

지구통계학 크리깅 기법을 이용한 연약지반의 불확실성 분석

Uncertainty Analysis of Soft Ground Using Geostatistical Kriging Method

윤 길 림¹ Yoon, Gil-Lim

이 강 운² Lee, Kang-Woon

채 영 수³ Chae, Young-Su

Abstract

Spatial uncertainty of Busan marine clay ground, which commonly occurs during site investigation testing, data analysis and transformation modeling, has been described. In this paper geotechnical uncertainty of shear strength indicator N_k has been quantified in both horizontal direction and vertical direction using geostatistical Kriging method. Most of soil data used are from 25 boring tests, 75 laboratory tests, 124 field vane tests and 25 cone penetration tests (CPT). CPT- N_k data for undrained shear strength determination, which are the most important properties in geotechnical design stages, have been analysed. Comparison between cone factor from conventional CPT-based method and that of geostatistical method shows that geostatistical Kriging method is an ideal tool to quantify the spatial variability of uncertainty from self-correlation of soil property of interest, and can be recommended to identify the spatial distribution of consolidation and shear strength of soils at any sites concerned.

요 지

남해안 부산 해성점토지반을 대상으로 지반조사 및 시험, 분석과정에서 발생하는 다양한 지반의 공간적 불확실성을 연구한 내용이다. 지반의 불확실성을 정량화하기 위하여 지반의 공간적 불확실성을 수치화하는 지구통계학적 기법을 사용하여 지반의 공간적 방향성을 분석하였다. 본 논문에서 불확실성 분석에 사용된 지반조사는 원위치 보링은 25개 소, 실내시험은 75회, 현장베인시험 124회, 그리고 심도별 콘관입시험 25회의 결과가 활용되었다. 지반의 불확실성에 대한 공간적 분석에 사용된 핵심자료는 콘관입 시험결과이고 특히 비배수 전단강도를 산정시 큰 영향을 미치는 콘계수(N_k)에 대하여 지구통계학적 방법과 기존의 일반적인 방법으로 상호 비교분석 하였다. 연구결과, 지구통계학적 기법을 통한 시험자료의 해석은 지반 고유특성에 따른 공간적 자기상관성을 찾을 수 있으며 특정 방향에 대한 시험자료의 상관성이 임의의 지역에 대한 값 추정에 적용되어 보다 신뢰성 있게 분포양상을 추정할 수 있었다. 그러므로 지구통계학적 크리깅 분석기법은 대상지역의 압밀과 강도특성 분포를 규명하는 데는 매우 유용하게 사용될 수 있다는 것을 확인하였다.

Keywords : CPT, Geostatistics, Kriging, Shear strength, Soft ground, Uncertainty

¹ 정회원, 한국해양연구원, 연안항만공학분부, 책임연구원 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal Harbor Engrg. Lab., glyoon@kordi.re.kr)

² 정회원, 동성엔지니어링, 지반 및 터널부, 전문이사 (Member, Dong Sung Engrg.)

³ 정회원, 수원대학교, 토목공학과, 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Suwon)

1. 서론

지반은 보통 퇴적기원 및 이력에 따라 위치별, 심도별로 불균질하며 일정한 연속성이나 반복성, 그리고 방향성이 존재하기도 한다. 따라서 실내의 실험 및 조사결과로 공간적 특성을 반영한 지반특성치를 얻는 것은 쉽지 않다. 더구나 지반을 이루는 흙이나 암반은 인위적으로 생산된 공장제품에 비해 실험 및 조사방법과 분석, 평가방법에 따라 그 특성치가 다양하므로 특별한 방법으로부터 지반자료를 얻었다 해도 그 신뢰성에는 한계가 있다. 즉 자연상태에서 위치 조건에 따라 그 특성이 달라지는 지반재료는 원위치 지반특성에 부합되는 지반재료값을 정량적으로 얻는데 한계가 있었다. 특히 지반정수는 설계자료로 직접 이용되므로 구조물의 안정성과 경제성에 미치는 영향력은 대단히 크다. 이같이 지반특성값인 지반정수는 직·간접적으로 구조물에 미치는 영향력이 큰바 불확실성을 최소화하는 작업이 필요하다. 지반정수의 불확실성은 결국 설계의 신뢰성을 좌우하며, 과대설계나 과소설계의 주요 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 지반조사 및 시험, 분석과정에서 발생하는 다양한 지반의 불확실성 요인중 자료 분석중에 발생하는 오차를 최소화하는 지구통계학적 기법을 사용하여 공간적 방향성(수직 및 수평)과 지반의 연속성을 분석하고자 하였다. 지반의 공간적 분석에 사용된 자료는 현장에서 수행한 콘관입시험결과이고 지반의 비배수 전단치를 산정하는 경우에 가장 큰 영향을 주는 요소인 콘계수(N_k)에 대해 지구통계학적 방법(geostatistical method)과 기존의 분석법에 기초하여 지반의 공학적 특성을 비교분석하였다.

2. 지반의 불확실성

현장지반조사를 통해 정량적으로 분석된 설계자료라 해도 그 조사방법과 빈도, 지반의 공간적 특성 변화 및 실험절차, 그리고 자연적, 인위적인 다양한 요인으로 지반조사 결과에는 불확실성이 존재하기 마련이다. Asoake and A-Grivas(1982)는 지반의 비배수 전단강도가 가지는 불확실성이 상당하다는 사실을 밝혔으며 실제 측정 자료를 가지고 분석하여 지반설계시 이러한 불확실성을 반드시 반영하는 한다고 주장했으며 반영하는 다양한 방법을 제시하였다. 이러한 불확실성 요소를 제거하기 위해 각종 통계적 기법을 활용하는 해석방법에 대한

연구가 진행되고 있으나 아직도 불확실성을 완전히 제거할 수 있는 방법은 없으며, 그나마 국내에서 수행되고 있는 지반조사 결과는 이러한 통계적 기법을 적용하는 것조차도 불가능할 정도로 충분치 못한 경우가 대부분이다. 국내의 연구사례로서 윤길립(1997)은 콘관입시험 자료의 저항치를 이용하여 지반이 가지는 공간적 불확실성을 정량화한 연구결과를 발표한 적이 있다. 그러므로 기존의 설계방법은 지반자체의 불확실성이 존재함에도 불구하고 이를 반영하지 못하여 매우 비경제적인 설계가 유도되는 경우가 많은 것이 현실이다. 본 연구는 이같은 불확실성 요인이 발생하는 원인을 밝히고 극복하는 방안을 제안하고자 한다.

2.1 불확실성 요소

불확실성이라는 용어는 그 단어 자체를 해석하는 방법과 목적에 따라 적용범위가 다양해질 수 있다. 지반공학분야에서의 불확실성은 대체적으로 지반의 특성치를 나타내는 지반시험값을 선정하는 과정에서 발생하는 불확실성으로 국한할 수 있다. Chiasson et al.(1995)는 지반분야에서의 불확실성에 대해 정의를 내리면서 불확실성은 단지 위험요소를 평가하기 위한 상대적 개념의 의미일 뿐, 그 적용범위를 명확히 구분하는 것은 쉽지 않다고 주장하였다. 다만 지반공학의 통계분석은 원위치 특성과 평가 그리고 위험요소의 평가, 허용한계, 건설시공관리 및 지반특성 등으로 국한하여 실시할 뿐이라고 주장하였다. 대부분의 통계분석에 대한 신뢰성은 자료수와 평가기술에 따라 달라지게 되는데, 평가 과정에서 발생하는 불확실성은 자료의 분산(data scatter)과 조사결과의 체계적인 오차(systematic errors)로 구분하여 설명할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

그동안 지반공학자들은 조사 및 시험시 발생하는 불확실성에 대해 필연적으로 받아들이고 있으며, 이같은 요소를 관리하기 위해 조사방법을 개선하여 극복하고 있다. 한편 지반특성치의 최적값을 도출하기 위해 Ravi(1992) 등은 불확실성이 발생하는 요소에 대해 일정한 모델을 통해 설명하였다. 즉, 그 내용은 ① 측정값이 편향되었는지 여부와 ② 오차발생이 체계적인 것인지와 무작위적 우연(random)인지의 여부 그리고 ③ 공간적인 변화를 고려했는지와 평균으로 다루어졌는지 등에 대해 구분하였다. 이중 첫 번째 요소인 편향정도는 지반이 이방성

