국내 연약지반의 강성지수(Ir)에 관한 연구
The Study on Rigidity Index of the Soft Clay in Korea

서수봉[1),Su-Bong Seo,윤일형[2),Il-Hyung Yoon,이재식[3),Jae-Sik Lee,구남실[4),Nam-Sil Goo

[1)] 한국토지공사 기술관리처 처장, Director, Office of Tech. Management, KOLAND
[2)] 한국토지공사 기술관리처 과장, Senior Geotech. Eng., Office of Technology Management, KOLAND
[3)] 한국토지공사 기술관리처 대리, Geotechnical Eng., Office of Technology Management, KOLAND
[4)] 한국토지공사 기술관리처 대리, Geotechnical Eng., Office of Technology Management, KOLAND

SYNOPSIS : Several soil parameters can be calculated for results of Piezocone test; sensitivity, soil classification, OCR, undrained shear strength, coefficient of consolidation etc., and used to analysis geotechnical problems. Particularly, the coefficient of consolidation which is related to degree of consolidation varies according to rigidity index(I_r). In this study, rigidity index(I_r) was analyzed by Roy's formula. Trixial tests and unconfined compression tests data in the ten sites was analyzed. In conclusion, rigidity index(I_r) was suggested such as rigidity index(I_r) = 15~60, average rigidity index value(I_r) of approximately 33 within a country.

Key words : rigidity index, piezocone penetration test, coefficient of horizontal consolidation, pore pressure dissipation test

1. 서 론

국내의 산업고도화에 따라 임해공단, 항만, 공항 등 새로운 산업기반시설이 필요하여 건설되고 있으나 이런 시설들은 입지조건상 지반조건이 열악한 지역의 연약지반에서 대부분 건설되고 있는 실정이다.

연약지반은 공학적인 문제점을 가지고 있는데 이러한 지반에서 문제점들을 해결하고 기반시설들을 원활히 건설하기 위해서는 지반에 대한 정확한 정보가 요구되며 이를 위해서 다양한 지반조사 및 시험들이 실시되고 있다.

피에조콘 관입시험도 이러한 시대적인 요구에 따라 90년대에 국내에 도입된 이후 여러 연약지반 현장의 지반조사에 활용되고 있으며 경제성 및 비교적 정확한 결과 때문에 활용빈도가 점차 확대되고 있는 추세이다.

피에조콘조사를 하면 여러 가지 지반특성을 파악할 수 있는데 수평방향압밀계수는 그 중의 하나로서 지반에 콘을 관입하면서 임의의 위치에서 관입을 중단하면 콘관입에 의해 발생된 과잉간극수압이 시간의 경과와 더불어 소산되는 것을 측정한 후 여러 학자들에 의해 제안된 식을 사용하여 수평방향압밀계수를 구한다.

수평방향압밀계수 산정시에는 강성지수(rigidity index)가 사용되는데 아직까지 국내 연약지반의 강성지수(Ir)에 대해서는 체계적으로 연구된 사례가 없어서 해외에서 발표된 강성지수 값을 해석시 적용하고 있는 실정이다. 이에 따라 국내의 여러 건설현장의 실내시험 자료를 이용하여 우리 나라 연약지반의 강성지수(Ir)의 분포 범위를 분석하여 향후 피에조콘 조사결과의 해석시 적용할 수 있는 강성지수 값을 제시하고자 한다.

2. 압밀계수 산정 이론해

피에조콘 소산시험을 이용한 지반의 수평방향압밀계수 산정시 사용되는 이론해들은 공동확장이론과 변형율경로법, 대변형 유한요소법, 수정공동확장이론 등이 있으며 이 방법들은 초기 과잉간극수압 분포를 가정하고 이를 초기조건으로 하여 시간에 따른 간극수압의 소산거동을 모사하여 정규화된 형태로 제안되었다.

2.1 Torstenson의 해

Torstenson(1977)은 정적관입에 의한 간극수압은 일차원 공동이론으로부터 추정할 수 있다고 주장하였으며 등방이며 탄-소성 거동을 나타내는 매체내에 공동의 확장으로 인한 소성영역내의 임의의 반경(r)에 발생하는 간극수압의 크기를 다음 식(1)과 (2)로 표현하였다.

