

압축지수분포 특성이 압밀침하량 분포에 미치는 영향

The Influence of Distribution Characteristics of Compression Index on the Spatial Distribution of Consolidation Settlements

김동휘¹⁾, Donghee Kim, 김민태²⁾, Mintae Kim, 김규선³⁾, Kyu-Sun Kim, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

³⁾ 삼성물산 건설부문 기반기술연구센터 선임연구원, Research Engineer, Construction & Technology R&D Center, Samsung C&T Corporation

⁴⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea University

SYNOPSIS : This paper describes that estimation methods for the distribution of consolidation settlements to investigate the influence of distribution characteristics of compression index on the spatial distribution of consolidation settlements. When the variation of compression index is considerable, the spatial distribution of compression index is estimated using ordinary cokriging. The spatial distribution of consolidation settlements estimated by considering both the variation of compression index and void ratio (CASE-1) is different from the conventional mean value of all soil properties (CASE-2). The settlement of CASE-1 shows the larger variation at short distances rather than that of CASE-2. Whereas the spatial settlement distribution of CASE-1 is affected by the spatial distribution of compression index and the thickness of consolidation layer, the distribution of CASE-2 is significantly influenced by the distribution of the thickness of consolidation layer.

Keywords : Consolidation settlement, Cokriging, Cross-variogram, Compression index

1. 서 론

대규모 해안 매립지반에서의 압밀침하량 분포를 정확하게 추정하기 위해서는, 압밀침하량 추정에 필요한 지반정수들의 분포특성을 정확하게 파악해야 한다. 그러나 대부분의 경우 불충분한 지반조사 자료로 인하여, 지반정수들의 공간적 분포특성을 정확하게 파악하기는 매우 어렵다. 대상 지반이 비교적 균질한 경우에는 다른 위치에서 얻은 지반정수들로부터 압밀침하량 추정을 위한 설계값을 결정할 수 있으며 일반적으로 평균값을 설계에 사용한다. 각각의 위치마다 측정값이 약간씩 다른 이유는 고유변동성과 측정오차로 설명할 수 있다(DeGroot와 Baecher, 1993; Phoon과 Kulhawy, 1999). 그러나 지반이 균질하지 않은 경우에는 각각의 위치에서 얻은 지반정수가 그 위치를 대표한다고 간주할 수 있으며, 지반정수의 공간적 분포를 추정하여 압밀침하량을 계산할 수 있다(Baecher와 Christian, 2003).

본 논문에서는 분석영역 내 압축지수의 분포특성이 압밀침하량의 공간적 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해, 압축지수의 분포특성을 고려한 압밀침하 추정방법을 제시하고 그 결과를 비교하였다. 지반이 균질하지 않은 경우에는 압축지수의 공간적 분포 추정결과의 신뢰성을 높이기 위해 간극비를 이차변수

로 이용한 정규공동크리깅을 적용하여 압축지수의 공간적 분포를 얻었다. 지반이 상대적으로 균질한 경우에는 지반정수들의 평균값을 사용하여 압밀침하량을 산정하고 그 공간적 분포를 추정하였다. 또한, 각각의 방법으로 산정한 압밀침하량의 공간적 분포특성을 비교하였다.

2. 지구통계학적 방법

크리깅 추정자(kriging estimator)는 확률함수(random function)를 취급하는 모델에 따라서 변하며, 확률함수는 잔차성분과 경향성분 또는 평균으로 구분될 수 있다. 크리깅 기법은 평균을 고려하는 방법에 따라 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅 등으로 구분된다. 본 논문에서 사용한 정규크리깅 기법에서는 추정값을 얻고자 하는 위치에 인접한 영역 내의 평균값은 일정하나 알지 못한다고 가정한다. 정규크리깅은 이러한 가정 하에서 오차분산을 최소로 하는 가중치를 구하여 기지 값의 선형조합으로 미지 값을 추정하는 방법이며, 가중치를 구하는 방정식을 크리깅 방정식이라고 한다(Isaaks와 Srivastava, 1989; Cressie, 1991; Goovaerts, 1997). 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅은 한 가지 변수의 선형조합으로 미지 값을 추정한다. 두 가지 이상 변수의 선형조합을 사용하여 자료가 없는 지점의 값을 예측하는 크리깅을 공동크리깅(cokriging)이라고 한다. 두 가지 이상의 변수와 정규크리깅의 가정을 사용하는 정규공동크리깅(ordinary cokriging, OCK)에서는 예측하고자 하는 변수를 주변수(primary variable), 주변수가 아닌 변수를 이차변수(secondary variable)라 한다. 본 논문에서의 주변수는 압축지수이며, 이차변수로는 간극비를 사용하였다.

