

확률론적 방법에 의한 인천송도지반 압밀침하량의 공간적 분포 평가

Evaluation of Spatial Distribution of Consolidation Settlement of Songdo Marine Clay by Probabilistic Method

김 동 휘¹ Kim, Dong-Hee
최 영 민² Choi, Young-Min
이 우 진³ Lee, Woo-Jin

Abstract

Because the thickness and depth of consolidation layer vary at every location, the consolidation settlement and time have to be evaluated spatially. Also, for a rational evaluation of the uncertainty of the spatial distribution of consolidation settlement and time, it is necessary to adopt a probabilistic method. In this study, mean and standard deviation of consolidation settlement and time of whole analysis region are evaluated by using the spatial distribution of consolidation layer which is estimated from ordinary kriging and statistics of soil properties. Using these results and probabilistic method, the area that needs adopting the prefabricated vertical drain as well as raising the ground level for balancing the final design ground level is determined. It is observed that such areas are influenced by the variability of soil properties. The design procedure and method presented in this paper can be used in the decision making process for a geotechnical engineering design.

요 지

압밀침하량과 속도에 영향을 미치는 압밀층 두께와 심도가 위치마다 상이하므로 압밀침하와 속도는 공간적 평가방법을 이용하여 분석되어야 한다. 또한, 확률론적 방법을 이용하여 공간적인 압밀침하 및 속도 추정결과와 불확실성을 평가할 수 있다. 본 논문에서는 압밀침하와 속도를 공간적으로 평가하기 위하여 크리깅기법으로 추정된 공간적인 지층분포를 이용하였다. 또한, 지반정수의 통계량과 확률분포형을 이용하여 압밀침하 및 속도의 불확실성을 평가하였다. 이 결과와 확률론적 방법을 이용하여 압밀시간을 단축하기 위해 연직배수공법을 적용해야 하는 면적과 최종 설계지반표고를 맞추기 위해 추가성토를 수행해야 하는 면적을 분석하였으며, 이러한 분석결과는 지반정수들의 변동성에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 논문에서 제시한 분석절차와 방법은 지반공학적 설계의 의사결정과정에서 사용될 수 있었다.

Keywords : Consolidation settlement, Consolidation rate, Kriging, Probabilistic method, Variogram

1. 서 론

해안이 인접한 국가들은 매립공사를 통하여 신도시

및 항만건설을 시행하고 있다. 이러한 해안매립공사는 대부분 점토 등의 연약지반에서 이루어지므로 시간 경과에 따른 압밀침하 발생은 불가피하다. 또한, 압밀층

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 두께 및 매립에 의한 성토높이가 공간적으로 변하기 때문에 압밀침하 및 압밀속도를 공간적으로 평가하는 것은 대규모 해안매립지반에서 매우 중요한 문제이다.

지반정수들은 단일 값이 아니라 불확실성이 내재되어 있는 확률변수로 취급될 수 있으며, 이러한 지반정수들을 이용하여 추정하는 압밀침하 및 압밀속도 또한 확률변수로 다루어져야 한다. 지반정수들의 불확실성이 일차 압밀침하량과 압밀도에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. Corotis 등(1975)은 압축지수, 간극비, 선형압밀하중 등을 확률변수로 취급하여 압밀침하의 확률밀도함수 분포를 연구하였다. Freeze(1977), Athanasiou-Grivas와 Harr(1978)는 지반정수를 정규분포로 모델링하여 압밀의 불확실성을 연구하였다. Chang(1985)은 압밀계수를 감마분포를 따르는 확률변수로 가정한 후 모멘트법과 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 평균시간계수에 따른 압밀도의 불확실성을 분석하였다. 또한, Chang(1985)은 압밀계수의 변동성이 압밀도에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. Hong과 Shang(1998)은 연직배수재를 설치한 지반의 압밀문제를 확률론적으로 다루었으며, 횡방향 압밀계수의 불확실성이 압밀과정에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. Zhou 등(1999)은 횡방향 압밀계수의 크기뿐만 아니라 확률밀도함수의 형태가 목표압밀도의 불확실성에 큰 영향을 미친다고 하였다. 국내에서는 김방식과 김병일(2007)이 횡방향 압밀계수의 불확실성을 고려하여 연직배수재 배치간격을 확률론적 방법으로 결정하였다.

확률론적 방법으로 공간적인 압밀침하 및 압밀속도

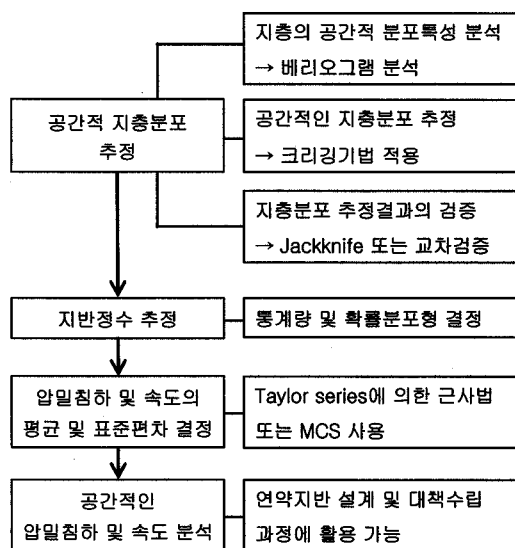


그림 1. 공간적인 압밀침하 및 압밀속도 평가 과정

평가방법을 제시하기 위하여 그림 1과 같은 방법으로 연구를 수행하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 먼저 압밀침하 평가에 필요한 지층들의 공간적 분포를 크리깅 기법을 이용하여 추정하였다. 지층추정결과를 잭나이프 방법으로 검증하여 가장 신뢰성 높은 추정방법을 선정하였으며, 이 결과를 압밀침하 추정에 직접적으로 활용하였다. 두 번째로 압밀침하 및 압밀속도를 확률론적 방법으로 추정하기 위해서 $C_0/(1+e_0)$, $C_v/(1+e_0)$, C_v , 단위중량 및 과입밀비 등의 지반정수들에 대한 통계량 및 확률분포형을 추정하였다. 이러한 지층분포 추정결과와 지반정수들의 통계량 및 확률분포를 이용하여 매립 공사 완료 후 시간경과에 따른 공간적인 압밀침하 및 압밀속도를 확률론적 방법을 이용하여 추정하였으며, 이러한 분석결과를 설계에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 지층분포 추정을 위한 지구통계학적 방법