1) 구형 공동의 해

$$\Delta u = 4S_u \left[\frac{1}{3} \ln\left(\frac{G}{S_u}\right) - \ln\left(\frac{r}{r_o}\right) \right] \tag{1}$$

2) 원통형 공동의 해

$$\Delta u = S_u \left[\ln\left(\frac{G}{S_u}\right) - 2\ln\left(\frac{r}{r_o}\right) \right] \tag{2}$$

여기서, Su : 비배수 전단강도, G : 전단탄성계수, r : 등가 관입반경

또한 압밀계수를 추정하기 위해 관측 소산곡선과 예측 소산곡선이 50% 소산도에서 만나는 경우를 가정하여 다음 식 (3)을 사용하여 압밀계수를 산정할 것을 제안하였다.

$$C_r = \frac{T_{50}}{t_{50}} R^2 \tag{3}$$

여기서, R : 공동의 등가 반경

2.2 Baligh와 Levadoux의 해

Baligh와 Levadoux는 변형율 경로법을 사용하여 초기 과잉간극수압 분포를 가정한 뒤 선형-비혼합,비선형-혼합 압밀이론을 유한요소법을 사용하여 간극수압의 소산과정을 모사하였으며 콘 선단각,간극수압 측정 위치,소산도에 따른 이론 해를 다음 식(4)와 같이 제안하였다.(Baligh와 Levadoux,1980)

$$C_r = \frac{r_o^{\,2}}{t_{50}} T \tag{4}$$

이들의 해는 공동확장이론과 비교해 콘 주변에 발생하는 변형율 장과 초기 과잉간극수압분포를 실제와 가깝게 모사하였다는 장점이 있으나 강성지수가 Ir = 500인 Boston Blue Clay의 실내시험 결과를 바탕으로 제안되었다.

2.3 Gupta의 해

Gupta(1983)는 수정 공동확장 이론을 바탕으로 초기 간극수압분포를 가정한 뒤 축대칭 선형-비혼합 압밀이론을 유한차분법을 사용하여 소산과정을 모사하였다. 그러나 다른 방법들과 달리 이론 시간계수-압밀도 관계를 제시하지 않고 프로그램으로 부터 계산된 정규화된 간극수압 소산곡선과 관측된 간극수압 소산곡선이 소산도 50%일 때 일치하도록 하는 압밀계수를 반복적인 계산을 통해 구하는 방법을 제안하였다.

2.4 Houlsby와 Teh의 해

Houlsby와 Teh는 Baligh와 Levadoux(1980)의 변형율 경로법을 기초로 하여 대변형 유한요소법을 도입함으로서 초기 과잉간극수압 분포를 보다 엄밀히 산정하였다. 이를 초기조건으로 Terzaghi- Rendulic의 비혼합 압밀이론을 유한차분 형태로 표현하여 간극수압 관측장치의 위치와 지반의 강성지수를 고려한 이론-시간계수를 제안하였다.

흙은 특정 강성지수에 대해서도 관측장치의 위치에 따라 소산곡선의 변화가 크며 여러 강성지수에 대해서도 변화가 있다는 점을 알고 특정한 위치에 간극수압 측정위치에 대하여 단일화된 소산곡선을 제안하기 위하여 다음 식(5)와 같이 강성지수로 정규화된 새로운 이론 시간계수를 제안하였다.

$$C_r = \frac{T^* \ r_o{}^2 \sqrt{I_r}}{t} \tag{5}$$

여기서, Ir : 강성지수

3. 강성지수의 결정

공동확장 이론과 변형율 경로법 등을 이용하여 이론 시간계수를 유도하는 과정에서 초기 과잉간극수압의 크기와 분포범위가 식(6)과 같이 비배수 전단탄성계수 G와 비배수 전단강도 Su의 비로 정의되는 강성지수(Ir)의 함수 임을 알 수 있다.

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{3S_u} \tag{6}$$

Vesic(1972)에 의하면 강성지수는 연약한 점토로부터 단단한 점토에 따라 그 값이 10에서 300까지 넓은 범위로 분포하고 있다고 발표했다. 따라서 피에조콘에 의한 간극수압 소산시험 해석시 이 값들의 불확실성은 해석 결과에 큰 영향을 준다.