3. 연구지역 및 분석자료

분석대상인 인천 송도지역은 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암이 분포하고 있다. 퇴적층에는 실트질 점토층 및 모래층이 번갈아 분포하며, 퇴적층 상부의 실트질 점토층에서 압밀침하가 주로 발생한다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 분석영역은 송도지역 1공구 및 3공구 일부분이다. 그림 1(b)는 본 연구에 사용된 압축지수와 간극비 데이터를 얻은 위치를 표기한 것으로, 주로 1공구와 3공구에 집중되어 있다. 그림 1(c)는 지층분포 추정을 위한 시추조사 위치이다. 지층, 압축지수, 간극비에 대한 통계량 및 베리오그램 분석은 그림 1(b), (c)의 전체자료를 사용하였다.

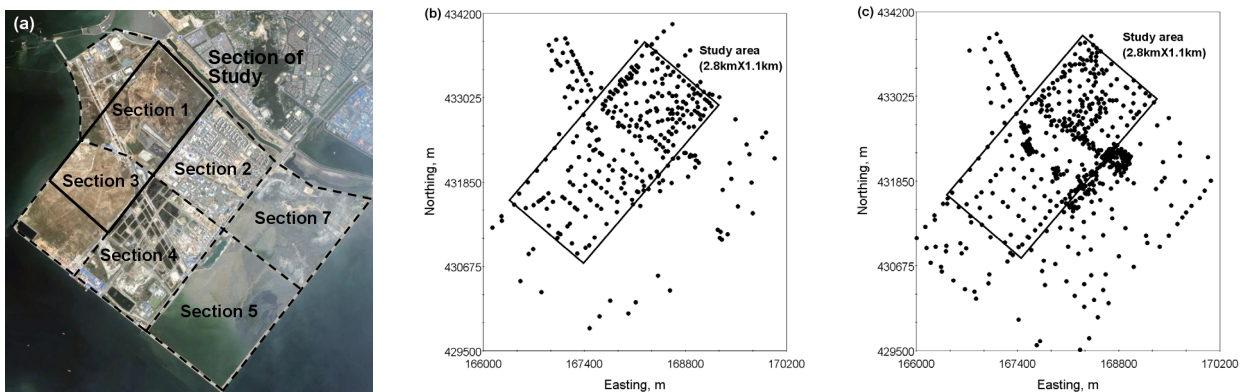


그림 1. 연구 및 분석자료 위치: (a) 연구위치, (b) 압축지수 및 간극비 위치, (c) 시추위치

4. 지층분포와 압축지수의 공간적 분포추정

정규크리깅과 공동정규크리깅을 이용하여 송도지반의 지층분포 및 압축지수분포를 추정하였다. 베리오그램 분석결과 송도지반 세 지층의 실험적 베리오그램에 가장 적합한 이론적 베리오그램은 구형모델인 것으로 나타났다. 압밀층 출현심도 및 두께, 매립층 하부심도에 대한 구형모델의 너깃(nugget), 문턱

값(sill), 상관거리(range)는 표 1과 같다. 정규공동크리깅으로 압축지수의 공간적 분포를 추정하려면 주 변수와 이차변수의 베리오그램, 그리고 두 변수간의 교차베리오그램이 필요하며, 구형모델이 세 실험적 베리오그램에 가장 적합한 것으로 판단되어 정규공동크리깅에 구형모델을 사용하였다. 정규크리깅을 이용하여 압밀층 출현심도, 압밀층 두께, 매립층 하부심도의 공간적 분포 추정결과는 2(a), (b), (c)와 같다. 그림 3(a), 3(b)는 정규공동크리깅과 정규크리깅으로 추정된 압축지수 및 간극비의 공간적 분포이며, 3(c)는 압축지수와 간극비의 분포추정결과를 이용하여 결정한 $C_v/(1+e_0)$ 의 공간적인 분포이다.

