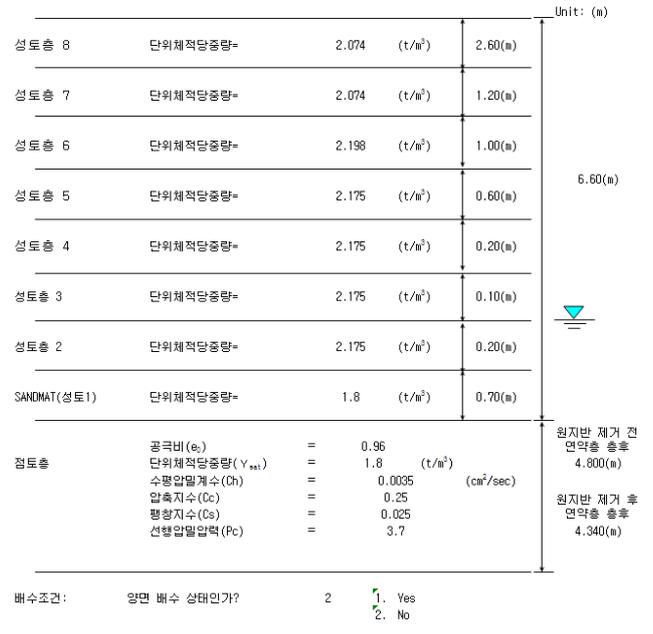


그림 1. 가-6지점의 지반 특성 및 시공현황

다음 표 6은 실내 시험에 의한 지반의 특성값을 종합 분석하여 설계시 적용된 당초 지반의 특성값을 나타낸 것이다.

표 6. 설계시 고려된 지반의 특성값

위치	압축지수	압밀계수 (cm ² /sec)	비고
가-6	0.25	0.0035	

표 7은 여객 계류장 부지조성지역에 계측관리 된 지점 중 총 7개 지점에 대한 콘관입시험(q_c=10kgf/cm²이하) 및 표준관입시험에 의해 결정된 연약층의 심도를 나타낸 것이다.

표 7. 설계 적용 연약층 두께

위치	가-6	가-10	가-16	가-18	가-20	가-26	가-27
층두께(m)	4.8	4.7	5.8	10.5	6.6	6.5	6.5

표 8. 수치해석 결과

위치	설계 적용값고려		역해석 결과			
	침하도	해석결과	침하도	해석결과		
가-6		경과일수 (day)	317		경과일수 (day)	317
		해석침하량 (cm)	34.03		해석침하량 (cm)	33.09
		계측침하량 (cm)	32.8		계측침하량 (cm)	32.8
		차이(cm)	1.93		차이(cm)	0.29
		오차율(%)	6		오차율(%)	1
		압축지수	0.25		압축지수	0.24
		암밀계수	0.0035		암밀계수	0.009
가-10		경과일수 (day)	298		경과일수 (day)	298
		해석침하량 (cm)	27.25		해석침하량 (cm)	21.85
		계측침하량 (cm)	21.7		계측침하량 (cm)	21.7
		차이(cm)	5.55		차이(cm)	0.15
		오차율(%)	26		오차율(%)	1
		압축지수	0.25		압축지수	0.2
		암밀계수	0.0035		암밀계수	0.007
가-16		경과일수 (day)	317		경과일수 (day)	317
		해석침하량 (cm)	38.73		해석침하량 (cm)	50.05
		계측침하량 (cm)	51.1		계측침하량 (cm)	51.1
		차이(cm)	12.37		차이(cm)	1.05
		오차율(%)	24		오차율(%)	2
		압축지수	0.25		압축지수	0.32
		암밀계수	0.0035		암밀계수	0.0095
가-18		경과일수 (day)	298		경과일수 (day)	298
		해석침하량 (cm)	68.82		해석침하량 (cm)	44.43
		계측침하량 (cm)	44.7		계측침하량 (cm)	44.7
		차이(cm)	24.12		차이(cm)	0.27
		오차율(%)	54		오차율(%)	1
		압축지수	0.25		압축지수	0.15
		암밀계수	0.0035		암밀계수	0.009
가-20		경과일수 (day)	277		경과일수 (day)	277
		해석침하량 (cm)	38.91		해석침하량 (cm)	29.17
		계측침하량 (cm)	29		계측침하량 (cm)	29
		차이(cm)	9.91		차이(cm)	0.17
		오차율(%)	34		오차율(%)	1
		압축지수	0.25		압축지수	0.18
		암밀계수	0.0035		암밀계수	0.008