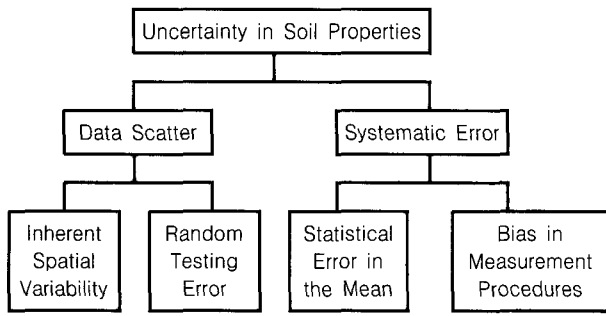


그림 1. 지반의 불확실성에 대한 오차 및 그 원인(윤, 2000)

을 나타내는 상황에서 발생할 수밖에 없으며, 균질한 지반에서 조차도 발생할 수 있고, 측정위치의 공간적 이격 거리에 따라 차이가 날 수밖에 없는 요소이다. 두 번째 요소는 지반조사의 제한된 정보에 의거 발생하는 요소로서 조사시 획득된 시료채취의 빈도나 현장 및 실내시험시 부가적으로 발생하는 오차이다. 그리고 세 번째 요소는 측정값과 현장 위치조건과의 차이로 발생하는 오차이다. 최근 이러한 지반의 불확실성을 기초구조물 설계에 반영하려는 국제적인 분위기에 따라서 현재 국제적으로 많은 연구로서 유로코드(Eurocode)나 북미의 하중저항계수설계법(LRFD)이 그 좋은 예라 하겠다. 즉, 신뢰성 해석차원에서는 자연상태의 지반이 지닌 다양한 특성치를 지반이 갖는 불확실성으로 고려하여 해석 결과에 반영될 수밖에 없으며 결국 지반특성치 결정을 위해서는 신뢰성을 높이는 방법은 적절한 수량과 평가 방법의 적용이 선행되어야 한다.

2.2 지반자료의 공간적 변이성

서로 다른 위치에서 발생하는 지반특성치의 공간적인 변화는 상호 이격거리에 따른 관계로부터 상관구조에 지배되는 반면, 무작위 시험으로 유발된 오차(random test errors)는 통계적으로 분석할 경우 발생하는 측정값의 독립적인 요소이다. 즉 서로 다른 위치에서 발생하는 지반특성치의 차이는 채취한 시료위치간에 상호관계를 통하여 통계적으로 분석할 수 있는 요소이지만, 시료채취시 무작위로 실시한 시험과정에서 발생한 오차는 통계분석이 매우 어려운 오차이다. 이같은 차원에서 Wu와 El-Jandali(1985)는 콘관입시험이 지반특성치의 추정과정에서 공간적 변화에 따라 서로 다르게 나타나는 불확실성을 통계학적으로 유추할 수 있는 대표적인 시험중의 하나로 설명했다. 한편 Baecher(1982)는 가정된 선상에서 일정한 이격거리별 측정값에 대해 지반 물성치

의 상관관계를 도출하였다. 자연지반이 갖는 이방성, 조사자료의 한계성, 그리고 측정오차는 현장조사로부터 각 지층별 특성을 모사하는데 있어, 불확실성의 기본 요소들이다. 이러한 불확실한 요소들을 극복하는 방법으로 통계학적 모델링이 지반공학분야에 필요하다. 이러한 이유에서 최근에 지반공학자들은 “autocorrelation”을 이용한 지반공학 자료들에 대해 공간적인 상관관계 모델을 사용해 왔다. 이러한 기법을 소위 확률론적 현장특성(stochastic site characterization)이라 하는데, 이것은 확률적인 차원에서 지반공학적 문제의 예측목적으로 분산된 이방성의 자료들을 정량화하는데 유용하다.

통계학적으로 임의의 지반특성을 모델화한 원위치우연모델(random field model)은 공간적으로 서로 다른 불확실한 재료의 특성을 형상화한 기본자료이다. 실질적으로, 모든 위치에서의 시료채취는 비현실적이고, 비경제적이며, 측정과 시험오차는 정보의 가치를 희석시킬 수 있는 경향이 있다. 이러한 이유에서 예측과 해석, 그리고 판정은 항상 지반에 대해 불완전한 정보를 제공하게 되며, 이것은 결국 확률적 모델을 갖게 한다. 공간적 상호관계에 있어 신뢰성 있는 정보자료는 지반조사 계획시 매우 유용하게 사용될 것이며, 서로 다른 위치에서 얻게되는 자료는 상관성이 떨어지게 된다. 지반특성치의 상관성은 변동(fluctuation)값으로서 나타낼 수 있는데, 확률적으로 연관성을 높게 하기 위해서는 기준거리보다 작은 범위내에서 시험이 실시되어야 한다. 한편 지반공학적 해석은 유사 지반상태라 할지라도 위치별로 서로 다르기 때문에, 변화도와 거리별 상관계수인 통계적 변수로서 현장고유의 특성값(site-specific values)을 요구한다. 근본적으로, 자료수가 충분하면 지표면하 모든 지점에서의 지반 특성치는 정확한 시험치를 얻을 수 있으나, 실질적으로 불가능하므로, 전단강도, 압축성 그리고 투수성과 같이 통상적으로 접하는 지반특성치들은 평균, 분산, 그리고, 공간적인 상호관계 등이 고려되어야 한다. 또한, 지반특성치는 각 지점이 갖는 값이며, 그 값들사이의 추정값은 보간법이나 경중율을 고려하여 추정한다.

지반조사 결과의 신뢰성이라 함은 지반조사과정에서 수행되는 각종 실내 및 현장시험으로부터 얻어지는 토질정수가 원위치 값 즉, 참값(true value)에 얼마나 접근하고 있는가를 뜻하는 것이다. 이는 소위 정확성(accuracy)에 대한 개념으로 각종 시험장비와 방법 개선노력으로 이러한 정확성을 찾고자 하는 것이 그 최종적인 목표였다.

그러나, 이같은 정확성의 개념에 대해 혼란을 피하기 위해서는 다른 차원에서 정밀성(precision) 또는 반복성(repeatability)에 대한 개념을 인식할 필요가 있으며, 이것은 참값과 측정값 사이의 오차를 얼마나 최소화하느냐에 달려있는 것이다. 물론 이러한 정확성과 반복성(정밀성)을 동시에 확보할 수 있다는 사실은 각종 지반조사에서 추구하고 있는 궁극적인 목표이겠지만 현재의 기술 수준으로 이 두 가지를 완벽하게 확보한다는 것이 현실적으로 어려우므로 기술자의 입장에서는 주어진 조건 하에서 최적의 지반조사 수량과 종류 등을 계획하고 얻어진 자료를 해석함에 있어서 오차 유발 원인을 정확히 파악하고 제거하여 가장 양질의 데이터를 설계에 반영하는 것이 중요한 역할이라 할 수 있겠다.

3. 지구통계학

지구통계학이라는 개념은 통계학의 특별한 한 분야로써 채취한 시료의 기지점 정보로부터 미지의 위치에서의 주어진 값을 평가하는데 사용된다. 현재의 지구통계학은 지금은 프랑스 수학자인 매서런(Matheron)과 남아프리카 광산학자 크리기(Krige)에 의해 발전된 응용통계학의 한 분야이다(Matheron, 1963). Matheron의 지반공학 절차와 그 결과분석 시, 지반정수의 공간적 분포 특성은 완전히 무작위적 성질이 아니며, 결정적인 두요소(공간적 이격거리와 측정값)가 포함된다는 사실로부터 출발했다. 즉 지반정수는 심도나 거리별 측정치 사이의 공간적 상호구조라는 것을 의미한다. 이것은 지역변수이론 혹은 무작위 함수모델이라 불리며 공간적으로 상호간 서로 관계가 존재함을 의미한다.

3.1 지구통계 모델링

기존에 사용된 자료 분석방법인 다변량 통계학은 이격된 거리의 상관관계를 정량화할 수 없는 단점을 가지고 있으므로 서로 다른 지역에 위치한 두 분포가 동일한 평균값과 편차를 갖고있다고 할지라도 기존의 추정 방법으로는 서로 상관된 방식의 차이점을 반영할 수 없다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 위치에 따라 달라지는 자료에 대한 공간적인 분포, 즉 지역변수들의 척도를 베리오그램(variogram)과 공분산값으로 대상구간에 대한 현장 적합모델을 찾아내 정량적인 값을 추정할 수 있다. 지구통계학적 기법은 거리별 분산에 따른

경중률이 고려되어 그 신뢰성을 높일 수 있으며, 이때 공간상에 분포하는 표본자료의 특성은 베리오그램에 의해서 나타나는데, 베리오그램은 공간상에 분포하는 임의의 두 자료값 사이의 차로인해 발생하는 분산으로 구해진다.

$$2\gamma(h) = E(\sum [Z(x) - Z(x+h)]^2) \\ = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

여기서, $2\gamma(h)$ 는 Variogram이고, $\gamma(h)$ 는 semi-variogram이다. 그리고 $Z(x)$ 는 임의의 지점 x 에 있는 자료의 값이며 $Z(x+h)$ 는 $Z(x)$ 에서 h 만큼 떨어진 지점의 자료 값이다. 또한 $N(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 한쌍의 실험자료의 $Z(x_i)$ 와 $Z(x_i-1)$ 의 개수이다.