표 1. 지층 및 압축지수 추정에 사용된 구형모델의 모수

구 분		베리오그램 모델	너짓	문턱값	상관거리
지 층	압밀층 출현심도	Spherical	3.7	7.8	284
	압밀층 두께	Spherical	10.1	27.6	259
	매립층 하부심도	Spherical	2.2	3.8	635
압축지수 및 간극비	압축지수(일차변수)	Spherical	0.0020	0.0064	86
	간극비(이차변수)	Spherical	0.0035	0.0087	80
	교차베리오그램	Spherical	0.0010	0.0040	75

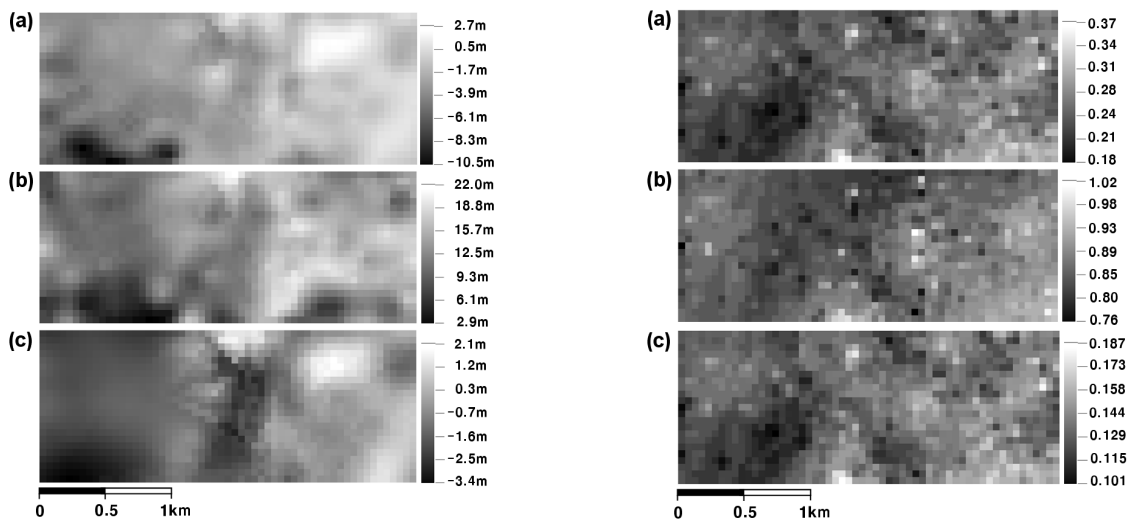


그림 2. 지층분포 추정결과: (a) 압밀층 출현심도, 그림 3. 압축지수와 간극비 추정결과: (a) 압축지수, (b) 간극비, (c) $C_v/(1+e_0)$
(b) 압밀층 두께, (c) 매립층 하부심도

5. 지반물성치의 설계값

압밀침하량의 분포를 추정하기 위한 방법 중 하나는 지반물성값들의 평균을 이용하는 것이다. 이를 위하여 매립층의 습윤 및 유효단위중량, 압밀층의 습윤 및 유효단위중량, 압축지수와 재압축지수를 간극비로 정규화한 $C_v/(1+e_0)$ 와 $C_r/(1+e_0)$, 과압밀비의 평균값을 산정하였다. 이를 위해 인천 송도지반의 연약 지반 설계를 위해 광범위하게 수행된 지반조사자료를 사용하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 매립층의 습윤단위중량과 유효단위중량의 평균은 인천경제자유구역청(2007)을 참고하였다.

표 2. 지층별 지반정수의 설계값

지층	지반정수	단위	설계값
매립층 (Silty sand)	Total unit weight	kN/m ³	19.0
	Buoyant unit weight	kN/m ³	9.2
압밀층 (Silty clay)	Total unit weight	kN/m ³	18.3
	Buoyant unit weight	kN/m ³	8.5
	$C_v/(1+e_0)$	-	0.137
	$C_r/(1+e_0)$	-	0.030
	OCR (G.L.0~-4.0m)	-	3.1