표 8. 수치해석 결과(계속)

위치	설계 적용값고려			역해석 결과		
	침하도	해석결과		침하도	해석결과	
가-26		경과일수 (day)	310		경과일수 (day)	310
		해석침하량 (cm)	47.59		해석침하량 (cm)	29.38
		계측침하량 (cm)	27.9		계측침하량 (cm)	27.9
		차이(cm)	19.69		차이(cm)	1.48
		오차율(%)	71		오차율(%)	5
		압축지수	0.25		압축지수	0.15
		압밀계수	0.0035		압밀계수	0.0085
가-27		경과일수 (day)	310		경과일수 (day)	310
		해석침하량 (cm)	48.16		해석침하량 (cm)	39.31
		계측침하량 (cm)	37.3		계측침하량 (cm)	37.3
		차이(cm)	10.86		차이(cm)	2.01
		오차율(%)	29		오차율(%)	5
		압축지수	0.25		압축지수	0.2
		압밀계수	0.0035		압밀계수	0.007

표 9. 역해석에 의한 지반특성값의 재산정 결과

구분	최소값	최대값	평균	설계값	차이
압축지수	0.15	0.32	0.21	0.25	0.04
압밀계수 (cm ² /sec)	0.007	0.0095	0.0083	0.0035	0.0048

표 9와 같이 압축지수의 경우, 현장 계측(이명학, 2004)에 의한 지반의 침하량과 역해석 후에 얻어진 침하량에 대한 최종 측정일에 대한 침하 오차율이 5%이 내의 값을 나타내도록 하여 재산정한 압축지수값이 실내시험에 의한 값과 0.04 차이로 비슷한 결과값을 나타내어 압축지수의 실내시험값이 당 현장에서는 적절한 것으로 판단된다.

역해석에 의한 결과에서 압밀계수의 경우, 설계시에 고려한 지반의 특성값보다 상당히 큰 값을 나타내고 있어 압밀이 설계시에 고려한 경우보다 빠른 것으로 나타나고 있으며, 실제 압밀완료일이 당초보다 앞당겨질 것으로 예상할 수 있다.

따라서, 연약지반 개량 현장에서 사전 시험 성토시에 정확한 계측을 실시하고, 실내시험에 의해 산정된 지반특성값(압축지수, 압밀계수)을 역해석으로 재평가하여 사용할 경우, 가장 정확한 지반의 거동을

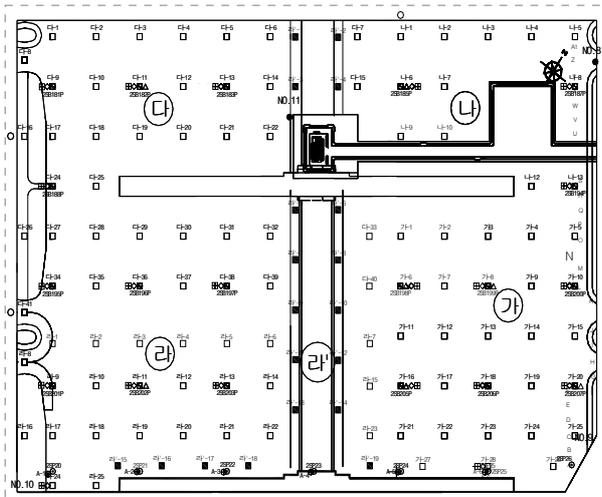


그림 2. ○○ 현장도 및 대상지점

표 8에 나타난 것처럼 해석 결과, 설계값 적용시 6% ~ 71%의 오차율을 나타내었다. 최대 오차율을 나타내는 가-26의 경우, 조사된 지반조사 보고서의 자료에 의하면 연약층 두께 6.5m내부에 자갈질의 모래가 2.65m 존재하고 있어 차이가 발생한 것으로 판단된다.

지반의 침하 거동을 정확히 나타낼 수 있도록 지반의 특성값인 압축지수 및 압밀계수에 대한 역해석 후 얻은 결과는 표 9와 같다.