크리깅의 개념은 광산학자인 Krige(1951)에 의해 처음으로 소개되었으며, 1960년대 초 프랑스의 지질학자 Matheron(1962, 1963a, 1963b)에 의해 이론적 수식이 소개되었다. 크리깅은 광산분야뿐만 아니라 공간적으로 분포하는 자료와 그 분포특성을 이용하여 미지값을 추정하고자 하는 지질학, 기상학, 환경공학, 수자원 공학 분야 등에서 적극적으로 사용되고 있다. 크리깅기법에서 값을 추정할 때 가장 중요한 역할을 하는 것은 베리오그램(variogram)으로 공간자료의 상관관계를 나타내는 척도이다. 일반적으로 조사자료를 이용하여 산정한 실험적 베리오그램(experimental variogram)으로 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 결정하고 있으며, 어떤 이론적 베리오그램 모델을 사용하느냐에 따라 동일한 조사값에 대해서도 크리깅의 적용결과가 달라지기 때문에 적정 베리오그램을 판단하는 것이 가장 중요하다. 이론적 베리오그램 모델로는 구형모델, 지수모델, 가우시안모델 등이 있으며, 너깃 C_0 , 문턱값 $(C+C_0)$, 상관거리 a 의 세 모수를 이용하여 정의할 수 있다(최종근, 2007; Isaaks와 Srivastava, 1989; Journel과 Huijbergts, 1978; Cressie, 1991).

크리깅 기법들은 경향성분 또는 평균을 어떻게 고려하는가에 따라서 단순크리깅(Simple Kriging, SK), 정규크리깅(Ordinary Kriging, OK), 일반크리깅(Kriging with a Trend, KT)으로 구분된다. 단순크리깅은 평균을 알고

있으며, 분석영역 전체에서 일정하다고 가정하며, 정규 크리깅은 추정하고자 하는 위치에 인접한 국부적인 영역 내에서의 평균은 일정하나 알지 못한다고 가정한다. 일반크리깅은 알지 못하는 국부적인 영역에서의 평균이 분석영역 전체에서 변한다고, 즉 경향성을 보인다고 가정한다. 크리깅은 이러한 가정 하에서 오차분산을 최소화 하는 가중치를 구하여 기지 값의 선형조합으로 미지 값을 추정하는 방법이며, 가중치를 구하는 방정식을 크리깅 방정식 또는 시스템이라고 한다(Goovaerts, 1997; Isaaks와 Srivastava, 1989; Cressie, 1991).

3. 연구지역 위치 및 분석자료

분석대상인 인천 송도지역은 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 분포하고 있으며, 퇴적층은 실트질 점토층 및 모래층이 번갈아 분포하고 있다. 퇴적층 상부에 분포하는 평균 N값이 5인 실트질 점토층에서 압밀침하가 발생할 것으로 판단되며, 송도지반의 특성

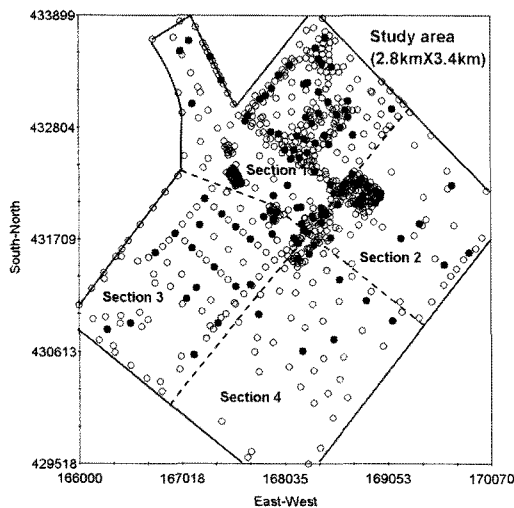


그림 2. 분석자료(원)와 검증자료(점) 분포

분석결과는 김동휘 등(2009a, b; 2010b)에 자세하게 제시되었다. 본 논문에서는 지층분포 추정결과와 검증방법으로 전체 자료 중 값을 알고 있는 위치에서의 값을 크리깅 추정값과 비교하는 잭나이프 검증방법(Jackknife validation method)을 사용하였다. 따라서 총 702개의 시추조사자료를 581개의 분석자료와 121개의 검증자료로 분리하였으며, 각각의 위치는 그림 2와 같다.

4. 지반정수의 확률분포

압밀침하 및 압밀속도의 확률분포를 추정하기 위해서는 매립 전 지반정수에 대한 확률분포를 알아야 한다. 본 논문에서는 매립층의 습윤단위중량, 유효단위중량, 매립 전 압밀층의 습윤단위중량, 유효단위중량, 압축지수와 재압축지수를 간극비로 정규화한 $C_v/(1+e_0)$ 와 $C_r/(1+e_0)$, 압밀계수에 대한 통계량 및 확률분포형을 추정하였으며, 그 결과를 표 1에 요약하였다. 본 논문에서 사용한 지반정수들은 표 1에서 제시한 각각의 확률분포형을 따른다고 보았다.

본 논문에서는 확률분포형의 매개변수 추정방법으로 모멘트법을 사용하였으며, 확률분포형에 대한 적합성은 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 방법으로 검정하였다(Benjamin과 Cornell, 1970; Ang과 Tang, 2007). 확률분포형 분석 결과 압밀계수는 왼쪽으로 치우친 분포경향을 보이므로 정규분포보다는 대수정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 실트질 모래로 구성되어 있는 매립층의 습윤단위중량과 유효단위중량의 변동계수는 Duncan(2000)과 Phoon과 Kulhawy(1999)를 참고하여 각각 5%, 7%로 하였으며, 정규분포로 가정하였다.