전단 탄성계수 G와 비배수 전단강도 Su는 변형율 속도,시험방법에 따라 그 값이 두 배 이상 차이가 나기도 한다.

그러나 현재까지는 강성지수를 구하는 표준화된 시험방법이 결정되지 않은 상태임을 고려하면 강성지수는 현장의 응력조건을 실내에서 재현할 수 있는 삼축압축시험으로 부터 강성지수를 산정하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단되며, 본 연구에서는 삼축압축시험과 삼축압축시험 자료가 없는 경우에는 일축압축시험 자료를 가지고 강성지수를 산정하였다.

그동안 피에조콘 소산시험을 해석하기 위해 노력해 온 학자들의 강성지수 결정법에 대한 의견은 다음과 같다.

3.1 Gupta의 제안

공동 확장이론은 소성영역을 둘러싸고 있는 교란되지 않은 탄성영역에 의하여 지배되며 이 값이 소성영역의 크기를 결정짓는 중요한 요소이므로 콘 해석시 탄성계수는 교란되지 않은 영역의 초기 접선탄성계수를 사용하는 것이 바람직하다고 제안하였다.

3.2 Robertson과 Companella의 제안

탄성계수가 변형율 수준에 따라서 매우 크게 변하므로 콘 주변의 복잡한 변형율 장을 고려하여 중간 응력수준의 할선 전단탄성계수 G_{50} 선택하는 것이 적절하다고 제안하였다.

3.3 Roy의 제안

자연 점토가 교란된 후에는 전단탄성계수가 50%정도 감소된다는 기존의 실험결과를 바탕으로 직경 20cm의 모형말뚝으로부터 관측된 간극수압과 공동확장 이론을 비교하여 콘 선단부에서는 초기 E_i/S_u값을 사용하고 콘 선단부 뒤에서는 50% 감소된 E_{50}/S_u 값을 사용하여야 한다고 제안하였다.

4. 국내 연약지반의 강성지수

4.1 조사대상 지역 및 현황

우리 나라의 연약지반 강성지수를 산정하기 위하여 서해안 지역에서는 인천남동, 아산공단, 군산수송, 대불공단을, 남해안 지역에서는 여천돌산, 녹산공단, 양산물금, 김해장유 지역을, 동해안 지역에서는 동해해안, 속초청초 지역 등 총 10개 지역을 대상으로 삼축압축시험의 데이타를 우선으로 분석하였고 삼축압축시험 자료가 없는 지역은 일축압축시험 자료를 이용하여 Roy의 제안식 $E_{50}/3S_u$값으로 강성지수를 산정하였다. 아울러 이들 지역은 해안이나 강하류 지역에 위치하고 토질은 해성퇴적 점성토 또는 모래층으로 이루어져 있는데 본 연구의 강성지수 산정에서는 점성토층을 대상으로 하였다.

4.2 국내 전체 강성지수

우리 나라의 전역에 위치하고 있는 10개 지역에 대한 강성지수를 삼축 및 일축시험 자료를 이용하여 그림. 1 및 그림. 2와 같이 분석하였다.