크리깅에 의한 자료 추정을 위해서는 표본자료의 공분산이 필요한데, 이것은 표본자료의 베리오그램으로부터 얻어진다. 즉, 식 (2)로부터 베리오그램을 해석하기 위해서는 공분산이 필연적으로 발생하게 되는데, 이를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$K(h) = E[Z(x) \cdot Z(x+h)] - m^2 \quad (3)$$

여기서, $m = [Z(x)]$ 이고 x 의 독립적인 유한요소이다. 이로부터 베리오그램을 나타내면 다음 식 (4)와 같다.

$$K(h) = \text{Sill} - \gamma(h) \quad (4)$$

여기서 $K(h)$, $\gamma(h)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 자료들간의 공분산과 베리오그램이다. 실(Sill)은 일정한 영향범위(range)를 넘어서 베리오그램의 상관성이 없어지고 안정된 상태의 베리오그램값을 나타낸다.

3.2 크리깅(Kriging) 이론

지반정수를 위치별, 지역별, 심도별로 추정할 경우 시험 및 조사수량의 한계성 때문에 특별한 경우를 제외하고는 선별적으로 조사될 수밖에 없다. 따라서 임의의 기지값으로부터 미지의 값을 추정할 경우 Interpolation 및 Extrapolation 법을 사용하여 추정하는 방법이 기존에 널리 사용된 분석방법이다. 그러나 가중치나 최소자승법에 의한 기존 추정방법은 상호자료의 연관성이 무시된채 독립적인 요소들을 취합하여 일정한 관계성을 구성하므로 이웃하는 점들간의 고유특성이 반영되지

않은 상태로 나타내게 된다. Kriging은 최선의 선형 불편 추정자(BLUE: best linear unbiased estimator)개념을 적용하는 통계분석 방법으로서 추정값은 주변자료들의 선형조합에 따른 상관성으로부터 구해지는데, 오차의 분산이 최소화되고, 잔류오차가 0이 되는 추정자이다.

보통 대상지역내의 한점 $Z(x_0)$ 에 대한 미지의 참값 $Z(x_0)$ 에 근접된 추정값 $\bar{Z}(x_0)$ 는 주변의 n 개 지지값들 $Z(x_i)$ $i=1, 2, 3, \dots, n$ 을 사용하여 각 점들에게 배분된 가중치 W_i 로부터 선형조합하여 추정할 수 있다.

$$\bar{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (5)$$

여기서, $Z(x_i)$ 는 공간상에 분포하는 표본자료 값이고, W_i 는 $Z(x_i)$ 에 해당되는 가중치이며, $\bar{Z}(x_0)$ 는 크리깅에 의한 추정치로서, 이때 점(x_0)에서는 일정한 오차가 발생하게 되며, 발생 오차량은 식 (6)과 같다.

$$e_0 = \bar{Z}(x_0) - Z(x_0) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) - Z(x_0) \quad (6)$$

양변에 기대값을 취하고 합에 대한 기대값은 각각의 기대값의 합과 같으므로 이에 대해 정리하면 식 (7)과 같다.

$$E[e_0] = E[\bar{Z}(x_0) - Z(x_0)] = \sum_{i=1}^n W_i E[Z(x_i)] - E[Z(x_0)] \quad (7)$$

여기서 $E[e_0]$ 는 오차를 나타내는 편차(bias)로서 불편조건(unbiasedness condition)을 만족시키기 위해서는 크리깅 가중치 추정치가 불편조건(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되어야 한다. 즉, 크리깅의 불편조건 조건은 식 (8)이다.

$$E[\bar{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (8)$$

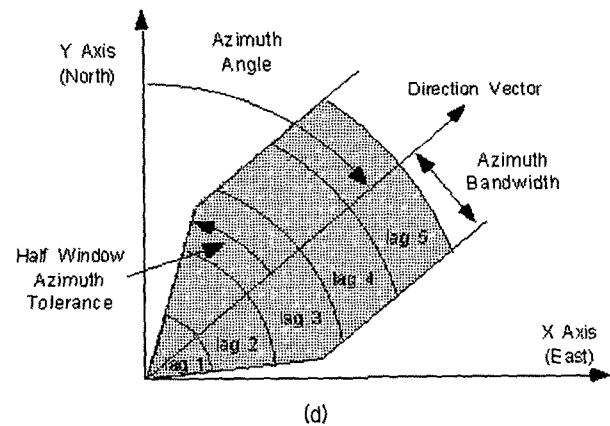
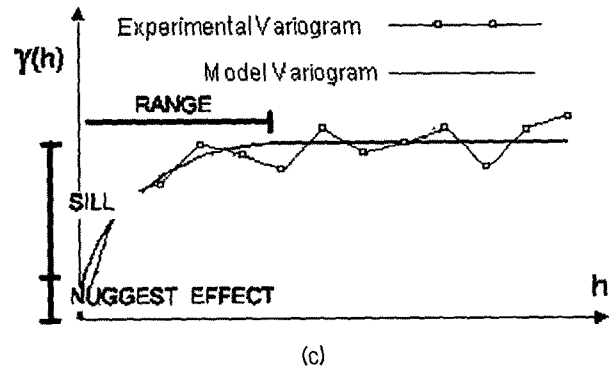
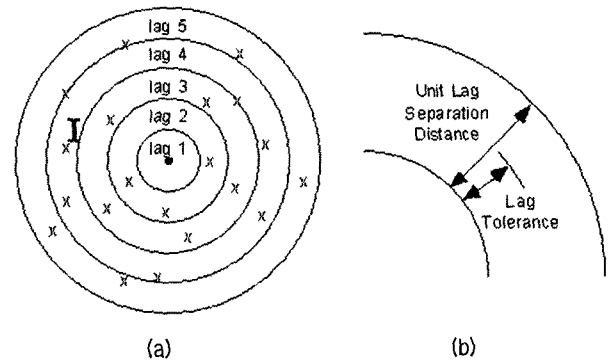
식 (8)의 불편조건을 만족하기 위해서는 각 지지점들에 배분되는 가중치의 합은 1.0이 되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.0 \quad (9)$$

추정분산은 크리깅 분산(Kriging variance)이라고 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_k^2 = E[\bar{Z}(x_0) - Z(x_0)]^2 = C(V, V) + \mu - \sum_{i=1}^n W_i C(v_i, V) \quad (10)$$

여기서 $C(V, V)$ 는 표본자료간의 공분산, μ 는 Lagrange multiplier, $C(v_i, V)$ 는 표본자료와 추정치간의 공분산으로서 표본자료의 베리오그램에서 결정된다. 이에 대한 분석하는 과정과 해석결과를 나타내는 베리오그램 분석과 공간적 샘플값의 방향성을 분석하는 방법을 보면 그림 2와 같다. 그림 2에서 (a)는 임의 지지점을 중심으



(a) 임의 지지점을 중심으로 모든방향으로 lag별 공간거리, b: 이격거리와 lag의 허용치, c: 대표적 베리오그램 모델과 Sill, 그리고 영향거리, d: 방향별 분석 방향벡터와 lag 이격거리)

그림 2. 크리깅 기법 분석에서 측정치의 상관성 및 방향성 분석법

로 모든 방향(360도)으로 lag별 공간거리를 의미하고 (b)는 이격거리와 lag의 허용치를 표현한다. 그리고 (c)는 대표적인 이론과 실험 베리오그램 모델과 Sill, 그리고 영향거리를 나타내고 있으며 (d)는 방향별 분석 방향 벡터와 lag 이격거리의 관계를 표현한다.

4. 조사지역의 지반특성

본 연구를 위해 조사된 지역은 경상남도 동남해안 해

상지역으로서 시추조사 간격은 200m~250m이며, 시추 조사와 병행하여 피조콘 관입시험과 현장배인시험을 실시하였다. 콘관입시험은 조사위치의 개략적인 지층상태를 파악하면서 연속적인 지층이 파악되도록 시추공 내에서 실시하였다. 이와 별도로 같은 위치에서 현장 배인전단시험을 실시하였다. 그리고 불교란 시료가 채취된 위치에 대해서도 실내역학시험을 별도로 실시하였으며, 현장에서 조사된 위치 및 수량은 다음 그림 3과 같다.