표 1. 지층별 지반정수의 통계량 및 확률분포

구분	지반정수	단위	자료 수	평균	표준편차	변동계수	확률분포
매립층 (실트질 모래)	습윤단위중량, γ_t	kN/m ³	-	19.0	0.95	0.05	정규분포
	유효단위중량, γ_b	kN/m ³	-	9.2	0.64	0.07	정규분포
압밀층 (실트질 점토)	습윤단위중량, γ_t	kN/m ³	124	18.3	0.54	0.03	정규분포
	유효단위중량, γ_b	kN/m ³	124	8.5	0.54	0.06	정규분포
	$C_v/(1+e_0)$	-	124	0.122	0.036	0.30	정규분포
	$C_r/(1+e_0)$	-	20	0.030	0.007	0.22	정규분포
	압밀계수, c_v	cm ² /sec	58	6.22×10^{-3}	2.76×10^{-3}	0.44	대수정규분포
	OCR(G.L.0~4.0m)	-	30	3.1	0.7	0.23	정규분포

5. 지층분포 추정

5.1 추정결과의 검증방법

지층분포 추정결과의 검증방법으로 잭나이프 검증방법을 사용하였으며, 추정결과의 정확성을 정량적으로 평가하기 위해 비교 통계량을 사용하였다. 비교통계량으로는 추정값의 정확성을 평가하는 MAPE(Mean Absolute Percent Error), MAE(Mean Absolute Error), MSE(Mean Squared Error), 추정결과의 편향성을 평가하는 PBIAS (Percent of BIAS), 예측의 효율성(effectiveness)을 평가하는 G 값(goodness-of-prediction(G) measure)을 사용하였다. MAPE, MAE, MSE는 계산 값이 작을수록 추정값이 정확하다는 것을 의미하며, PBIAS는 0에 가까울수록 추정결과가 편향되지 않았다고 할 수 있다. 또한, G 값이 “100”일 경우에는 완벽한 추정이라고 할 수 있으며, G값이 음수일 경우에는 추정자로 자료값의 평균을 사용하는 것보다 신뢰성이 없다는 것을 의미한다(Santra 등, 2008).

5.2 지층분포 추정 및 검증

압밀침하 및 압밀속도를 공간적으로 평가하기 위해서는 공간적인 지층분포 추정이 중요하므로 본 논문에서는 공간적인 자료분포추정에 많이 사용되는 크리깅기법을 이용하였다. 크리깅기법으로 지층분포를 추정하기 위해 먼저 베리오그램 분석을 수행하였으며, 압밀층 두께, 압밀층 출현심도, 매립층 하부심도에 대한 실험적 베리오그램과 이론적 베리오그램 분석결과는 그림 3과 같다. 분석결과 세 지층 모두 구형모델이 실험적 베리오그램을 가장 잘 나타내 주는 것으로 나타나 구형모델을 이론적 베리오그램으로 사용하였다(김동휘 등, 2010a, c). 구형모델을 이용하여 단순, 정규, 일반크리깅으로 연구 영역의 압밀층 두께 및 출현심도, 매립층 하부심도를 추정하였다. 각각의 방법에 따른 추정결과의 신뢰성을 분석하기 위하여 잭나이프 검증방법을 사용하였으며, 표 2에서 볼 수 있듯이 세 지층 추정결과 모두에서 정규크리깅이 신뢰성이 가장 높은 것으로 나타났다. 압밀층 두께 추정결과에서는 정규크리깅과 일반크리깅 추정결과가 유사한 신뢰성을 보이고 있으나 일반크리깅은 일부 구간의 압밀층 두께를

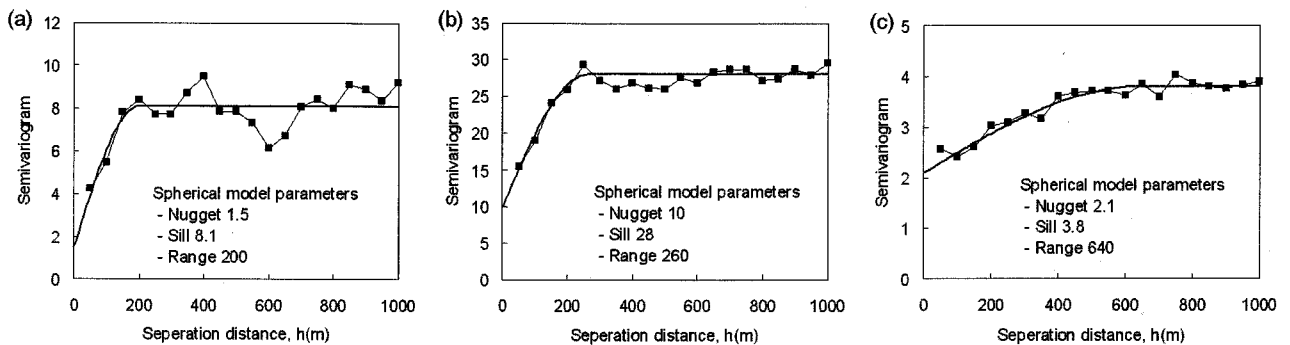


그림 3. 지층별 실험적 및 이론적 베리오그램: (a) 압밀층 출현심도, (b) 압밀층 두께(김동휘 등, 2010c), (c) 매립층 하부심도

표 2. 지층분포 추정결과의 신뢰성 분석결과

Estimation method		MAPE, %	MAE, m	MSE, m ²	PBIAS, m	G
압밀층 두께	SK	31.825	2.593	11.677	-0.531	46.0
	OK	26.104	2.408	9.831	-0.051	54.5
	KT	25.741	2.447	9.843	0.018	54.5
압밀층 출현심도	SK	116.330	1.355	3.622	-0.214	22.9
	OK	96.480	1.209	2.973	-0.129	36.7
	KT	102.109	1.269	3.195	-0.179	32.0
매립층 하부심도	SK	95.096	1.072	1.903	-0.416	27.8
	OK	97.021	1.064	1.870	-0.413	29.0
	KT	124.510	1.102	1.997	-0.434	24.3