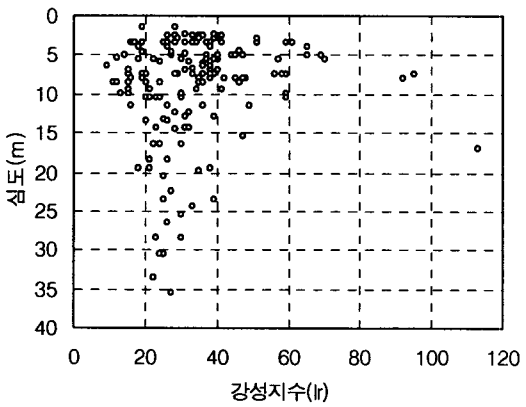

그림. 1 강성지수와 심도의 관계

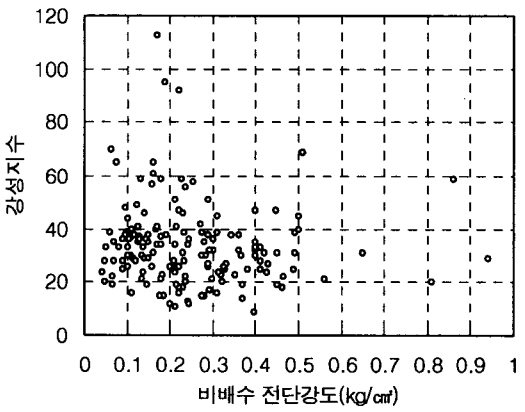

그림. 2 강성지수와 비배수 전단강도의 관계

우리 나라의 강성지수는 분석결과 대부분이 15~60사이에 분포하고 있으며 최소값은 9, 최대값은 113, 평균값 33인 것으로 나타났다. 강성지수 값이 심도나 비배수전단강도에 비례하여 증가하거나 감소하지 않고 거의 일정한 경향으로 나타났다. 이것은 우리 나라의 연약지반 분포심도가 일부 남해안 지역을 제외하고는 대부분 평균 10m이하이며 지반의 상하부층의 퇴적성향이 유사하고 또한 강성지수는 탄성계수와 비배수강도의 상호관계로 변하기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 서해안 지역의 강성지수

서해안에 위치한 4개 지역에 대한 강성지수를 그림. 3 및 그림. 4와 같이 분석하여 본 바 강성지수는 대부분이 20~60사이에 분포하고 있으며 최소값은 16, 최대값은 92, 평균 값은 37으로 나타났다.

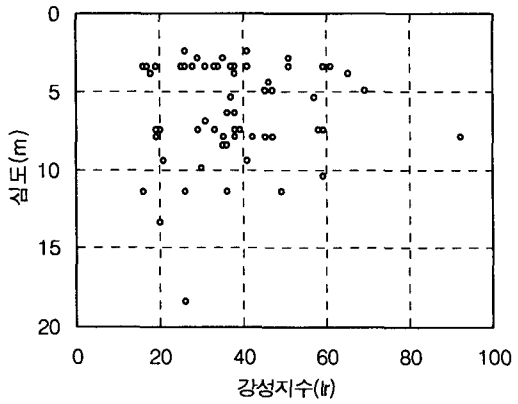

그림. 3 서해안 강성지수와 심도의 관계

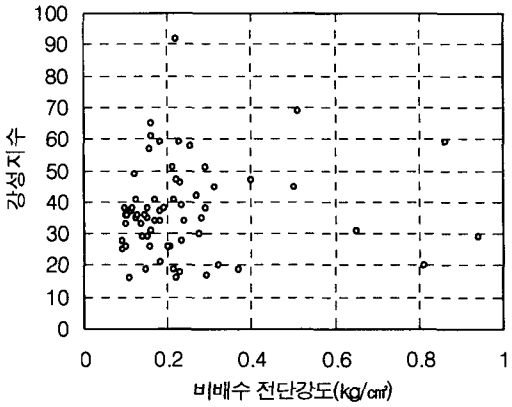

그림. 4 서해안 강성지수와 비배수 전단강도의 관계

4.4 남해안 지역의 강성지수

남해안에 위치한 4개 지역에 대한 강성지수를 그림. 5 및 그림. 6와 같이 분석하여 본 바 강성지수는 대부분이 20~40사이에 분포하고 있으며 최소값은 18, 최대값은 95, 평균 값은 33으로 나타났다.

