

침하예측방법들을 이용한 부산신항만 현장 침하 분석

Analysis of the settlement of Pusan New Port construction site using the settlement prediction methods

박현일¹⁾, Hyun-Il Park, 김하영²⁾, Ha-Young Kim

¹⁾ 삼성건설 기술연구소 수석연구원, Engineer Researcher, Samsung C & T, Research Center

²⁾ 삼성건설 품질경영실 차장, Deputy General Manager, Samsung C & T, Quality Management Division

SYNOPSIS : Embankment preloading, in conjunction with prefabricated vertical (PV) drains, was used to accelerate consolidation of marine clays in Pusan New Harbour project. UP to eighteen settlement plates were installed at the ground reclaimed site under the embankment fill to monitor the preload performance. This analysis is carried out by five settlement prediction methods including the Asaoka, Hyperbolic, Hoshino, and back-analysis method based on optimization. The field settlement data can be analysed by settlement prediction methods to predict the ultimate settlement and the degree of consolidation of the reclaimed land under charge fill. The authors compared with the analyzed results of the methods.

Keywords : consolidation, back-analysis method, asaoka method, hoshino method, hypebolic method

1. 서론

해안연약지반 개량으로 수직배수재를 설치한 후 성토하중을 재하하는 공법이 가장 널리 이용되고 있다. 그러나, 설계단계에서 예측된 침하거동과 시공 중에 관측된 거동이 서로 상이한 경우가 많다. 따라서 현장에서는 지표면 침하관 및 층별 침하계를 설치하고 계측관리를 통하여 데이터를 분석하여 예상되는 최종 침하량, 임의 시점에서의 압밀도 등을 평가한다. 이러한 침하분석에 이용되는 방법으로 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법 등을 들 수 있으며, 최근에는 최적화 기법에 근거한 역해석법들도 제안되고 있다. 부산신항만 북컨테이너 2-1단계에서 안벽 배후 육상부에 대하여 수직배수재(PVD)를 설치한 후 재하성토를 통하여 지반개량공사를 수행하였다. 구역별로 총 18개 침하관을 설치하여 성토하중에 의한 침하를 16개월 이상 침하계측을 수행하였다. 저자들은 본 현장의 연약지반 개량에 관한 침하분석 지원을 16개월 가량 지속적으로 수행하였다. 본 연구에서는 실측침하 해석기법 중에서 가장 많이 사용되고 있는 쌍곡선법, Asaoka법 및 Hoshino법과 역해석법(박현일 등, 2006)을 사용하여 계측침하 자료에 대한 분석을 수행하여 각 기법에 의한 최종침하량과 압밀도를 예측하고, 각 방법들의 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 부산 신항만 현장

부산신항 2-1단계는 북컨테이너 터미널 총 13선석 중 9선석 구간에 해당되며 부산시 강서구 송정동 및 경남진해시 용원동 해역에 위치하고 있고 공식적인 사업의 명칭은 부산신항 북컨테이너터미널 축조공사이다. 부산 신항만 북컨테이너 현장에는 SD(Sand Drain) 및 PBD(Plastic Board Drain)를 설치한 후 성토하중을 재하하는 지반개량 공법이 적용되었다(그림 1 참고). 점토층은 옥망산 부근에서 5m

정도이며, 깊은 심도는 대략 57m로서 매우 깊은 층후를 갖고 있다. 지반개량을 위하여 샌드매트 포설 이후에 PBD는 1.2m 간격으로 설치된 이후 성토재하가 적용되었다. 지반 개량기간은 대략 18개월 정도이며, 설계하중은 용도에 따라 $35\sim 80\text{kN/m}^2$ 이며, 설계조건은 설계하중 재하 시 1차압밀 잔여침하량이 10cm 이내 및 제거시점 압밀도 90% 이상이 만족되어야 한다.

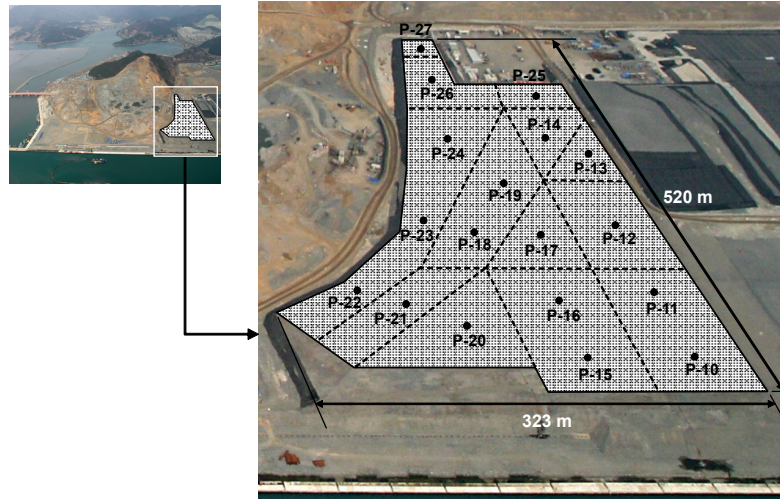


그림 1. 부산 신항만 북권 2-1단계 지반개량 구역 단면도

3. 현장침하 분석법

수직배수재로 개량된 연약지반에 재하성토를 적용할 경우 설계단계에서 예측된 침하거동과 시공 중에 관측된 거동이 서로 상이한 경우가 많다. 이는 지반의 불균질성 및 이방성, 해석해의 결함 등으로 실제 거동과는 잘 일치하지 않는 것이다. 이를 보완하기 위하여 시공 현장에서는 시공 중 압밀도와 성토제거 시기를 결정하는데 실측 침하자료를 분석할 수 있는 침하예측기법들을 사용하고 있다. 침하예측기법으로 Asaoka법(1978), 쌍곡선법(Tan, 1991), Hoshino법(1962) 등이 있으며, 최적화 기법에 근거한 역해석법(김윤태 등, 1994; 박현일 등, 2006)도 제안된 바 있다. 본 연구에서는 Asaoka법(1978), 쌍곡선법(Tan, 1991), Hoshino법(1962) 및 역해석법(박현일 등, 2006)을 사용하여 현장 계측자료를 분석하고, 각 방법들의 정확성 및 적용성을 서로 비교하였다.

3.1 Asaoka법

아사오카(1978)는 수직배수재가 설치된 압밀 문제를 해결하기 위하여 방사형 배수에 대한 Barron(1948)의 압밀해를 수정하여 경험식을 제안하였다. 아사오카법은 지반이 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 따른다는 가정하에 선형적인 침하관계를 도출하였다. 아사오카 법은 수직배수재가 설치된 해상점토준설매립지반의 압밀도 평가에 다수 적용되고 있다.

3.2 쌍곡선법

쌍곡선법은 실측한 침하량 곡선을 바탕으로 향후 발생하는 침하곡선의 연장선이 쌍곡선이 될것으로 가정하여, 초기의 실측침하량으로부터 장래 침하량을 예측하는 방법이다. 이 방법을 이용하기 위해서는 경과시간($t-t_0$)과 경과시간에 대한 침하량 비($s-s_0$)를 그래프로 나타내어 좌표점들에 대한 선형회귀분석을 수행하여 회귀직선의 기울기, β 와 y 절편, α 를 구한다.

3.3 Hoshino법

Hoshino(1962)는 Terzaghi의 압밀이론에서 초기 침하는 시간의 평방근에 비례하지만, 현장에서는 전단에 의한 유동변형이 포함된 전체침하량은 시간의 평방근에 비례한다고 가정하였다. 성토 종료 후 경과시간($t-t_0$)동안의 실측침하량($S-S_0$)을 바탕으로 $t-t_0$ 와 $t/(S-S_0)^2$ 의 관계를 plot하여 기울기와 y 절편을 구하여 침하예측 관계식을 도출할 수 있다.

3.4 역해석법

박현일 등(2006)은 방사형 배수에 대한 Barron (1948)의 압밀해에 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 적용하여 역해석법을 제안하였다. 최적화 과정에 사용된 목적함수값은 직접법에 근거하여 계측 침하자료와 예측침하값의 차의 합으로 정의하였다. 최적화 과정을 통해 도출되는 모델계수 값은 대상 지반의 각 층의 압축지수값과 압밀계수값이다. 본 연구에서 대상으로 삼는 현장 지반은 설계 시에 이층 점토 지반으로 구분하였으므로, 각 층당 2개씩 총 4개의 모델계수값을 역해석으로 구하였다. 침하자료에 대한 역해석으로 구해진 모델 계수를 사용하여 성토제거 시점의 압밀도 및 설계하중 재하 시 잔류침하량을 예측하였다.

4. 비교 분석

본 연구에서는 네 가지 침하예측방법을 사용하여 총 18개 계측자료(그림 1 참조) 가운데 P-17, P-18 및 P-19 지점을 제외한 15개 지점에서 계측된 침하자료에 대한 분석을 수행하였다. 그림 2에는 각 계측 지점들에서 계측된 최종침하량과 각 예측방법들에 의하여 구해진 최종침하량 값이 서로 비교되어 있다. 쌍곡선법과 Hoshino법에 의한 최종 침하량은 연약지반 심도 변화에 관계없이 계측된 최종침하량보다 평균적으로 8% 및 11.5% 정도 크게 예측되었다. 역해석법의 최종예측침하량은 최종계측침하량보다 평균적으로 2.6%정도 크게 예측하였다. Asaoka법의 경우, 평균적으로 0.3%정도 미소하게 크게 예측하였지만, 계측지점별로 과소 혹은 과다 평가하는 정도의 차가 상당히 크게 나타났다.

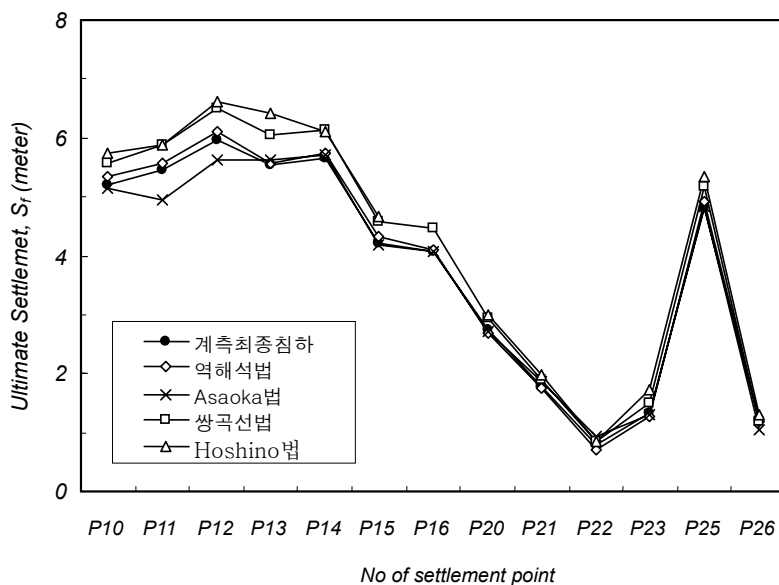


그림 2. 각 예측방법별로 구해진 개량지반의 최종침하량

그림 3에는 연약지반의 침도별 변화에 따른 각 예측방법들에 의한 압밀도 값들이 서로 비교되어 있다. 압밀도 값은 최종 계측시점에서 침하량 값을 각 예측방법에 의하여 구해진 최종침하량으로 나누었다. 쌍곡선법과 Hoshino법은 평균적으로 92% 및 90% 정도의 압밀도 값을 예측하였고, Asaoka법은 80~95% 정도의 압밀도 값을 보이는 것으로 나타났고, Asaoka법은 압밀도 값을 전반적으로 과대 혹은 과소평가하는 폭이 크게 나타났다. 역해석법은 점토층이 얇은 지점에서는 압밀도 값이 100%를 다소 상회하는 값을 보였고, 연약층이 30m이상 깊은 침도에서는 97~98%정도의 압밀도 값을 보여주었다.