주) 압밀층 두께 분석결과는 김동휘 등(2010c)을 참고하였음

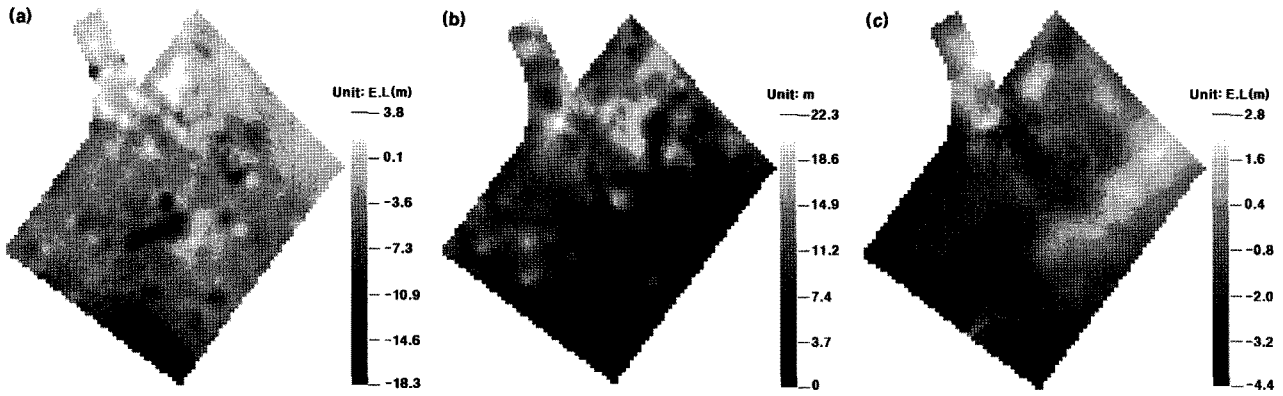


그림 4. 정규크리깅을 이용한 지층분포 추정결과: (a) 압밀층 출현심도, (b) 압밀층 두께(김동휘 등, 2010c), (c) 매립층 하부심도

음의 값으로 추정하여 최종 방법으로 정규크리깅을 선택하였다(김동휘 등, 2010c). 따라서 본 논문에서는 그림 4의 정규크리깅에 의한 지층추정결과를 이용하여 압밀침하 및 압밀속도를 추정하였다. 크리깅을 이용한 송도신도시 지층분포 추정에 대한 자세한 분석결과는 김동휘 등 (2010a, c)을 참고할 수 있다. 압밀층 두께는 압밀침하 공식에 직접적으로 사용되며, 압밀층 출현심도는 압밀층 두께와 함께 매립 전 압밀층에서의 응력상태 파악에 사용된다. 또한, 매립층 하부심도(매립층과 퇴적층 경계심도)는 매립에 의한 하중 증가량 산정에 사용된다.

6. 공간적인 압밀침하 및 압밀속도 분석

6.1 압밀속도

6.1.1 압밀계수의 확률분포형이 압밀속도에 미치는 영향

특정 압밀도에 도달하는 시간을 확률론적 방법으로

평가하기 위해서는 압밀계수의 확률분포가 필요하다. 송도지반의 압밀계수는 그림 5에서 볼 수 있듯이 분석자료들이 왼쪽으로 치우친 분포를 보이므로 대수정규분포가 적합한 것으로 나타났다. 이러한 분포특성을 보이는 압밀계수를 단순하게 정규분포로 가정한 후 확률론적 분석을 수행할 경우 압밀속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 압밀층 평균 두께 12.9m, 매립층 평균 두께 8.7m인 위치에서 압밀도 95%에 도달하는 시간을 평가해보았다. 압밀시간은 테르자기의 일차원 압밀이론을 사용하여 산정하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 정규분포 압밀계수를 사용할 경우 압밀도 95%에 도달하는 시간이 40개월 이상일 확률, $P(t_{u=0.95} \geq 40)$ 을 0.41(1.0-0.59)로 평가하여 대수정규분포를 사용했을 경우보다 약 0.08과대평가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 정규분포를 사용할 경우에는 압밀도 95%에 도달하는 시간이 24~60개월 이상일 확률을 과대평가하며, 24개월 이하와 60개월 이상에서의 확률은 과소평가 한다. 따라서 확률론적 방법을 이용하여 특정 압밀도에 도달하는 시간이 특

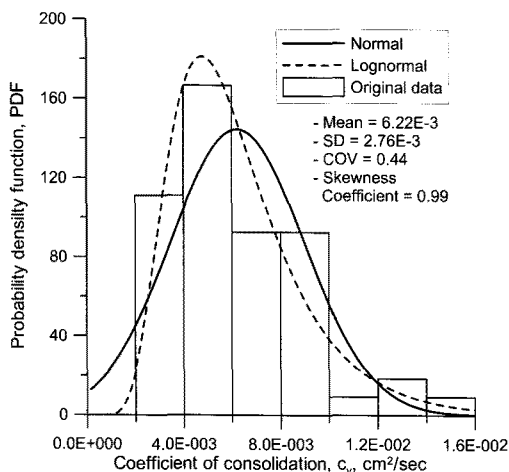


그림 5. 압밀계수의 확률분포형

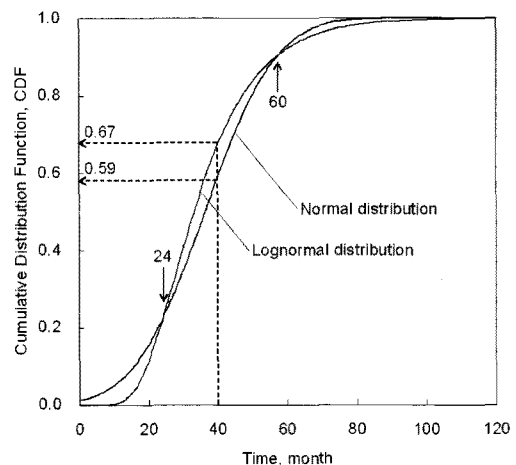


그림 6. 압밀시간의 누적확률분포함수

정 시간 이상일 확률, $P(t_U \geq t)$ 을 정확하게 추정하기 위해서는 분석대상 지반의 압밀계수를 적절하게 나타낼 수 있는 대수정규분포를 사용해야 함을 알 수 있다.

6.1.2 압밀속도의 확률론적 분석결과와 활용

본 절에서는 압밀축진공법을 적용해야 하는 면적을 결정론적인 방법과 확률론적인 방법으로 산정하였으며, 두 방법으로 산정한 결과의 차이점을 분석하였다. 이러한 분석을 수행하기 위해 매립완료 후 36개월 내에 전체 영역이 95%의 압밀도까지 도달해야 한다고 가정하였다. 먼저 결정론적 방법 즉, 압밀계수의 변동성이 없다고 가정한 후 압밀시간을 산정하는 경우에는 그림 7에서 볼 수 있듯이 전체면적의 30%만 압밀축진공법을 적용해도 매립완료 후 36개월 내에 전체영역이 95% 압밀도에 도달하는 것으로 나타났다.

확률론적인 방법을 사용하기 위해서는 확률론적 설계 기준 α , 즉 압밀시간이 36개월 이상 소요될 가능성이 α 이상 되는 영역은 압밀축진공법을 적용해야 한다는 기준이 있어야 한다. 현재까지 국내에서는 이러한 기준은 없으므로 본 절에서는 α 및 압밀계수의 변동성이 압밀축진공법을 적용해야 하는 면적에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 그림 7에서 볼 수 있듯이 확률론적 설계 기준 α 가 작을수록 즉, 설계기준이 엄격할수록 압밀축진공법의 적용 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 압밀계수의 변동성 즉, 변동계수가 증가할수록 압밀축진공법을 적용해야 하는 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 송도지반 압밀계수의 변동계수는 0.44이며, 확률

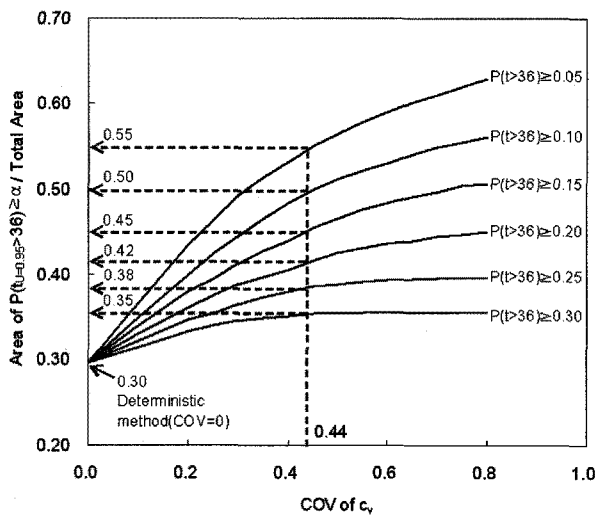


그림 7. 압밀계수의 변동성, $P(t_{U=0.95} > 36 \geq \alpha)$, 연직배수공법 적용 면적 관계

론적 설계기준 α 가 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30일 때 압밀축진공법 적용이 필요한 면적은 각각 전체면적의 55%, 50%, 45%, 42%, 38%, 35%인 것으로 나타났다.

압밀속도에 대한 확률론적 설계기준 α 는 아직까지 국내에서는 확립되지 않았으므로 설계에 직접적으로 사용되기 보다는 결정론적 방법들을 보완하는 방법으로 사용될 수 있다. 또한, 확률론적 설계기준을 만족하기 위해 증가한 압밀축진공법 공사비용과 압밀이 목표공사기간 내에 완료되지 않았을 때의 손실비용을 함께 분석하여 최종 압밀축진공법 적용면적을 결정할 수 있다.

6.2 압밀침하

6.2.1 압밀침하의 평균과 표준편차

압밀침하의 확률밀도함수는 지반정수들의 확률밀도함수를 압밀침하 산정공식에 대입한 후 적분하여 구할 수 있다. 그러나 압밀침하 산정공식은 비선형함수이므로 확률밀도함수를 구하기 위해 압밀침하 산정공식을 적분하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 압밀침하의 평균과 표준편차를 구하기 위하여 테일러급수(Taylor series) 전개에 1계 근사법을 사용하였다. 테일러급수 전개를 이용한 방법은 근사적인 해를 구하는 방법이다. 따라서 이러한 근사해를 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS) 방법을 이용하여 산정한 결과와 비교해 보았다. 그림 8은 몬테카를로 시뮬레이션과 테일러급수 전개를 이용하여 추정된 평균과 표준편차로 압밀층 평균 두께가 12.9m인 위치에서의 압밀침하에 대한 누적확률분포함수를 도시한 것이다. 또한, 본 논문에서는 압밀침하의 확률분포로 정규분포를

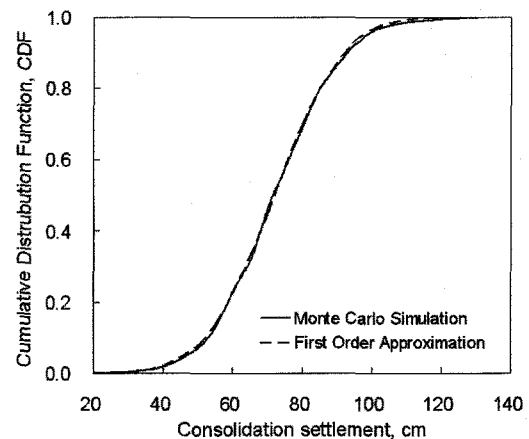


그림 8. 몬테카를로 시뮬레이션과 테일러급수 전개를 이용한 방법의 비교

사용하였다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 테일러급수 전개를 이용한 방법과 MCS 방법의 차이는 대부분 1.0% 미만으로 거의 유사한 결과를 주는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 테일러급수를 이용한 근사방법을 사용하여 압밀침하량의 평균과 표준편차를 산정하였다.

6.2.2 지반정수의 변동성이 압밀침하 변동성에 미치는 영향

압밀침하를 공간적으로 평가하기 전에 매립층의 습윤(γ_t) 및 유효단위중량(γ_b), 압밀층의 유효단위중량, $C_d/(1+e_0)$, $C_r/(1+e_0)$ 및 OCR의 변동성이 압밀층 평균 두께 12.9m, 매립층 평균 두께 8.7m인 위치에서 발생하는 압밀침하의 변동성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 위해 표 3과 같은 민감도 분석계획을 수립하였다. 표 3에서 CASE-1은 실제 송도지반에 대한 조사결과를 이용하여 추정된 지반정수들의 평균과 변동계수(COV)가 압밀침하의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이며, CASE-2, 3, 4, 5, 6, 7은 각 지반정수들의 변동성이 압밀침하 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. CASE-8은 특정시간(12개월 후)에서의 압밀침하 변동성을 평가하기 위한 것이며, 이 경우에는 특정시간에서의 압밀도의 변동성을 고려하기 위해 압밀계수의 변동성을 추가로 고려하였다. 표 3의 맨 오른쪽 열은 각각의 CASE에 대한 압밀침하의 평균 및 변동계수이다.

압밀침하 계산에 사용한 6개 지반정수들의 변동성이 압밀침하의 변동성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 CASE-2, 3, 4, 5, 6, 7을 비교하였다. 그 결과 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성이 압밀침하 변동성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 송도지반의 상부 약 4m 정도가 평균 과압밀비 3.1 정도의 과압밀된 지반이라 할지라도 매

립에 의한 응력증가가 커 정규압밀지반으로 거동하므로 압밀침하는 $C_r/(1+e_0)$ 보다는 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성에 큰 영향을 받기 때문이다. 이러한 이유로 OCR의 변동성도 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성에 비하여 상대적으로 큰 영향은 미치지 않는다. 그러나 OCR의 변동성이 매립층 및 압밀층의 단위중량 변동성 보다는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 변동성이 상대적으로 큰 매립층 유효단위중량의 변동성보다는 압밀층 유효단위중량의 변동성이 압밀침하의 변동성에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 위의 결과들로부터 송도지반의 최종 압밀침하를 평가할 경우에는 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성이 압밀침하의 변동성에 가장 큰 영향을 미치므로 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성을 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

특정시간 경과 후의 압밀침하 변동성을 평가하기 위하여 CASE-1과 8을 비교하였다. 그 결과 특정시간 경과 후의 압밀침하량 변동성이 최종 압밀침하 변동성보다 큰 것으로 나타났으며, 이는 압밀계수의 변동성이 압밀침하의 변동성에 추가되기 때문이다. 따라서 특정시간 후의 압밀침하를 평가할 경우에는 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동성뿐만 아니라 c_v 의 변동성도 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

6.2.3 압밀침하의 확률론적 분석결과의 활용

매립지반에서 과도한 침하가 발생하면 추가 성토를 수행하여 계획높이를 유지해야 한다. 따라서 침하가 과도하게 발생하는 구간에서는 추가로 성토해야 할 토사가 많이 필요하게 되므로 계획단계에서 이러한 영역과 추가 성토량을 예측하는 것은 공사기간 및 공사비의 예측에 있어 중요한 문제이다. 따라서 본 절에서는 결정론적인 방법과 확률론적인 방법을 사용하여 추가성토를

표 3. 지반정수의 변동성이 압밀침하량의 변동성에 미치는 영향검토

CASE	매립층 지반정수				압밀층 지반정수								s_c , cm			
	γ_t , kN/m ³		γ_b , kN/m ³		γ_b , kN/m ³		$C_d/(1+e_0)$		$C_r/(1+e_0)$		OCR		c_v , cm ² /sec		Total	
	μ	COV	μ	COV	μ	COV	μ	COV	μ	COV	μ	COV	μ	COV	μ	COV
1	19.0	0.05	9.2	0.07	8.5	0.06	0.122	0.30	0.03	0.22	3.1	0.23	-	-	71.9	0.216
2	19.0	0.05	9.2	-	8.5	-	0.122	-	0.03	-	3.1	-	-	-	71.9	0.015
3	19.0	-	9.2	0.07	8.5	-	0.122	-	0.03	-	3.1	-	-	-	71.9	0.012
4	19.0	-	9.2	-	8.5	0.06	0.122	-	0.03	-	3.1	-	-	-	71.9	0.030
5	19.0	-	9.2	-	8.5	-	0.122	0.30	0.03	-	3.1	-	-	-	71.9	0.206
6	19.0	-	9.2	-	8.5	-	0.122	-	0.03	0.22	3.1	-	-	-	71.9	0.018
7	19.0	-	9.2	-	8.5	-	0.122	-	0.03	-	3.1	0.23	-	-	71.9	0.050
8	19.0	0.05	9.2	0.07	8.5	0.06	0.122	0.30	0.03	0.22	3.1	0.23	0.00622	0.44	49.4	0.260

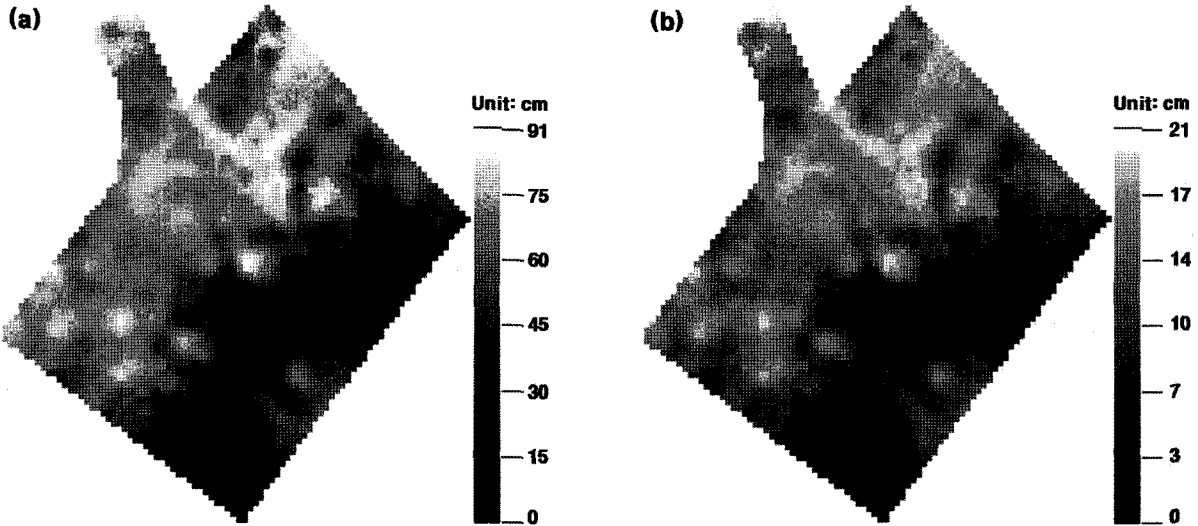


그림 9. 압밀침하의 평균과 표준편차: (a) 평균, (b) 표준편차

수행해야 할 영역을 분석하였다.

확률론적 방법을 사용하여 압밀침하 분포를 평가하기 위해서는 먼저 공간적인 압밀침하의 평균과 표준편차를 산정해야 한다. 그림 9는 매립을 표고 E.L+8m까지 수행하였을 때 송도지역 압밀침하의 평균과 표준편차의 공간적인 분포를 나타내고 있다. 송도지역은 최종 매립부지의 높이를 표고 E.L+7m로 계획하고 있어 본 논문에서는 압밀침하를 고려하여 표고 E.L+8m까지 성토를 수행하는 것으로 가정하였다. 그림 9(a)는 지반정수들의 평균을 사용하여 분석영역에서 압밀침하의 평균을 산정한 것이며, 그림 9(b)는 지반정수들의 변동성을 고려하여 산정한 압밀침하의 표준편차이다. 이러한 평균과 표준편차를 이용하여 특정 위치에서 특정 압밀침

하 이상 발생할 가능성, 즉 확률을 산정할 수 있다.

결정론적인 방법을 사용할 경우에는 그림 9(a)의 압밀침하 평균의 공간적인 분포만을 이용하여 추가성토 계획을 수립할 수 있다. 즉, 압밀침하가 100cm 이상 발생할 경우에는 최종계획 높이인 E.L+7m 아래로 지표면이 내려가 추가성토가 필요하다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이 송도매립지반에서는 표고 E.L+8m까지 성토를 수행하였을 경우 최대 91cm의 압밀침하가 발생하여 추가성토는 필요 없는 것으로 나타났다. 그러나 확률론적 방법에 의하면, 그림 10에서 볼 수 있듯이 일부 구간에서는 100cm 이상 압밀침하가 발생할 확률, $P(s_c > 100)$ 이 최대 0.33 정도된다. 이와 같이 확률론적 방법에서는 분석대상 지역의 압밀침하가 특정 압밀침하 이상 발생할 가능성 즉, 위험도를 평가할 수 있으며, 이러한 위험도 평가결과를 추가성토 계획에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

확률론적 방법에서는 특정 압밀침하 이상 발생할 가능성은 지반정수 특히, $C_v/(1+e_0)$ 의 변동성에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 본 절에서는 $C_v/(1+e_0)$ 의 변동계수가 $P(s_c > s) \geq \alpha$ 인 영역의 면적에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 여기서, $P(s_c > s) \geq \alpha$ 는 압밀침하가 특정 침하 s 를 넘을 가능성이 확률론적 설계기준 α 보다 큰 확률을 의미한다. 또한, 압밀침하가 100cm 이상 발생할 경우 추가성토가 필요하므로 특정 압밀침하 s 로 100cm를 사용하였다. 그림 11에서 가로축은 $C_v/(1+e_0)$ 의 변동계수이고 세로축은 압밀침하량 s 값을 넘을 가능성이 설계기준 α 보다 큰 영역의 면적과

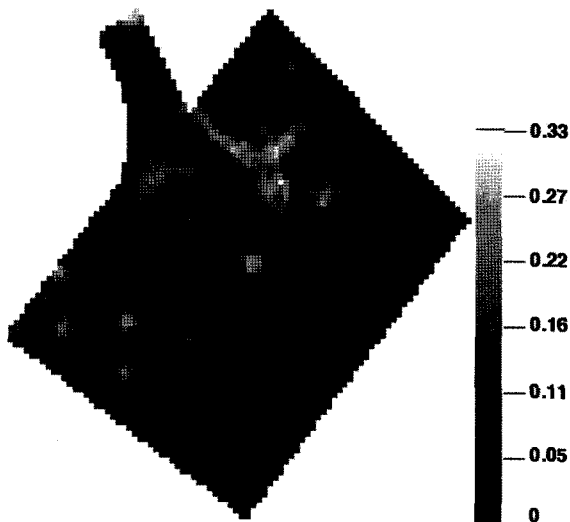


그림 10. 압밀침하량 100cm 이상 발생확률, $P(s_c > 100cm)$

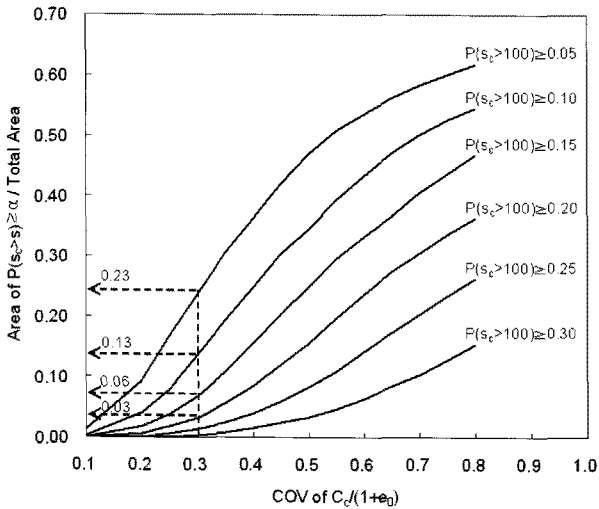


그림 11. $C_d/(1+e_0)$ 변동성이 $P(s_c > s) \geq \alpha$ 인 면적에 미치는 영향

전체면적의 비를 나타내고 있다.

그림 11에서 볼 수 있듯이 $P(s_c > s) \geq \alpha$ 인 면적과 전체 면적의 비는 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동계수가 증가할수록 또는 확률론적 설계기준 α 가 감소할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 지반정수의 변동성과 확률론적 설계기준 α 는 추가성토 대책을 수립해야 할 면적에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 분석대상 지역인 송도지반 $C_d/(1+e_0)$ 의 변동계수 0.30에서 확률론적 방법을 사용하여 압밀침하를 분석한 결과 100cm 이상 압밀침하가 발생할 가능성이 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 보다 큰 영역의 면적은 전체면적의 0.23, 0.13, 0.06, 0.03, 0.01, 0인 것으로 나타났다. 이와 같이 송도지반도 지반정수의 불확실성으로 인하여 100cm 이상의 압밀침하도 발생할 가능성이 내재되어 있음을 알 수 있다. 따라서 확률론적 방법을 사용할 경우에는 특정 값 이상의 압밀침하가 발생할 가능성도 평가할 수 있으므로 압밀침하에 의한 추가 성토높이 결정의 의사결정(decision-making) 과정에 이러한 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 요약 및 결론

매립공사가 대규모로 수행되고 있는 해안지역의 압밀층 두께는 공간적으로 변하므로 위치마다 압밀속도 및 압밀침하량 발생 정도가 다르다. 따라서 압밀 문제를 공간적으로 평가하는 연구가 필요하며, 압밀침하 및 압밀속도를 합리적으로 평가하기 위해 확률론적 방법의 도입이 필요하다. 본 논문에서는 확률론적 방법으로 공간적인 압밀침하 및 압밀속도 평가방법을 송도지반을 대

상으로 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 해안매립지반에서의 압밀침하를 평가하기 위해서는 먼저 지층분포를 공간적으로 추정해야 한다. 잭 나이프 방법으로 신뢰성 분석을 수행한 결과 정규크리깅이 가장 우수한 것으로 평가되었으며, 이를 이용하여 압밀층 두께, 압밀층 출현심도, 매립층 하부심도의 공간적인 분포를 추정하였다.
- (2) 압밀침하 산정에 필요한 지반정수들의 통계량 및 확률분포형을 분석한 결과 c_v 는 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며 $C_d/(1+e_0)$ 와 단위중량 등의 지반정수들은 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.
- (3) 확률론적 방법을 이용하여 특정 압밀도에 도달하는 시간이 특정 시간 이상일 확률, $P(t_u > t)$ 을 추정하기 위해서는 분석대상 지반인 송도지반의 압밀계수를 적절하게 나타낼 수 있는 대수정규분포를 사용해야 함을 알 수 있었다. 또한, 확률론적인 방법을 적용할 경우에는 c_v 의 변동성이 압밀축진공법 적용면적에 큰 영향을 미치며 확률론적 설계기준 α 의 수준도 압밀축진공법 적용면적에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (4) 지반정수들의 통계량을 이용하여 압밀침하의 평균과 표준편차를 테일러급수의 1계 근사법을 이용하여 산정하였으며, 이 결과는 몬테카를로 시뮬레이션으로 산정한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 정규크리깅 기법으로 추정된 지층분포 추정결과를 이용하여 분석영역 전체의 압밀침하량 평균과 표준편차를 산정하였다.
- (5) 지반정수들의 변동성이 압밀침하의 변동성에 미치는 영향을 분석한 결과 $C_d/(1+e_0)$ 가 다른 지반정수들에 비하여 상대적으로 압밀침하의 변동성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지반정수들의 통계량을 이용한 확률론적 방법을 적용할 경우에는 분석대상 지역의 압밀침하가 특정 압밀침하 이상 발생할 가능성 즉, 위험도를 평가할 수 있으므로 이러한 결과를 이용하여 합리적인 추가성토 계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자

료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부분으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진 (2009a), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 6호, pp.73-88.
2. 김동휘, 이주형, 이우진 (2009b), “무작위성을 보이는 지반정수의 확률분포 및 변동성”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권, 11호, pp. 87-103.
3. 김동휘, 류동우, 최영민, 이우진 (2010a), “인천 송도지역 지층분포 추정을 위한 크리깅과 역거리가중치법의 적용”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 1호, pp.5-19.
4. 김동휘, 홍성진, 이우진, 고성권 (2010b), “인천 송도지역 지반의 압밀특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 1호, pp.21-33.
5. 김동휘, 류동우, 이주형, 최인걸, 김종국, 이우진 (2010c), “인천 송도국제도시 지층분포추정을 위한 크리깅 방법의 비교연구”, *한국지반공학학회논문집*, 제26권 5호, pp.57-64.
6. 김방식, 김병일 (2007), “지반 불확실성을 고려한 연직배수재 배치간격의 확률론적 해석과 결정”, *한국지반공학학회논문집*, 제23권, 4호, pp.125-132.
7. 최종근 (2007), *지구통계학*, 시그마프레스, 서울.
8. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (2007), *Probability Concepts in Engineering, Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons, pp. 278-305.
9. Athanasiou-Grivas, D., and Harr, M. E. (1978), “Consolidation-Probabilistic approach”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.104, No.EM3, pp.681-690.
10. Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970), *Probability, Statistics, and Decision for Civil engineers*, McGraw-Hill Book Company, New York.
11. Chang, C. S. (1985), “Uncertainty of One-Dimensional Consolidation analysis”, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.111, No. 12, pp.1411-1424.
12. Corotis, R. B., El-Moursi, H. H., and Krizek, R. J. (1975), “Probabilistic Approach to Prediction of Consolidation Settlement”, TRB, Transportation Research Board 548, pp.47-61.
13. Cressie, N. A. C. (1991), *Statistics for Spatial data*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
14. Duncan, J. (2000), “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.4, pp.307-316.
15. Freeze, R. A. (1977), “Probabilistic One-Dimensional Consolidation”, *Journal of geotechnical engineering*, Vol.103, No.GT7, pp.725-741.
16. Goovaerts, P. (1997), *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, New York.
17. Hong, H. P., and Shang, J. Q. (1998), “Probabilistic analysis of consolidation with prefabricated vertical drains for soil improvement”, *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp.666-677.
18. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
19. Journel, A. G., and Huijbergts, C. J. (1978), *Mining geostatistics*: Academic Press, London.
20. Krige, D. G. (1951), “A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand”, *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52, pp.119-139.
21. Matheron, G. (1962), *Traite de geostatistique appliqué*, Vol. I: Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, No.14, Editions Technip, Paris, pp.333.
22. Matheron, G. (1963a), *Traite de geostatistique appliqué*, Vol. II, Le Krigeage: Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, No. 24, Editions Bureau de Recherche Geologiques et Minieres, Paris, pp.171.
23. Matheron, G. (1963b), “Principles of Geostatistics”, *Economic Geology*, Vol.58, pp.1246-1266.
24. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), “Characterization of geotechnical variability”, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), pp.612-624.
25. Santra, P., Chopra, U. K., and Chakraborty, D. (2008), “Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in agricultural farm”, *Current science*, Vol.95, No.7, pp.937-945.
26. Zhou, W., Hong, H. P., and Shang, J. Q. (1999), “Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No.8, pp.659-664.

(접수일자 2010. 2. 1, 심사완료일 2010. 9. 2)