평가할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 실내 시험시 산정된 지반특성값을 적용한 해석이 실내시험시의 여러 가지 구속조건 및 가정에 의해 정확한 실 지반의 거동을 나타내는 것이 어려운 것이 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 현장 계측된 데이터를 적용하여 가장 정확한 지반의 거동을 나타낼 수 있는 지반특성값을 산정하고자 하였으며 그에 따른 결과는 다음과 같다.

1. 영종도 지역에서 연약지반 두께의 결정은 콘관입 저항치(q_c) 10kgf/cm^2 이하인 지역으로 구분하여 해석에 적용하였으며, 계측값과 역해석값의 비교 분석하여 실제 지반의 거동과 일치하도록 결과 압축지수의 값이 역해석에 의해 산정된 값과 설계시 고려한 값의 차가 0.04정도로 작은 값의 차이를 나타내었고, 압밀계수는 설계시보다 크게 평가되어 항 후 최종 실제 침하량은 줄어들 것으로 판단되며 압밀 완료일은 앞당겨질 것으로 판단된다. 따라서, 압밀완료일 및 압밀 거동을 정확히 평가하기 위해 역해석이 시공 중 필요하다는 것을 알 수 있다.

2. 역해석 기법을 적용하는데 있어서 최소자승법과 같은 수학적인 기법을 적용하지 않고, 현장 계측데이터의 침하량 경시변화도 및 시공 단계를 해석에 적용한 수치 해석된 결과를 일부 현장 계측데이터에 Curve Fitting시키는 것만으로도 복잡한 수학적인 기법을 적용하지 않고 충분히 원지반의 거동 향후 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 역해석기법을 적용하기 위해서는 시험성토시 압밀이 80%이상의 데이터를 적용하여 실시공시 지반의 거동을 예측하는데 적용하는 것이 이상적이며, 시공 중에 역해석기법을 적용할 경우, 전체 성토고의 50%이상 또는 압밀도가 50%이상의 데이터를 적용할 경우, 가장 이상적인 지반의 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 역해석 기법을 적용하는 과정에서 압축지수 및 압밀계수 값이 상대적으로 다른 지점에 비해 큰 값의 차이를 나타낼 때는 연약지반의 심도 및 연약층 내에 삽입되어 있는 두꺼운 Sand Seam이나 자갈질의 모래 존재 여부를 의심할 수 있으며 시공중 계측관리된 데이터에 대한 역해석을 통해 충분히 설계시에 대해 고려여부 및 지층 구분 여부를 지층 주상도를 재확인 할 수 있는 기회 및 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

(접수일 : 2005. 12. 7 심사일 : 2005. 12. 9 심사완료일 : 2006. 8. 18)

참고 문헌

1. 신윤섭, 김민철, 김연정, 김영웅, 피조콘 관입저항치(q_c)를 이용한 연약지반 심도결정에 관한 연구(2003), *KGS Spring Conference 2003 / March 21~22, 2003 / Taejon / Korea*
2. 윤동실, 유승권, 윤성구(2002), 인천공항공항 2단계건설 부지조성공사 기본 및 실시설계용역 여객계류장 부지조성공사(1공구) 설계보고서, 인천국제공항공사, (주)유신코퍼레이션 컨소시엄, pp. 252~266
3. 장찬수, 남순성(2002), Q&A 역해석 기법(유전 알고리즘(Genetic Algorithm)), *한국지반공학회*, Vol.18, No. 5, pp. 61~72.
4. 이명학(2004), 인천국제공항 2단계설계 여객계류장 부지조성공사(1공구) 전면책임감리용역 계측관리월간보고서(12회) (주)유신코퍼레이션, (주)테스콤엔지니어링, pp. 24~35
5. 천병식, 최정훈(2005), 현장계측을 통한 다층 폐기물 매립지의 장기침하거동분석, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol.6, No.1, pp. 53~61
6. Roberston, P. K., Campanella, R. G. and Wightman, A.(1983), SPT-CPT correlations, *Journ. Geo. Eng. Div. ASCE*, Vol. 109, No. 11, pp. 1449~1459.
7. T. Lunne, P. K. Robertson & J. J. M. Powell(1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional.