



일축압축강도에 의한 선행압밀응력 예측 및 분석

Prediction and Analysis of Pre-Consolidation by Unconfined Compressive Strength

송창섭* · 김명환*†

Song, Chang Seob · Kim, Myeong Hwan

Abstract

This study was to evaluate the feasibility of pre-consolidation pressure distribution characteristic of western and southern coastal region, using correlation of unconfined compressive strength and preceding research equation. Pre-consolidation of western and southern region showed similar trends undrained shear strength and pre-consolidation pressure in proportion to unconfined compressive strength. Predicted results of U.S. NAVY. (1982) equation revealed a small error western 9.7% and southern 0.4%. Prediction correlation results of pre-consolidation using unconfined compressive strength revealed an error western 16.8% and southern 0.7%. It was reported that less than 20 percent of pre-consolidation pressure prediction result of Casagrande forecasting error. Estimates of pre-consolidation pressure are possible, before the standard consolidation test, because it was reported that less than 20% of the forecasting errors of Casagrande.

Keywords: Unconfined compressive strength; Preconsolidation pressure; Marine clay

I. 서론

해성점토와 같은 연약지반과 관련된 연구는 Terzaghi (1925)에 의해 1차 압밀이론이 제안된 이래 많은 연구가 활발히 진행되었다. 수많은 연구자들에 의해 각종시험 결과로부터 압밀정수를 결정하는 경험식들을 제안하거나 해성점토의 공학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 선행압밀응력에 대한 연구는 실내 및 현장 시험결과를 바탕으로 특성을 분석하는 등 수많은 연구가 진행되었다.

Mersi (1975)는 Bjerrum et al. (1960)이 제안한 수정 계수에 보정한 현장 베인시험 결과로부터 비배수전단강도는 소성지수에 관계없이 선행압밀응력과 관계가 있음을 제안하였으며, U. S. NAVY. (1982)는 현장 베인전단시험을 통한 비배수전단강도를 이용하여 선행압밀응력 추정식을 Skempton (1957)이 제안한 강도 증가율식과 조합하여 제안하였다.

Shin (2007)은 영산강 하구와 영종도 지역의 연약지반 정수들을 분석하여 조수간만 차이에 의한 영향이 과압밀 하중의 주요요인으로 작용하여 상부에서 하부로 갈수록 선행압밀응력이 적어지며, 선행압밀응력과 조위차에 의한 상재하중

변화가 동일하게 나타난다고 하였다.

Baek et al. (2008)은 준설매립지반의 압밀특성을 평가하기 위하여 표준압밀시험을 통한 선행압밀응력을 기존에 제안된 8가지 방법들과 비교하여 선행압밀응력 산정 방법의 적용성을 평가하였다.

Kang et al. (2012)은 광양과 부산지역의 연약지반 실내시험 결과를 바탕으로 압밀상태를 평가하고, 설계정수의 불확실성을 줄이기 위한 정규성 검증과 이상치 제거 등의 통계처리를 통해 지역별로 깊이에 따른 선행압밀응력에 대한 관계식을 제안하기도 하였다.

선행압밀응력은 연약지반 설계에 있어 압밀침하량 산정에 중요한 설계요소로 선행압밀응력을 결정하는 방법에 대해서 꾸준한 연구를 진행하고 있는 실정이다. 하지만, 선행압밀응력 결정을 위한 시험으로는 일반적으로 표준압밀시험을 이용하는 방법과 CRS 방법 및 ROWE 시험법이 있지만, CRS 시험방법을 제외한 모든 시험방법은 시험기간이 상당히 소요된다는 단점을 가지고 있으며, 시료의 교란에 의한 영향이 크게 작용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내 지역별 선행압밀응력을 서해안과 남해안으로 구분하여 분포특성을 파악하고, 일축압축강도와의 상관관계식 결과와 선행연구자들의 제안식과 비교하여 적용성을 확인하였다.

* Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +81-43-261-2572 Fax: +81-43-271-5922

E-mail: mhkim3306@cbnu.ac.kr

Received: August 12, 2016

Revised: October 4, 2016

Accepted: October 6, 2016

II. 배경 이론

1. 선행압밀응력

U. S. NAVY. (1982)에서는 현장 베인전단시험 결과를 통

한 강도증가율을 이용한 Skepmtton (1957)의 제안식을 이용하여 선행압밀응력을 산정하는 식을 다음 식(1)과 같이 제안하였다.

$$P_c = \frac{S_u}{0.11 + 0.0037 \cdot H} \quad (1)$$

Lee et al. (2006)은 서해안 지역을 대상으로 N값을 이용하여 일축압축강도 산정한 후 선행압밀응력과 소성지수의 관계를 이용한 자료를 분석하여 선행압밀응력을 추정하는 방법을 다음 식(2)와 같이 제안하였다.

$$P_c = \frac{Q_u}{0.2192 + 0.00121 \cdot H} \quad (2)$$

Kang et al. (2012)은 광양지역과 부산지역의 해성점토를 분석하여 깊이에 따른 선행압밀응력 관계를 분석하여 다음 식(3)과 식(4)와 같이 제안하였다.

$$P_c = 0.02548D + 0.17704 (R^2=0.449) ; \text{Gwangyang} \quad (3)$$

$$P_c = 0.06285D + 0.0.07814 (R^2=0.761) ; \text{Busan} \quad (4)$$

III. 선행압밀응력 분포특성

선행압밀응력 분포 특성은 서해안 (경기, 충남, 전북, 전남 서해)과 남해안 (전남남해, 경남)으로 구분하여 분석하였다. 분석에 사용된 자료는 2006년부터 2014년까지의 각종 국내 턴키 및 설계 용역 결과들을 취합한 Kim (2015)의 연구 자료를 사용하였다.

1. 서해안 지역의 선행압밀응력 특성

Fig. 1은 서해안 지역의 선행압밀응력을 CL과 CH로 구분하여 나타낸 것으로 CL은 44.4 kPa ~ 231.7 kPa, CH는 13.8 kPa ~ 294.4 kPa의 범위에서 분포하고 있으며, 토질의 구분에 따른 강도의 차이는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 깊이에 따른 분산범위를 파악하기 위하여 CL과 CH의 추세선을 중심으로 ±100 kPa의 점선으로 표현한 결과, CH가 평균보다 다소 넓게 분포하여 분산정도가 더 큰 것을 알 수 있지만, ±100 kPa 범위 안에서 크게 차이가 없이 분포하는 것을 알 수 있었다.

2. 남해안 지역의 선행압밀응력 특성

Fig. 2는 남해안 지역의 선행압밀응력을 CL과 CH로 구분하여 나타낸 것으로 CL은 25.4 kPa ~ 179.9 kPa, CH는 22.2 kPa ~ 295.8 kPa의 범위에서 분포하고 있는 것 나타났다. 깊이에 따른 분산범위를 파악하기 위하여 CL과 CH의 추세선을 중심으로 ±100 kPa의 점선으로 표현한 결과, CL에서 평균보다 다소 넓게 분포하여 분산정도가 더 큰 것을 알 수 있지만, ±100 kPa 범위에서 크게 차이가 없이 분포하는 것을 알 수 있었다. 또한, CL은 깊이에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있음을 알 수 있었다.

Table 1에 깊이에 따른 물리·역학적 특성으로 Fig. 1과 Fig. 2에서 붉은색 원으로 분포범위를 다소 벗어난 자료들을 대표적으로 정리한 것이다.

깊이에 따른 물리적 특성은 함수비와 액성한계가 높을수록 강도가 작은 것이 일반적이지만, 서해안과 남해안의 일부 점토는 물리적 특성과는 무관하게 일축압축강도가 작거나 큰 경우 비배수 전단강도와 선행압밀응력도 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다.

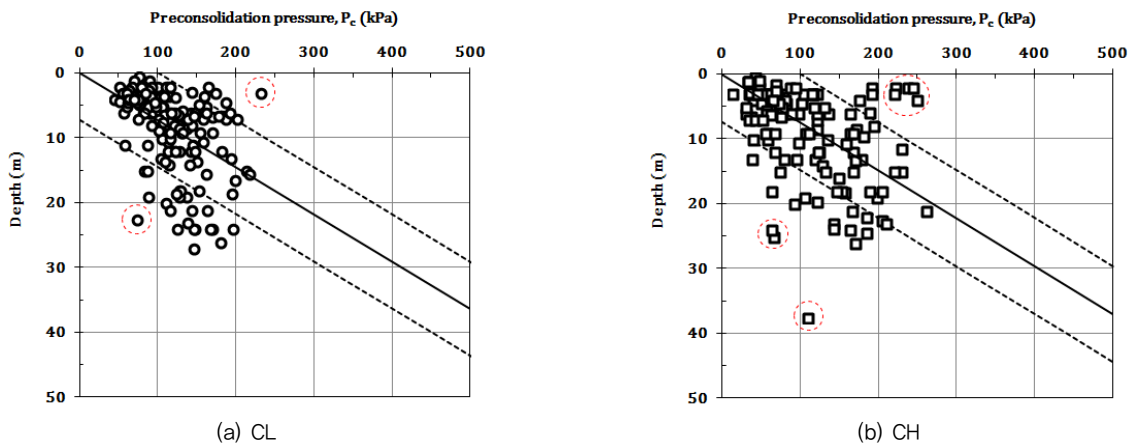


Fig. 1 Properties of preconsolidation pressure in the Western Korea

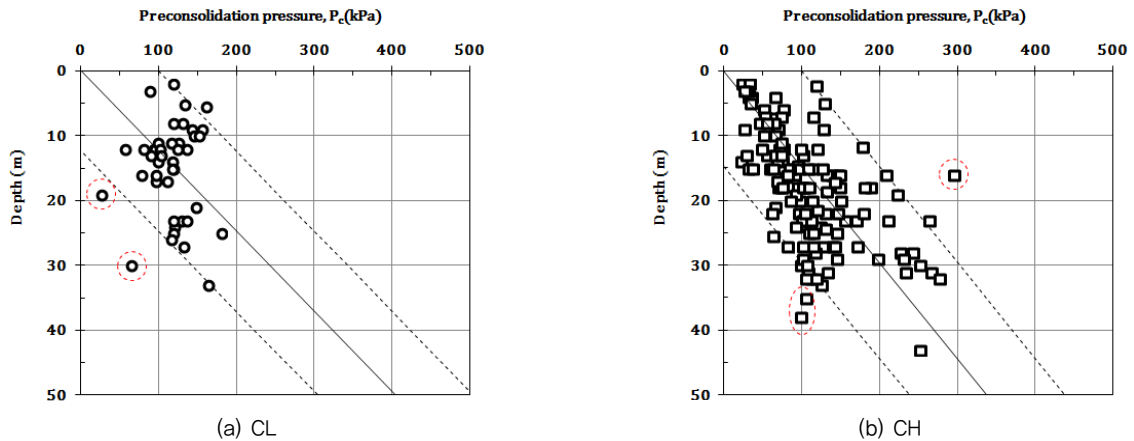


Fig. 2 Properties of preconsolidation pressure in the Southern Korea

Table 1 Physical and mechanical properties in western and southern Korea

| Bore Hole | Depth (m) | W_n (%) | LL (%) | Q_u (kPa) | S_u (kPa) | P_c (kPa) | USCS |
|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|------|
| Western | 22.5 | 45.8 | 44.7 | 35.3 | 22.6 | 72.6 | CL |
| | 3.0 | 29.9 | 46.1 | 124.0 | 83.60 | 231.7 | |
| | 2.0 | 27.9 | 56.7 | 196.2 | 119.6 | 222.3 | CH |
| | 2.0 | 26.8 | 58.3 | 190.0 | 146.0 | 237.7 | |
| | 3.0 | 34.2 | 63.7 | 164.2 | 90.2 | 220.3 | |
| | 2.0 | 30.2 | 58.1 | 152.3 | 60.4 | 244.3 | |
| Southern | 4.0 | 25.9 | 58.8 | 104.3 | 45.7 | 249.5 | CL |
| | 19.0 | 38.8 | 41.2 | 10.8 | 6.4 | 25.4 | |
| | 30.0 | 47.8 | 49.7 | 21.0 | 11.2 | 63.7 | CH |
| | 35.0 | 68.9 | 79.5 | 55.2 | 26.0 | 105.0 | |
| | 38.0 | 53.0 | 64.7 | 51.8 | 24.0 | 98.2 | |
| | 16.0 | 38.4 | 66.2 | 194.7 | 110.2 | 295.8 | |

선행압밀응력 결정방법은 압밀곡선을 이용하는 것이 가장 일반적이며, 가장 널리 알려진 8명의 연구자가 제안한 9가지의 방법을 광범위하게 사용하고 있다. 기존 연구자들이 제안한 선행압밀응력 결정방법은 간극비와, 배수거리, 응력과 관련된 방법으로 제안되어 있다. 기존 연구자들의 선행압밀응력 결정방법에 응력을 이용한 측면에서 볼 때, 물리적 특성 또는 깊이에 따른 예측보다는 실내 실험실에서 가장 쉬운 방법으로 구할 수 있는 일축압축강도를 결과를 이용하여 선행압밀응력을 예측하는 것이 가능할 것으로 사료되어 본 연구에 적용하였다.

3. 일축압축강도와 선행압밀응력 관계

서·남해안 해성점토의 일축압축강도에 따른 선행압밀응력의 관계를 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 나타내었다.

Table 2 Nine widely known methods suggested by eight scientists

| Scientists | Suggestion |
|---------------------------|---|
| Butterfield method | $LN(1+e) - \log \sigma'$ |
| Casagrande methods | $e - \log \sigma'$ |
| Janbu method | $\Delta H/H - \log \sigma'$ and $M_c - \sigma'$ |
| Old method | $\Delta H/H - \log \sigma'$ |
| Schmertmann method | $e - \log \sigma'$ |
| Tavenas method | $\sigma' \Delta H/H - \sigma'$ |
| Van Zelst method | $\Delta H/H - \log \sigma'$ |
| Senol and Saglamer method | $\sigma \Delta H/H - \log \sigma'$ |

분석에 사용된 자료는 총 482개로 서해안은 CL (166), CH (135), 남해안은 CL (44), CH (137)구분하여 분석하였으며, 물리적 특성시험과 역학적 시험 (일축압축강도, 삼축 (UU),

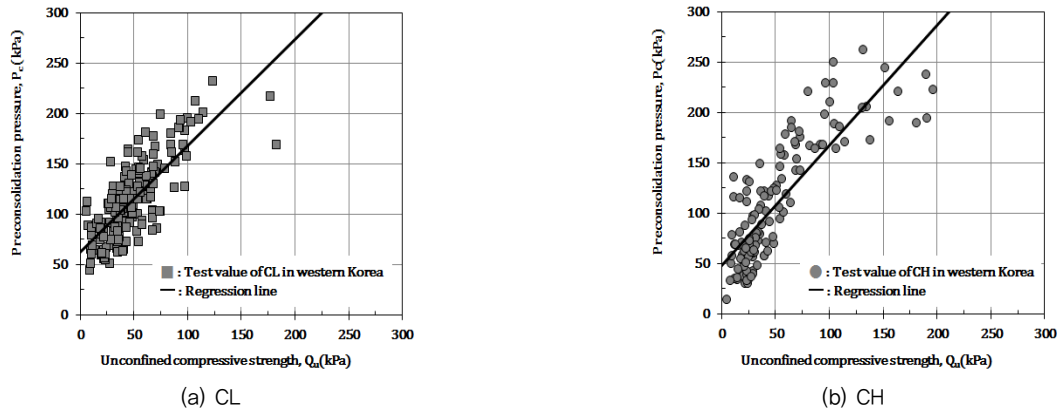


Fig. 3 Relationship of unconfined compressive strength and preconsolidation pressure in the Western Korea

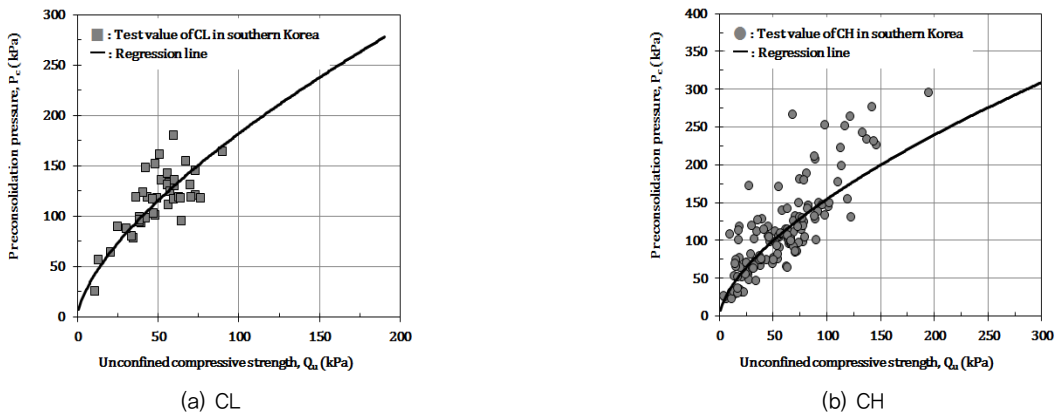


Fig. 4 Relationship of unconfined compressive strength and preconsolidation pressure in the Southern Korea

Table 3 Prediction equation of preconsolidation pressure with soil classification in the Western and Southern Korea

| Area | USCS | Prediction equation | r^2 |
|----------|------|-----------------------------------|-------|
| Western | CL | $P_c = 62.201 + 1.0590 \cdot Q_u$ | 0.590 |
| | CH | $P_c = 48.001 + 1.1937 \cdot Q_u$ | 0.691 |
| Southern | CL | $P_c = 8.8498 \cdot Q_u^{0.6567}$ | 0.716 |
| | CH | $P_c = 8.398 \cdot Q_u^{0.6323}$ | 0.675 |

표준압밀)을 모두 실시한 결과들만 선택 분류한 것이다.

서해안 지역의 흙의 종류별 선행압밀응력 결정계수 $r^2=0.590 \sim 0.691$ 의 보통의 상관성을 보이는 것으로 나타났으며, 남해안 지역의 흙의 종류별 선행압밀응력 결정계수 $r^2=0.678 \sim 0.716$ 로 서해안 지역보다는 다소 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3은 일축압축강도에 따른 서해안과 남해안 지역의 선행압밀응력 상관관계식을 흙의 종류에 따라 정리한 것이다.

IV. 일축압축강도를 이용한 선행압밀응력 비교

일축압축강도를 이용한 선행압밀응력 적용성을 평가하기 위하여 서해안 및 남해안 상관식과 선행 연구자들의 제안식 결과와 비교하였다. 적용성 평가를 위해 비교한 자료는 전남 여수 신북항 (2014)과 경기 인근지역 (2015) 조사 자료로 본 연구에서 분석한 자료에는 포함되지 않은 자료로 현장 적용 가능성을 평가하였다.

1. 선행연구결과에 의한 선행압밀응력

Fig. 5에서 Fig. 7은 선행 연구자들이 제안한 경험식을 이용하여 서해안 및 남해안 해상점토의 선행압밀응력을 비교한 것이다.

U. S. NAVY. (1982)의 제안식 예측결과는 서해안 지역의 경우 9.7%, 남해안의 경우 0.4% 정도 크게 산정되었다. Lee et al. (2006)의 제안식은 서해안 31.5%, 남해안 30.7% 크게 산정되었다. Kang et al. (2012)의 광양지역만을 제한적으로 분석하여 서해안에서 오차가 크게 발생하였으며, 남해안의

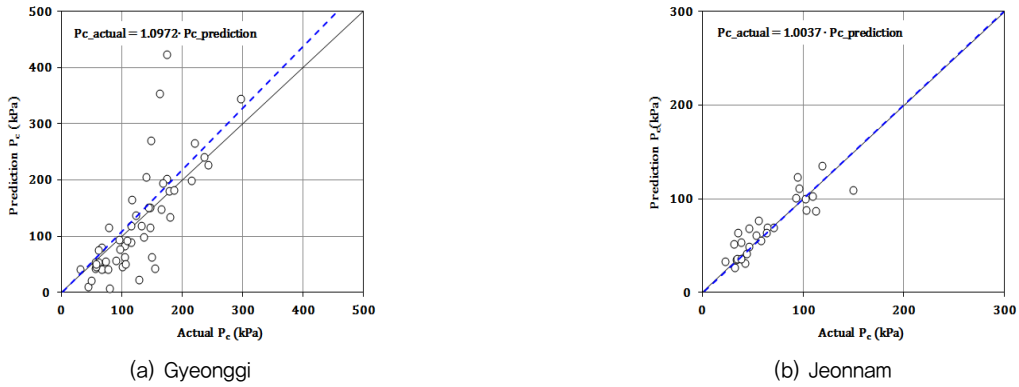


Fig. 5 Prediction results of U. S. NAVY, (1982)

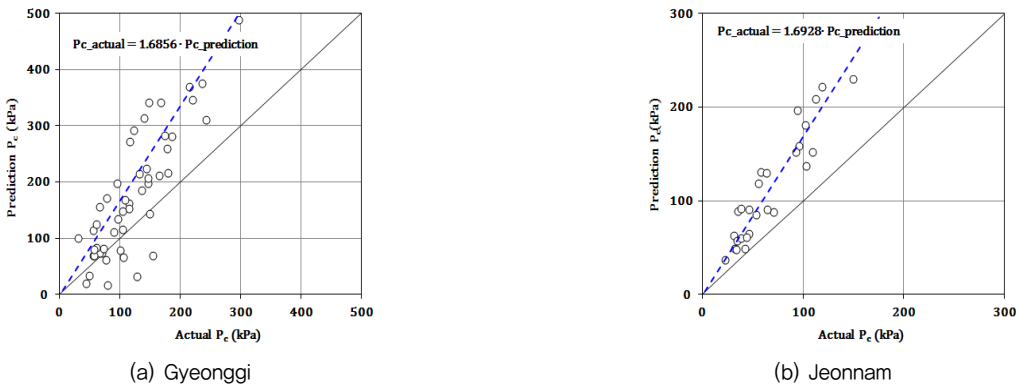


Fig. 6 Prediction results of Lee et al. (2006)

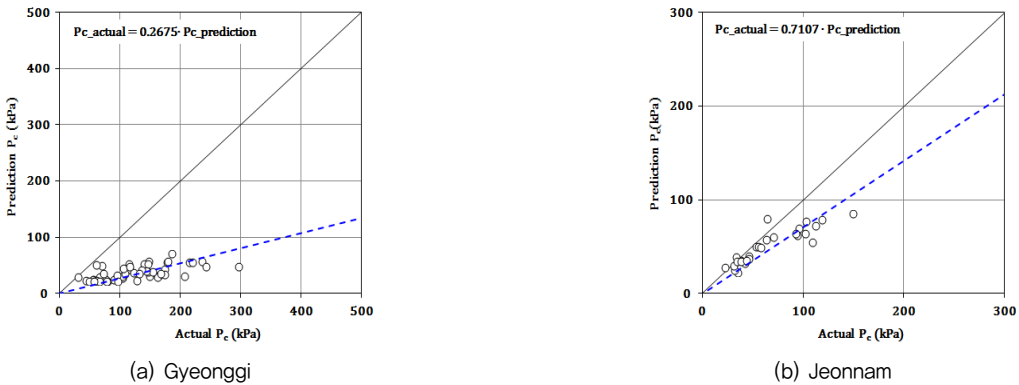


Fig. 7 Prediction results of Kang et al. (2012)

경우 28.1 % 작게 산정되었다. U. S. NAVY. (1982)의 제안식은 점토에 대한 강도와 소성지수를 알고 있는 경우 선행압밀 응력의 추정이 가능함을 알 수 있다.

2. 일축압축강도에 의한 선행압밀응력

Fig. 8은 Table 3에서 제안한 일축압축강도를 이용하여 선

행압밀응력을 추정하는 것이며, Table 4는 선행압밀응력 추정 결과를 상호 비교한 것이다. 일축압축강도를 이용한 선행압 밀응력 산정결과 표준압밀시험을 통한 선행압밀응력보다 서 해안의 경우 16.8 % 작게 산정되었으며, 남해안의 경우 0.7 % 작게 추정되어 미 공병단 제안식 보다는 서해안에서 다소 큰 오차를 보이고 있지만, 일축압축강도를 이용하여 압밀시험

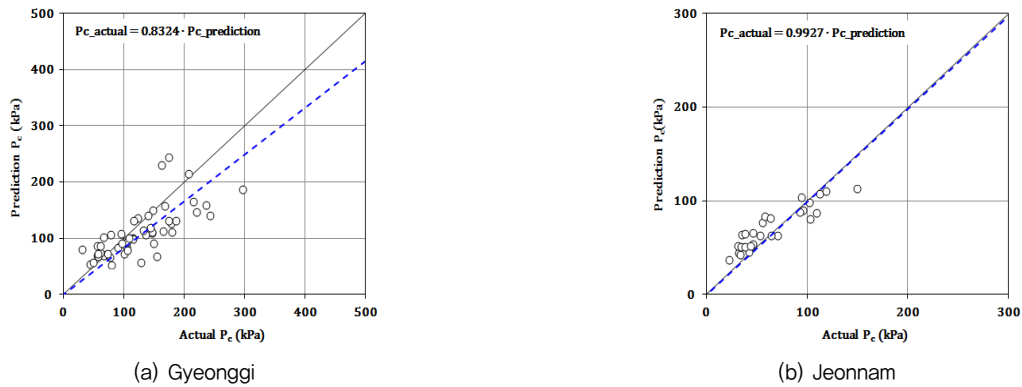


Fig. 8 Prediction results of unconfined compressive strength

Table 4 Comparison result of prediction preconsolidation pressure of Gyeonggi and Jeonnam

| Location | U. S. NAVY. | Lee et al. | Kang et al. | Proposal |
|----------|-------------|------------|-------------|----------|
| Gyeonggi | 1,0972 | 1,6856 | 0,2675 | 0,8324 |
| Jeonnam | 1,0037 | 1,6928 | 0,7107 | 0,9927 |

Table 5 The average values of P_c obtained from all the methods compared with the known values (Mohammed K, (2008))

| The known P_c | 100 | 200 | 300 | $y=ax$ |
|---------------------------|-----|-----|-----|--------|
| Casagrande method | 75 | 150 | 235 | 0.7714 |
| Schmertmann method | 80 | 160 | 245 | 0.8107 |
| Butterfield method | 70 | 140 | 230 | 0.7429 |
| Janbu method | 80 | 165 | 240 | 0.8071 |
| Tavenas method | 90 | 185 | 270 | 0.9071 |
| Van Zelst method | 70 | 146 | 240 | 0.7729 |
| Old method | 65 | 135 | 230 | 0.7321 |
| Senol and Saglamer method | 85 | 170 | 250 | 0.8393 |

전 개략적인 선행압밀응력 추정이 가능할 것으로 보인다.

Mohammed K. (2008)는 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa의 선행 압밀응력을 갖는 시료를 제작하여 압밀시험을 실시하여 Table 2에서 제시한 연구자들의 방법으로 선행압밀응력을 산정하였다. Table 5는 Table 2의 연구자들이 제안한 방법으로 추정 한 선행압밀응력 산정결과와 기울기를 나타낸 것이다. 선행 연구자들의 제안방법으로 선행압밀응력 산정 결과 실제 값보다 작게 평가되는 것으로 나타났으며, Tavenas가 제안한 방법의 선행압밀응력 오차가 가장 작다고 하였다. 특히, 표준압 밀시험을 통한 선행압밀응력을 산정하는데 가장 많이 사용하는 Casagrande 방법의 경우 20% 이상 작게 산정되는 것을 감안한다면 U. S. NAVY. (1982)와 본 연구에서 제안한 일축압축강도를 이용한 방법의 적용이 가능할 것으로 사료된다. Cho et al. (2012)는 점토광물 함량과 일라이트의 특성만을 가지고

고려할 때 황해 남동 이질대의 남쪽지역 (남해안)과 북쪽 지역 (서해안)에 분포하는 해양퇴적물은 거의 차이가 없는 비슷한 특성을 가지고 있는 것으로 판단하였다. 이러한 특성을 고려하지 못하고 본 연구에서는 일축압축강도를 이용한 서해안 제안식에 전남 서해지역의 강도특성을 포함하고 있어 오차를 더욱 크게 발생시킨 것으로 사료된다. 따라서, 서해안과 남해안 자료를 구분하여 분석 시 고려할 필요가 있을 것으로 사료 된다.

V. 결 론

서·남해안 선행압밀응력 특성과 일축압축강도와 선행압 밀응력의 상관관계를 분석하여, 선행 연구자들의 제안식과 비교하여 적용성을 평가하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 서해안과 남해안 지역의 선행압밀응력은 깊이에 따라 증가 하는 경향을 보이고 있지만, 일부 점토는 물리적 특성 또는 깊이와는 무관하며, 일축압축강도의 크기에 비례하여 비 배수 전단강도와 선행압밀응력도 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다.
2. 선행 연구자들의 제안식으로 추정된 선행압밀응력은 U. S. NAVY.(1982)의 제안식으로 추정된 선행압밀응력이 서해안 9.7%, 남해안 0.4%로 오차가 가장 작은 것으로 나타났다.
3. 일축압축강도를 이용한 선행압밀응력은 서해안 16.8%, 남

해안 0.7%로 나타났으며, Casagrande의 선형압밀응력 산정방법 20%의 오차보다 작은 것으로 나타나 표준압밀 실험 전 선형압밀응력 추정이 가능할 것으로 사료된다.

4. 일축압축강도를 이용한 서해안 선형압밀응력의 오차가 더 큰 이유는 전남 서해지역과 남해지역의 점토광물이 유사한 특성을 보이기 때문인 것으로 사료되므로 지역별 구분이 필요한 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Baek, W. J., S. Lee, Y. E. Jeong, T. G. Noh, T. S. Yang, and Kim, J. H. 2008. Estimating Maximum Past Pressures for Dredged and Reclaimed Ground. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(8): 61-79 (in Korean).
2. Bjerrum, L. and N. E. Simons, 1960. Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays. Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, 711-726.
3. Cho, H. G., S. O. Kim, and Yi, H. I. 2012. Clay Mineral Distribution and Characteristics in the Southeastern Yellow Sea Mud Deposits. *J. Miner. Soc. Korea* 25(3): 163-173 (in Korean).
4. Kang, S. B., Y. Heo, and W. S. Bae, 2012. Estimation of Over Consolidation Ratio in Southern Coasts. *Korean Geo-Environmental Society* 13(4): 93-104 (in Korean).
5. Kim, M. H., 2015. Engineering Characteristics of Western and Southern Coastal Marine Clay in Korea. Chungbuk National University. Paper of doctor's degree in engineering (in Korean).
6. Lee, S. C., J. Y. Kim, S. M. Jo, and T. H. Kim, 2006. A study on the estimation of undrained shear strength and preconsolidation pressure by N-Value. *Korean Association of Professional Engineers Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 303-310 (in Korean).
7. Mersi, G. 1975, New Design procedure for stability of soft clays. Discussion 101(GT4): 409-412:ASCE.
8. Mohammed, K. Al-Z., 2008. Influence of Load Duration and Load Ratio on Preconsolidation Pressure. *Journal of Engineering and Development* 12(3): 133-141.
9. Shin, T. W., 2007. Analysis of Correlation with the Change by the rise and fall of Tide and Preconsolidation Pressure on the Sedimentary Clay. Chosun University. Paper of doctor's degree in engineering (in Korean).
10. Skempton, A. W., 1957. Discussion: further data on the c/p ratio in normally consolidated clays. Proc. Inst. Civil Eng. 7(2): 305-307.
11. Terzaghi, K., 1925. Structure and volume of voids of soils. in *endbanmechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage.*, 10-13.
12. U. S. NAVY., 1982. Soil Mechanics, NAVFAC Design Manual 7.1. Naval Facilities Engineering Command. Arlington, VA.