6. 공간적인 압밀침하 분포 추정

그림 4는 전술한 두 가지 방법으로 산정한 압밀침하량의 공간적 분포이다. 그림 4(a)는 압축지수 및 간극비의 공간적 분포 추정결과를 이용하여 압밀침하량을 산정한 것이다(CASE-1). CASE-1의 경우에도 압축지수와 간극비 이외의 모든 지반정수는 표 2의 평균값을 사용하였다. 그림 4(b)는 표 2의 평균을 사용하여 압밀침하량을 산정한 것이다(CASE-2). CASE-1의 경우에는 CASE-2에 비하여 거리에 따른 압밀침하량의 변화가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이는 CASE-1이 CASE-2에 비하여 유사한 압밀침하량의 연속성이 짧은 것을 의미한다. 그림 3(c)에 보이는 바와 같이 $C_v/(1+e_0)$ 의 짧은 연속성이 CASE-1의 압밀침하량 분포에 영향을 미친 것으로 판단된다. CASE-2의 경우에는 압밀침하량을 산정하기 위하여 지반정수들의 평균을 사용하므로 압밀침하량 분포는 압밀층 두께에 가장 큰 영향을 받는다. 그림 2(b)에 보이는 압밀층 두께의 공간적 분포는 $C_v/(1+e_0)$ 의 공간적 분포보다 연속성이 길다. 이는 압밀층 두께를 추정을 위해 사용한 구형모델의 상관거리는 259m로 압축지수 추정을 위한 상관거리 86m보다 크기 때문이다. 따라서 CASE-1보다는 CASE-2의 압밀침하량의 연속성이 더 긴 경향을 보인다.

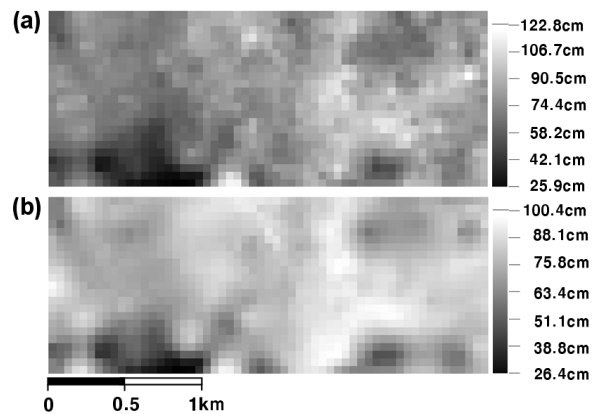


그림 4. 압밀침하 산정결과: (a) CASE-1, (b) CASE-2

7. 요약 및 결론

본 논문에서는 분석영역 내 압축지수의 분포특성이 압밀침하량의 공간적 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 압축지수와 간극비의 공간적 분포를 고려한 CASE-1과 지반물성치의 평균값을 사용하는 CASE-2에 대해 압밀침하량의 공간적 분포를 추정하고 각각의 방법으로 산정한 압밀침하량의 공간적 분포특성을 비교하였다.

지반이 균질하지 않을 경우에는 위치마다 압축지수가 상이하기 때문에 압축지수의 공간적인 분포 추정결과를 이용하여 압밀침하량을 평가하였다. 정규공동크리깅으로 추정한 압축지수의 공간적인 분포를

이용하여 압밀침하량의 공간적 분포를 산정한 결과 압밀층의 두께뿐만 아니라 압축지수의 분포에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 지반이 균질할 경우에는 압축지수의 평균을 이용하여 압밀침하량을 평가하였다. 이 경우에는 위치에 관계없이 모두 동일한 압축지수를 사용하므로 압밀침하량의 공간적 분포는 압밀층 두께에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 압밀층 두께를 추정하기 위해 사용한 구형모델의 상관거리 259m가 압축지수 추정을 위해서 사용한 구형모델의 상관거리 86m보다 크기 때문에 압밀층 두께에 더 큰 영향을 받는 균질한 지반의 압밀침하량 분포의 연속성이 불균질한 지반의 압밀침하량의 연속성보다 긴 경향을 보였다.

결론적으로 압축지수의 분포특성에 따라 상이한 압밀침하량 결과가 도출될 수 있으므로, 정확한 압밀침하량 평가를 위해서는 압축지수의 공간적 분포특성을 정확하게 평가하여 압밀침하량 분포를 산정하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 포스코건설의 “송도 매립지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가” 연구과제의 일부 자료를 이용하였으며, 자료 사용을 허락해 주신 포스코건설에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 인천경제자유구역청 (2007), 송도국제신도시 1공구내 주택단지의 기본 및 실시설계 토질조사보고서, pp.35-104.
2. Baecher, G. B., and Christian, J. T. (2003), Reliability and Statistical in Geotechnical Engineering, John Wiley & Sons Ltd.
3. Cressie, N. A. C. (1991), Statistics for Spatial data, John Wiley & Sons, Inc., NewYork.
4. DeGroot, D. J., and Baecher, G. B. (1993), “Estimating Autocovariance of In-Situ Soil Properties”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119, No.1, pp.147-166.
5. Goovaerts, P. (1997), Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, NewYork.
6. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), Applied geostatistics, Oxford University Press, NewYork.
7. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), “Characterization of geotechnical variability”, Canadian Geotechnical Journal, 36(4), pp.612-624.