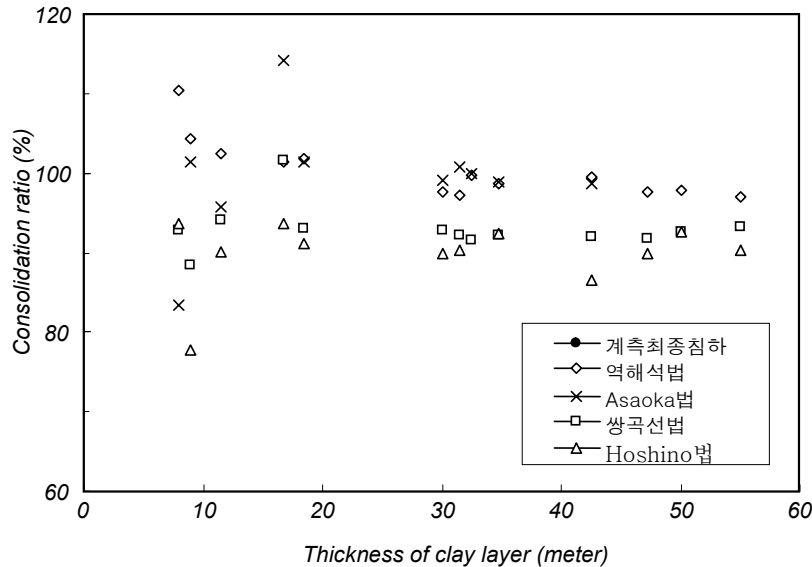


그림 3. 연약지반 침도별로 예측된 최종 압밀도 비교

5. 결론

본 연구에서는 부산신항만 북컨테이너 2-1단계에서 안벽 배후 육상부 지반개량구역들에서 계측된 침하자료들에 대하여 실측 침하 해석방법들을 적용하였다. 각 기법에 의한 최종침하량과 압밀도를 예측하고, 각 방법들의 적용성을 평가하고자 하였다. 전반적으로 쌍곡선법과 Hoshino법은 다른 방법들에 비하여 압밀도 값을 상당히 안전측으로 주었다. Asaoka법은 전반적으로 다른 방법들에 비하여 과소평가하였다. 역해석법은 얇은 침도에 비해서 깊은 침도에 대하여 합리적인 압밀도 값을 제공하는 것으로 나타났다. 얇은 침도의 침하자료들은 압밀거동에 비하여 초기 침하 이후 급속하게 침하가 완료되는 양상을 보였다. 따라서, 역해석법에 사용된 Terzaghi 압밀이론의 침하거동과 다소 차이를 보이기 때문인 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김운태, 이승래, 도남영, 이영남(1994), 배수재가 설치된 압축성 지반의 효율적인 압밀해석 및 역해석, *한국지반공학회 '94 가을학술발표회 논문집*, pp.175-181.
2. 박현일, 김운태, 황대진, 이승래 (2006), 역해석 기법에 근거한 수직배수재로 개량된 연약점토지반의 침하예측, *대한토목학회논문집*, 제 26권, 제 4C호, pp.229-238
3. Asaoka, A. (1978), Observational Procedure of Settlement Prediction, *JSSMFE*, Vol. 18, No. 4, pp.87-101.
4. Tan, T.S. et al. (1991), Hyperbolic Method for Consolidation Analysis, *JGE, ASCE*, Vol. 117, No. 11, pp.1723-1737.