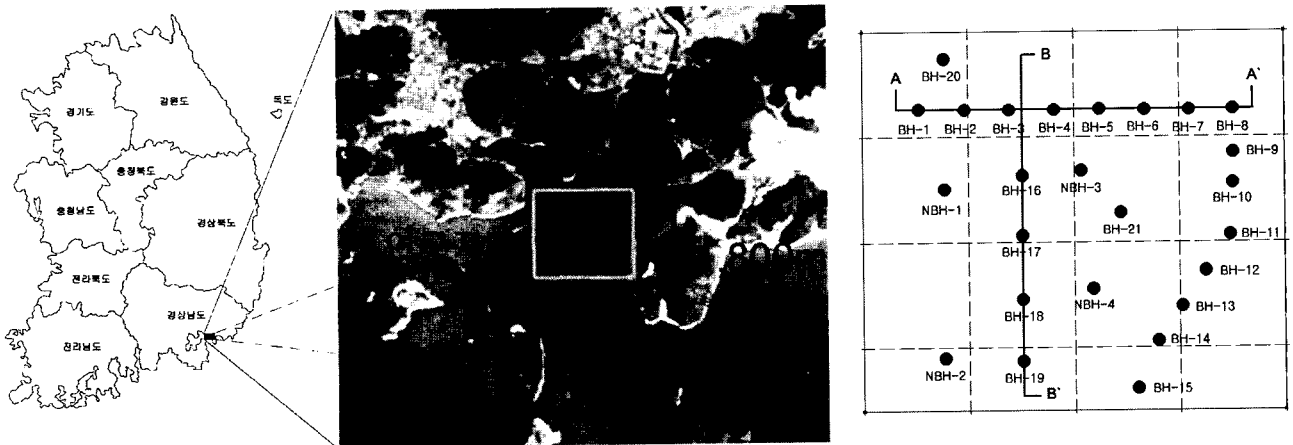


그림 3. 연구대상 조사지역의 위치도

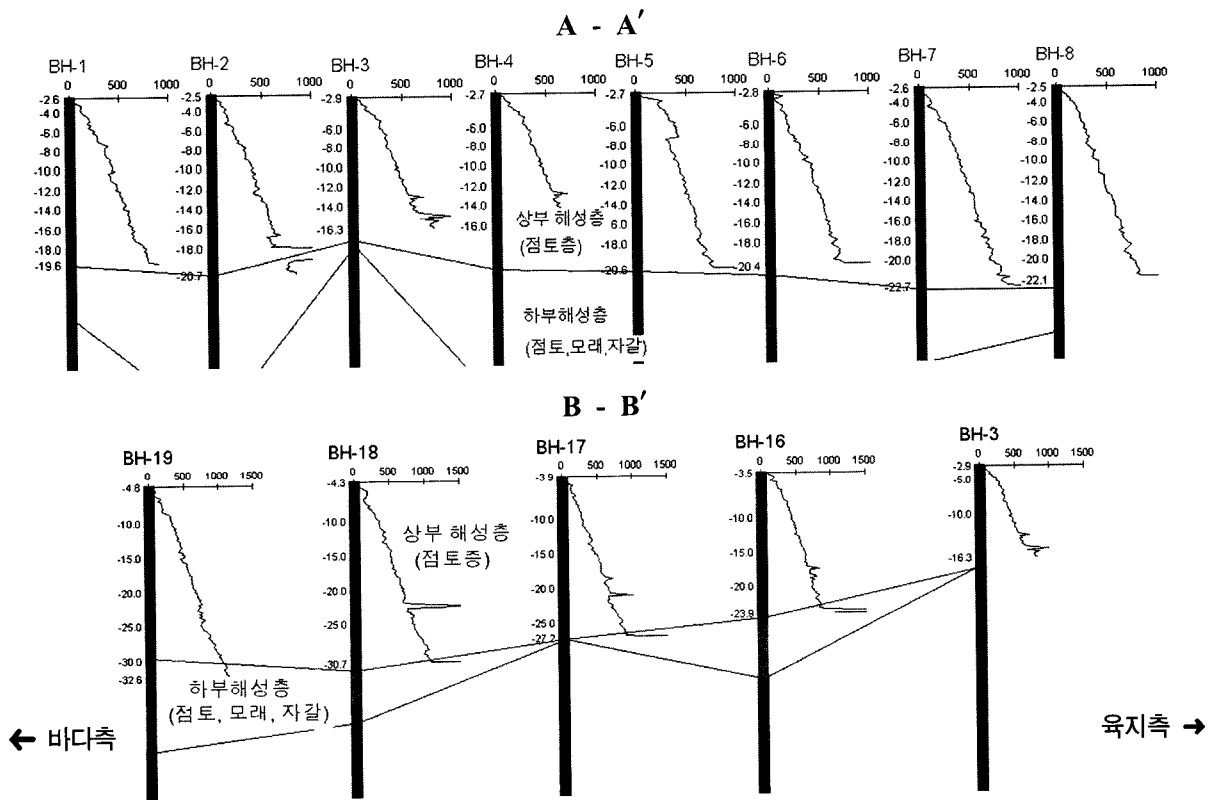


그림 4. 보링조사 위치에서 해성점토 분포 단면 주상도

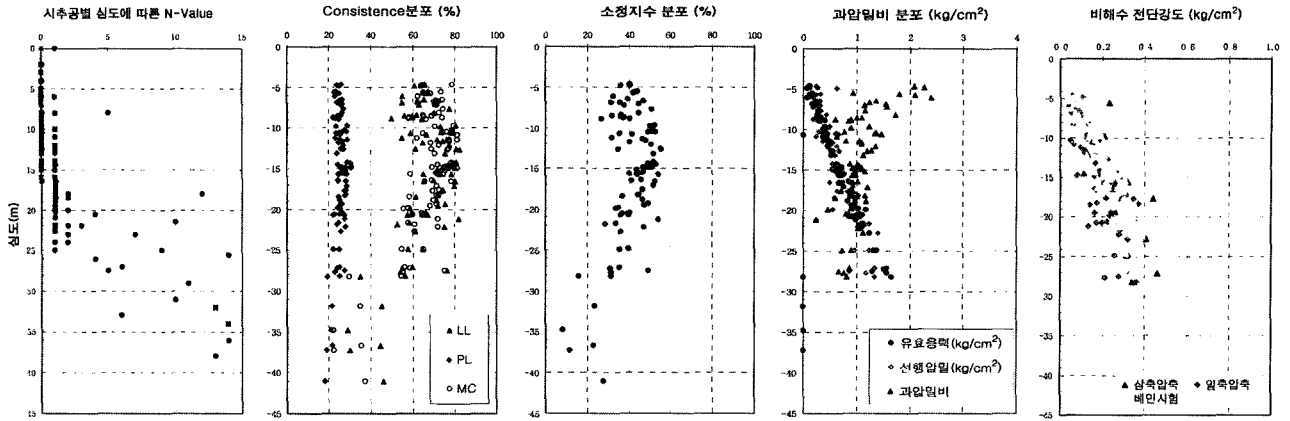


그림 5. 조사위치의 해성점토의 공학적 특성

표 1. 지반조사의 내역 자료

구 분	시추조사	피조콘시험	삼축압축시험	현장베인시험
B 지역	25 개소	25 개소	10 회	25개소/124회

한편 시추조사 및 콘관입시험을 통해 나타난 지층현황을 보면 그림 4와 같이 상부로부터 해성퇴적층이 상부층과 하부층으로 구분되어 나타나며, 그 하부에 잔류토와 기반암이 출현한다. 그림 3의 보링위치별로 주상토를 살펴보면 다음 그림 4와 같다. 그림 5에는 현장지반의 개별적인 지반특성을 보면 연약 점성토층의 컨시스턴스는 자연함수비가 대체로 액성한계를 초과하여 대단히 연약한 상태로 존재한다. 해성점토의 소성지수는 30~50을 보이며, 소성지수가 증가할수록 액성한계와 점토의 함유율은 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

해성퇴적층은 흙분류상 CL-CH로 나타나며, 활성도는 0.75~1.25 사이의 분포를 나타내는 것으로 미루어 볼 때, 점성토의 주성분은 Illite 계인 것으로 예측된다. 또한 지반의 비배수전단강도는 대체로 심도에 따라 선형으로 증가하는 것으로 나타났다. 과압밀비는 상부 해성층에서 1.0~2.3으로 나타나 일부 정규압밀 및 과압밀층으로 구성된 것으로 나타났는데, 이것은 해수의 수압에 의한 것으로 판단된다.

5. 조사자료의 불확실성 분석

연구 대상위치에서 수행한 지반조사 자료에 대해 기존 분석방법과 그 차이를 비교하기 위해서 지구통계학적 기법(Geostatistics Method)의 일종인 Ordinary Kriging 방법을 이용하여 연약지반두께와 비배수전단

특성에 대해 분석하였다. 크리깅(Kriging)방법은 상업용 프로그램인 지하수 및 지질분포특성을 3차원적으로 해석하는 GMS(Groundwater Modeling System) Program과 Surfer 7.0을 사용하여 분석하였다.

5.1 연약지반의 분포

일반적으로 연약지반 판단기준은 대상지역에 놓일 구조물의 상재하중과 지반의 연경도와의 상관관계로부터 판단하므로 일률적으로 설정할 수 없으나, 대체적으로 국내에서는 표준관입시험 기준에 의거 결정하고 있다. 따라서 본 검토도 일정한 기준에 의해 국내에서 적용하고 있는 판단기준에 따라 N치가 7이하로 가정하여 판단하였다. 이로부터 해성퇴적층내 상부 점토층(N>7)의 분포특성을 파악하기 위해 시료채취 자료만을 이용한 기존분석 등고선도와 Kriging의 결과로 부터 얻은 등고선도를 비교 검토하였다.

조사분석에 대한 지역의 경계영역은 조사지점을 모두 포함토록 하였으며(2,000m×1,800m) 자세한 조사지점의 좌표점과 상부 해성퇴적층의 분포두께는 표 2와 같다.

상기 좌표에 대해 본 구역내 연약지반 심도를 등고선으로 표현하고자 베리오그램 모델을 사용하여 비교 검토한 결과는 그림 6과 같으며, 가우시안(gaussian model)이 비교적 지역모델로 적합한 것으로 나타났다.

기존의 일반적인 분석법과 본 연구에서 도입한 크리깅 방법으로 비교분석한 결과는 그림 7과 같다.

기존의 분석법은 대부분이 제한된 자료의 범위내에서 자료의 거리별 불확실성을 고려하는 적절한 모델을 사용하지 않으며 조사위치내의 값은 통상 평균치를 적

표 2. 조사대상의 연약층 분포두께

공 번	x	y	depth	공 번	x	y	depth	공 번	x	y	depth
BH-1	178,768.79	177,629.22	17.0	BH-10	180,253.82	177,227.48	21.8	BH-19	179,256.97	176,433.83	24.8
BH-2	178,983.41	177,628.51	18.3	BH-11	180,241.16	177,032.69	23.5	BH-20	178,886.92	177,870.15	23.2
BH-3	179,194.09	177,628.25	14.7	BH-12	180,124.61	176,861.45	25.1	BH-21	179,723.41	177,139.51	24.0
BH-4	179,410.18	177,628.02	17.9	BH-13	180,013.97	176,695.86	25.6	NBH-1	178,887.59	177,250.01	20.5
BH-5	179,622.83	177,629.33	18.0	BH-14	179,899.34	176,531.93	27.6	NBH-2	178,887.98	176,448.34	26.5
BH-6	179,836.26	177,628.37	18.6	BH-15	179,802.12	176,305.04	28.0	NBH-3	179,534.43	177,336.75	19.2
BH-7	180,048.64	177,628.60	20.4	BH-16	179,257.37	177,313.85	21.4	NBH-4	179,591.53	176,778.17	27.0
BH-8	180,255.89	177,629.06	20.4	BH-17	179,255.63	177,028.32	23.5				
BH-9	190,255.74	177,421.82	21.8	BH-18	179,256.01	176,728.94	27.5				

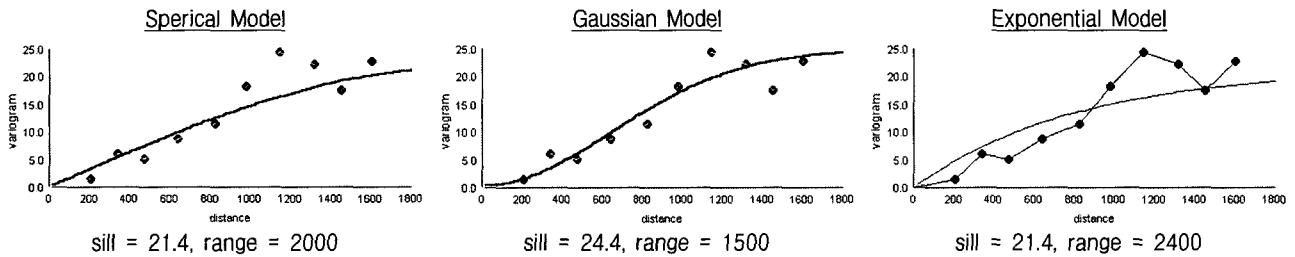


그림 6. 조사지역에 대한 베리오그램 모델

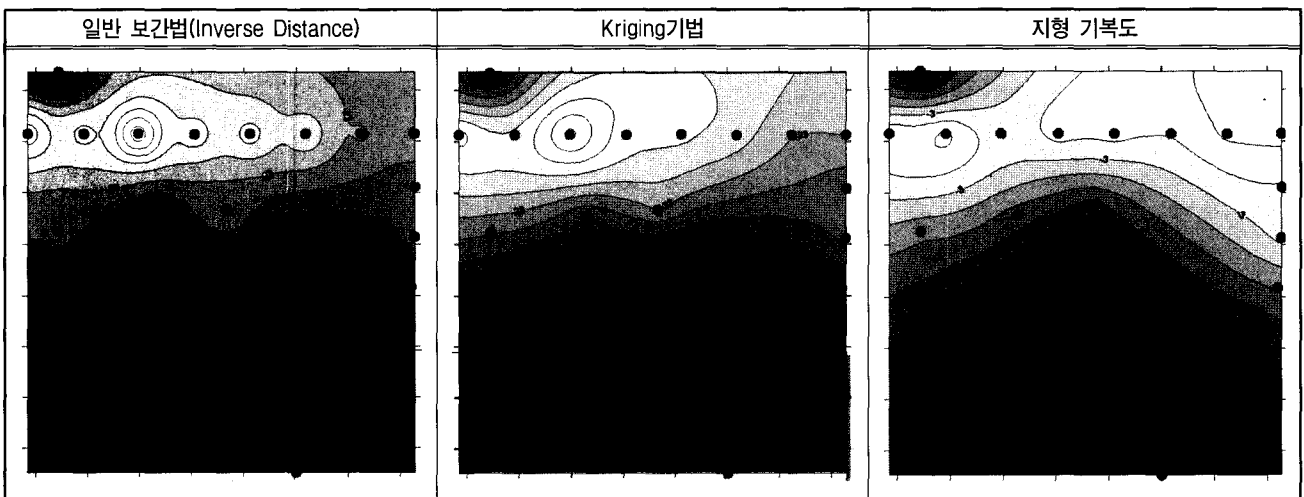


그림 7. 연약지반의 공간적 분포 특성

용시킨다. 그리고 미지의 값을 추정할 경우에는 지반의 공간적 변이성에 대한 적절한 보정을 통하지 않고 값이 선정되어 왔다. 이에 비하여 크리깅(Kriging)기법은 이 격거리별 추정선의 신뢰성을 나타낼 적절한 모델을 통하여 산정하므로 미지의 값을 구하거나 등고선을 추정한 결과도 실제 지형현황과 보다 유사한 형태로 나타났다. 즉, 지형도 상의 북측의 육지와 인접한 지형적 특징을 감안하면 Kriging기법으로 추정한 연약층 두께 분포도가 지형특성과 유사함을 발견할 수 있다.

5.2 연약층의 전단강도 분석

본 연구대상 구간에서 실시한 실내 삼축압축시험과 원위치시험인 베인시험으로 추정한 비배수전단강도에 대해 기존 분석방법인 선형회귀분석법과 Ordinary Kriging법의 방향성 분석과 기울기를 비교하고 검토하였다.

5.2.1 전단강도의 이방성 분석

조사 보링공별 전단강도에 대한 심도별 기울기 값에 대한 베리오그램 모델을 구현하기 위하여, 그리고 지반

의 이방성을 나타내는 방향별 Variogram을 찾고자 본 논문에서는 Direction Vector에 대한 방위각(azimuth angle)을 변화시켜 각 방향에 대한 베리오그램을 22.5°의 등각으로 회전하여 베리오그램 모델을 추적하였다. 이 때 Direction Vector의 Azimuth Bandwidth는 공간간격을 고려하여 수평방향 거리를 500m로 결정하였으며, 계산시 구역전체 면적이 2,000m×1,800m인 점을 감안하여 이격(lag)간격은 200m로 결정하였다. 그래서 각 방향에 대한 베리오그램에 대한 추정된 결과는 그림 9와 같다. 그림 8은 각 조사공에서의 전단강도 증가값(기울기)에 대한 상관도를 각 방향에 따라 분석한 베리오그램에서의 영향거리 분포 값이다. 각 방위각에 대한 베리오그램은 대체로 동서방향으로 영향거리 값이 800m~1,200m

내외로 판단되어 남북방향의 600m~950m보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 표 3은 25개 보잉공에 대하여 각각의 베리오그램 분석을 통하여 얻은 전단강도에 대한 기울기를 나타내고 있다. 기울기는 BH-5의 최소 0.1021에서 BH-13의 최대 0.2169이 판정되었다. 표 3에서도 알 수 있듯이 보링 위치별로 전단강도의 기울기도 비교적 유사한 값을 보이고 있다.

이러한 위치별 방향성은 해안선과 일치하게 전단강도값도 어떠한 경향을 일정하게 나타내며 남측방향으로 전단강도의 증가량이 작아지는 것을 알 수 있다. 전단강도의 이방성 특성을 감안한 크리깅 방법으로 구한 연구대상 지역의 전단강도 증가치의 분포도는 그림 9와 같다. 그림 9에서 하나의 등고선 수치는 0.01t/m²이며 지

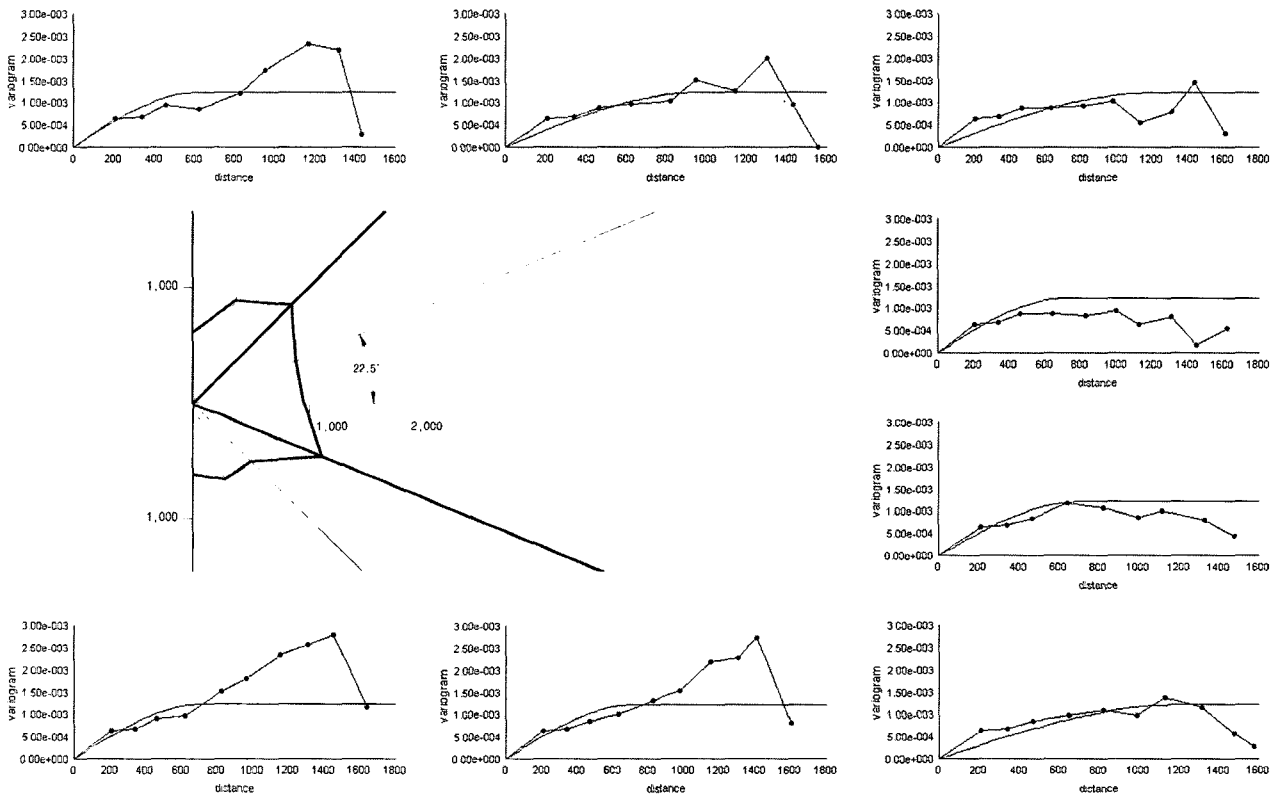


그림 8. 각 방향별 베리오그램 모델

표 3. 전단강도의 심도별 기울기

공 번	기울기	R ²	공 번	기울기	R ²	공 번	기울기	R ²	공 번	기울기	R ²
BH-1	0.1558	0.8810	BH-8	0.1218	0.5862	BH-15	0.1359	0.8230	NBH-1	0.1414	0.2400
BH-2	0.1961	0.9338	BH-9	0.1825	0.7664	BH-16	0.1400	0.8019	NBH-2	0.1666	0.9567
BH-3	0.2163	0.5084	BH-10	0.1228	0.9233	BH-17	0.1497	0.9567	NBH-3	0.1808	0.8403
BH-4	0.1937	0.9945	BH-11	0.1498	0.8039	BH-18	0.1520	0.8272	NBH-4	0.1230	0.7093
BH-5	0.2169	0.7058	BH-12	0.1350	0.9821	BH-19	0.1176	0.2143			
BH-6	0.1856	0.9034	BH-13	0.1159	0.9801	BH-20	0.1555	0.4623			
BH-7	0.1838	0.9499	BH-14	0.1021	0.4532	BH-21	0.1129	0.2588			

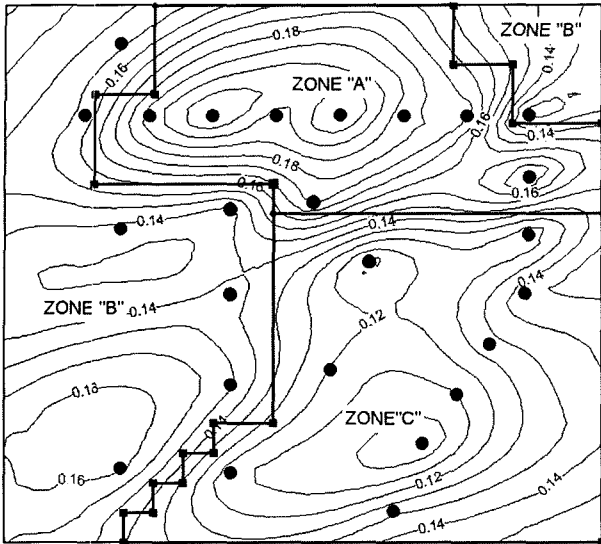


그림 9. 연구지역의 공간적 전단강도분포 특성

역 A, B, C로 구분하여 전단강도 분포를 표시하였다. 크리깅 방법으로 나타난 기울기 등고선도는 각 지역별

(지역 A, B, C)로 최대값(지역 A; 0.22)과 최소값(지역 A; 0.14)의 차이가 1.6배 이상 차이를 보이고 있다. 즉, 기존의 분석방법이 전체구간에 대한 대표값을 찾는 데 비하여 크리깅 방법은 분석구간의 지역적 분포특성에 따른 구역(zone)을 구분할 수 있는 장점이 있다.

5.2.2 깊이별 베리오그램의 방향성 평가

조사대상 지역의 각 방향에 대한 베리오그램 모델은 22.5°의 등각으로 회전하여 평가하였으며 그 결과는 그림 10과 같다. 앞의 표 3과 같이 각 방향에 대한 선단저항치의 연관성을 보이지 않고, 분산이 심하게 나타났다. 그리고 선단저항치가 깊이 5.0m~10.0m구간에서 남북 방향으로 연관성이 존재하며 깊이 20m~25m구간에서는 동서방향으로 연관성을 보였다. 대체로 깊이 5.0~15.0m구간에서의 분산값이 적게 나타났으며 20m까지는 연관성이 있음을 알 수 있었다. 이는 위치에 따라 연약지반의 심도 차이에 의한 것으로 판단된다.

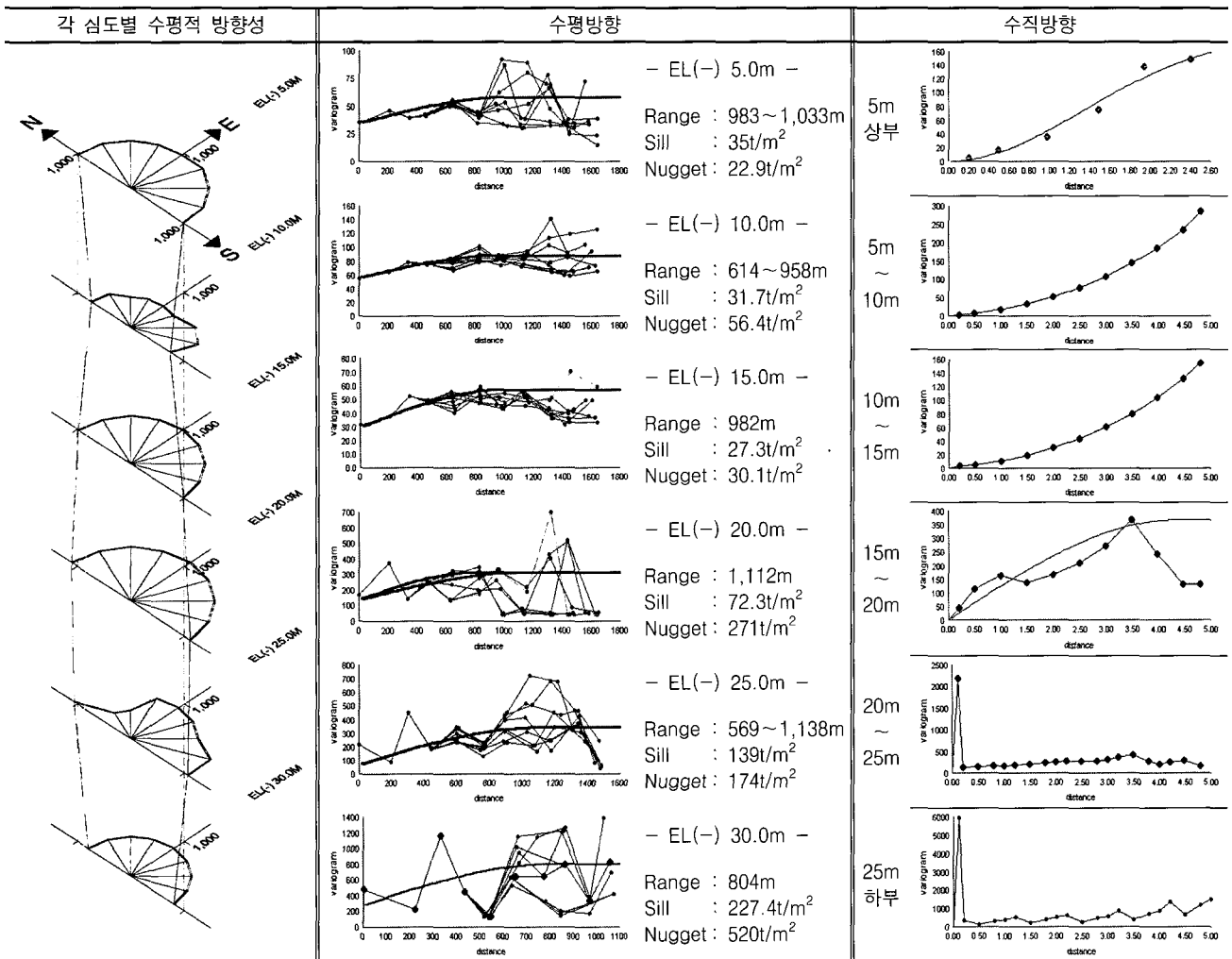


그림 10. 조사지역의 심도별 베리오그램의 분포특성

5.3 연구현장에서의 콘계수 분석

콘관입시험에 따른 지반의 비배수 전단강도를 구할 경우 콘 계수는 지반조건에 따라 추정방법별 지역별로 그 차가 크므로 대표값을 찾기가 쉽지 않다. 따라서 신뢰성있는 대표값을 찾고자 지구통계방법으로 콘관입시험에 따른 콘계수 산정시 기존 분석방법과 Kriging기법을 통해 유도된 값을 비교 분석하였다. 이를 위하여 연구지역의 공간적인 콘 계수의 분포특성을 일반적인 보간법과 Ordinary Kriging기법에 의한 분석결과를 비교, 검토하여 지구통계학적 방법의 신뢰성을 검증하였다. 분석자료는 본 연구지역에서 실시된 25개 콘관입 시험 결과를 토대로 각 조사공별 심도별 콘 계수를 분석하였으며 그 자료는 다음의 표 4와 같다.

조사공별 대표 콘 계수에 대한 베리오그램 분석결과는 다음과 같다. 콘 계수에 대한 베리오그램 분석시 Max Lag는 710m로 각 Lag폭을 200m를 기준으로 분석을 실시하였다. 그림 11에서와 같이 베리오그램을 통한 콘 계수의 이격거리에 따른 베리오그램 모델은 지수함수의 관계를 보이며, range값이 450m로 나타났다. 일반보간법과 콘 계수 분석시 구해진 베리오그램을 통한 Kriging 방법에 의한 심도별 콘 계수 분포특성은 아래 그림 12와 같다. 일반보간법과 Kriging에 의한 콘계수 분포특성을 검토한 결과 일반보간법(Inverse Distance to a Power)에 비해 Kriging에 의한 등고선 간격이 넓게 도시되며 이는 베리오그램에 의한 상관거리를 고려한 결과임을 알 수 있다.

또한 비배수 전단강도 분석결과와 유사한 양상으로 대상구간 동남측이 비교적 콘 계수값이 큰 것을 알 수 있고, 남서에서 북동방향으로 주변에 비해 콘 계수 값이 작은 지역이 선형으로 분포하는 것을 관찰할 수 있으며, 근해의 지형적 방향성과 일치함을 알 수 있다. 아울러, 시험자료 분석시 일반적으로 사용되는 시험자료의 직접적인 통계분석과 Kriging기법에 의해 유도된 미조사된 지점의 추정값을 포함한 자료분석 결과는 다음 표 5와 같다.

위의 표 5에서 보는 바와 같이 일반적인 크리깅 방법에 의한 콘 계수값이 샘플 데이터에 의한 직접적인 통계 처리시 보다 작게 나타났다. 두가지 분석결과는 서로 표준편차 이내에 분포하며 크리깅 기법에 의해 구한 콘계수(N_k)는 13으로 나타났다. 그리고 콘 계수 산정식에서의 비배수 전단강도값과 그에 대응하는 “선단저항치수 직응력”값을 다음의 그림 13과 같이 도시하여 그 기울기로 콘계수를 산정한 결과 콘계수값은 $N_k=13.89$ 로 나타났다. 이상과 같이 본 연구지역에서의 콘관입시험에

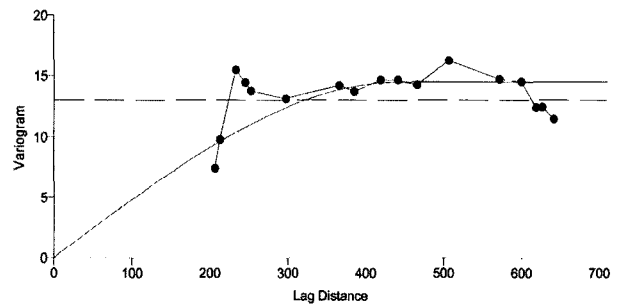


그림 11. 콘 계수값의 베리오그램 모델

표 4. 각 조사공 별 콘 계수(cone factor)

공 번	콘관입 측정빈도	콘 계 수			공 번	콘관입 측정빈도	콘 계 수		
		평균값	중간값	표준편차			평균값	중간값	표준편차
BH - 1	86	16.25	16.61	3.91	BH - 14	138	22.36	23.06	4.46
BH - 2	78	11.31	11.85	2.94	BH - 15	140	12.50	13.70	3.85
BH - 3	68	14.28	14.14	3.16	BH - 16	104	19.52	19.19	5.78
BH - 4	91	15.54	13.11	7.13	BH - 17	118	10.62	11.03	5.11
BH - 5	92	10.96	10.00	8.09	BH - 18	133	12.87	12.78	6.47
BH - 6	88	11.18	11.63	2.49	BH - 19	140	14.71	15.87	3.85
BH - 7	102	12.03	12.57	3.32	BH - 20	97	12.99	13.73	3.28
BH - 8	97	19.35	19.23	3.84	BH - 21	120	22.08	22.35	4.92
BH - 9	101	12.81	12.93	2.18	NBH - 1	104	14.01	13.32	5.25
BH - 10	116	15.57	16.80	6.08	NBH - 2	133	12.78	12.20	2.94
BH - 11	118	14.92	15.32	4.54	NBH - 3	95	9.41	9.66	1.85
BH - 12	125	16.41	17.21	4.78	NBH - 4	134	14.88	15.52	3.77
BH - 13	134	21.92	22.04	6.57					

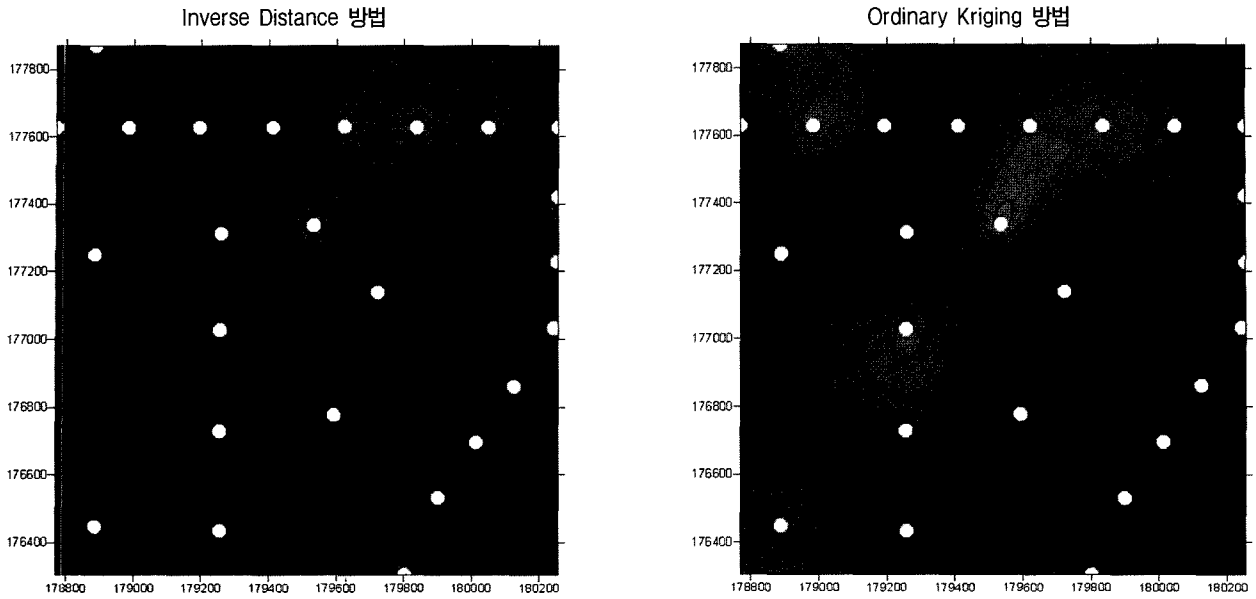


그림 12. 일반보간법과 Kriging방법에 의한 콘 계수

표 5. 샘플값과 Kriging기법에 의해 추정된 값을 포함한 자료의 분석결과

샘플 데이터에 의한 도수분포			Kriging에 의해 구해진 값의 도수분포		
입력 값	2.75		추정 값	8.34	
평균 값	14.20		평균 값	13.09	
중간 값	14.18		중간 값	15.52	
표준편차	5.27		표준편차	8.38	

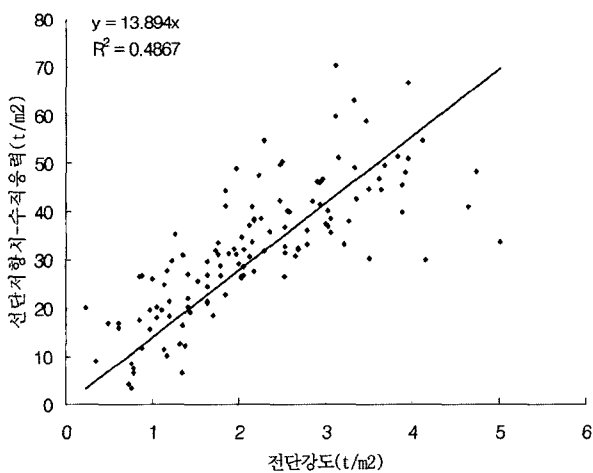


그림 13. 전단강도와 콘저항치를 이용한 콘 계수 비교

의한 선단저항치를 통해 비배수 전단강도를 구할 경우 대체적인 콘계수값은 $N_k=13\sim14$ 를 적용하는 타당할 것으로 판단된다. 그림 13은 각 조사공에서의 전단강도 증가값(기울기)에 대한 상관도를 각 방향에 따라 분석한

베리오그램에서의 영향거리(range)분포 값이다. 앞장에서 설명했듯이 베리오그램은 대체로 동서방향으로 영향거리가 800m~1.200m내외로서 남북방향인 600m~950m보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이러한 방향성은 해안선과 병행하여 전단강도값이 일정한 값을 나타내며 남측방향으로 전단강도의 증가량이 작아지는 것을 알 수 있다.

6. 결론

- (1) Ordinary Kriging기법을 통한 해성점토층의 분포특성을 분석한 결과, 일반적인 보간방법보다 그 분포특성이 해안선과 평행한 방향으로 일정한 증가추이를 보이는 것이 뚜렷하게 나타났으며 비교적 지형특성과 부합되게 나타났다.
- (2) 전단강도의 심도별 기울기에 대해 공간적 분포특성과 그에 따른 방향성을 검토한 결과, 방향성을 띠는

것으로 나타났다. 기존 분석법과 분포특성을 비교한 결과, Ordinary Kriging으로 구한 방법은 3개 지역으로 구분될 수 있었으며, 각 지역 기울기는 기존 분석값에 비해 1.03~0.80배의 편차를 보였다.

- (3) 선단 저항치에 대한 심도별 샘플자료의 분산값을 비교한 결과, 지표면 아래 20.0m내외에서 상관성이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이는 연약층의 분포심도와 해상점토층의 점이적 성분변화에 기인하는 것으로 판단되었다.
- (4) 크리깅 기법에 의한 콘계수의 분포특성을 검토한 결과, 베리오그램은 지수모델의 형태를 띠며, 영향거리 값은 약 450m로 나타났다. 또한 분포특성은 근해로 유입되는 수계의 방향과 주변 산지의 연장선상으로 그 분포특성이 좌우됨을 확인할 수 있었다.
- (5) 실측값의 회귀분석방법과 크리깅 기법에 의한 추정 콘 계수의 평균값은 각각 14.2와 13.10로 나타났다. 크리깅으로 구한 값이 일반적 통계분석에 의한 값에 비해 작게 나타났다. 그리고 콘 계수 산정식에서 비배수 전단강도값과 대응하는 “선단저항치-수직응력” 값을 도시하여 그 기울기로 콘 계수를 산정하는 경우에 콘 계수값은 대체로 $N_k=13.89$ 로 나타났다.
- (6) 크리깅 기법을 통한 시험자료의 해석은 특성 공간좌표에 따른 공간적 자기상관성을 찾을 수 있어, 특정 방향에 대한 시험자료의 상관성이 임의 지역에 대한 추정값에 적용되어 보다 구체적이며 신뢰성 있는 분포양상을 제시한다. 이러한 분석기법은 대상지역의 강도값이나, 암반선의 특성 분포양상을 밝히는 데는 유용하게 사용될 수 있다고 판단되었다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구원에서 2001년부터 수행하는 해양수산부 국책과제인 “차세대 항만설계 기술 개발”의 연구 결과의 일부입니다. 연구지원을 해주신 해양수산부 항만국 기술안전과 담당자에게 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 윤길림 (2000), “지반조사시 토질의 불확실성 분석”, 새로운 지반 조사 및 평가 분석기술 국제세미나, 한국건설기연구원 국제심포지엄 논문집, pp.101-130.
2. 윤길림 (1997), “Estimations of Spatial Variability of Cone Resistance Using Geostatistics”, *Korean Geotechnical Journal*, Vol.13, 1권, pp.15-39.
3. Asoake A. and A-Grivas D. (1982), “Spatial Variability of The Undrained Strength of Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, pp.743-754.
4. Baecher, G. (1982), “Statistical Methods in Site characterization”, *Proceedings of Engineering Foundation Conference on Updating Subsurface Sampling and testing*, Santa barbara, USA, pp.463-491.
5. Chiasson P., Lafleur J., Michel Soulie, and Law K. T. (1995), “Characterizing Spatial Variability of a Clay by Geostatistics”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, pp.703-729.
6. Matheron G. (1963), “Prinsiple of Geostatistics”, *Journal of Economic Geology*, Vol.58, pp.1246-1266
7. Ravi, V. (1992), “Statistical Modelling of Spatial Variability of Undrained Strength”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp.1992.
8. Wu and El-Jandali (1985), “Use of Time Series in Geotechnical Data Analysis”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.8, No.4, pp.151-158.

(접수일자 2004. 5. 21, 심사완료일 2005. 2. 1)