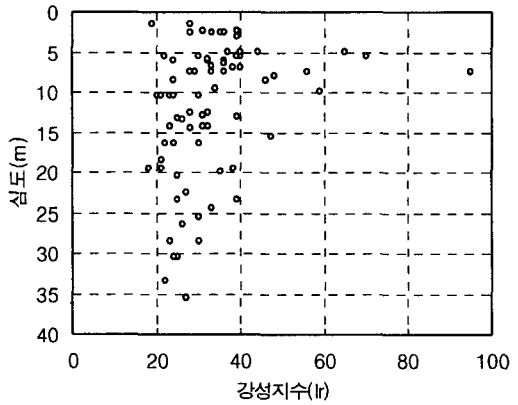

그림. 5 남해안 강성지수와 심도의 관계

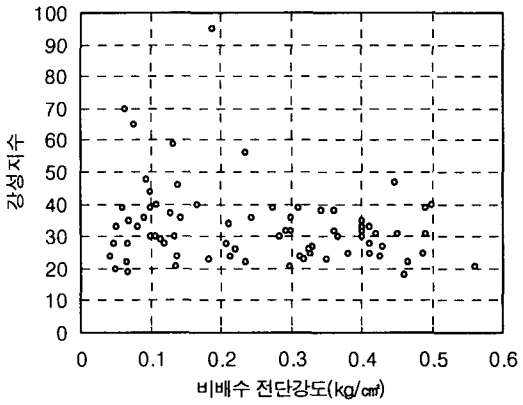

그림. 6 남해안 강성지수와 비배수 전단강도의 관계

4.5 동해안 지역의 강성지수

동해안에 위치한 2개 지역에 대한 강성지수를 그림. 7 및 그림. 8와 같이 분석하여 본 바 강성지수는 대부분이 10~27사이에 분포하고 있으며 최소값은 9, 최대값은 113, 평균 값은 22으로 서해안과 남해안

보다 대체적으로 작게 나타났다.

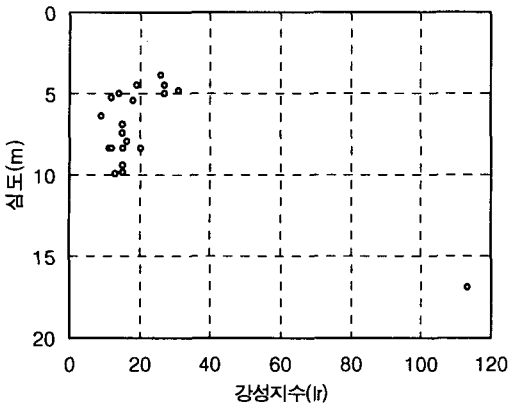

그림. 7 동해안 강성지수와 심도의 관계

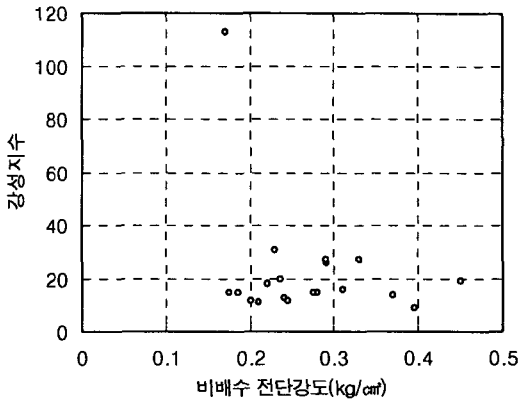

그림. 8 동해안 강성지수와 비배수 전단강도의 관계

5. 결 론

우리 나라 연약지반에 대한 강성지수 연구 결과는 다음과 같다.

1) 현재까지 강성지수 결정을 위한 표준화된 시험방법은 없으나 현장의 응력조건을 재현할 수 있는 삼축압축시험으로부터 구하는 것이 바람직하다.
2) 우리 나라 연약지반의 강성지수는 대부분 15~60사이에 분포하고 있으며 평균 값은 33인 것으로 추정되었으며 지역별 강성지수의 평균값은 서해안 지역이 37, 남해안 지역이 33, 동해안 지역이 22로 서해안지역이 가장 큰 것으로 추정된다.
3) 강성지수는 탄성계수와 비배수강도의 상호관계로 변하기 때문에 비배수강도가 변화하여도 일정한 값을 보였으며 또한, 심도에 따라 증가하거나 감소하지 않았다.

본 연구는 10개 지역의 실내시험 자료만 가지고 수행한 결과이므로 향후에 이 분야에 대한 보다 체계적인 연구가 이루어져 피에조콘 조사시 활용할 수 있는 우리 나라 연약지반의 강성지수가 산정되길 바란다.

6. 참고문헌

1. C.I.Teh & G.T.Houlsby(1991) Geotechnique 41. NO. 1, PP.17-34
2. 김영상(1999) "피에조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정", PP.25-61
3. Torstensson, B. A.(1975), The pore pressure sounding equipment. ASCE specialty Conference of In-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, NC, PP.48-55
4. Robertson, P. K. & Campanella, R. G.(1983), Interpretation of Cone penetration tests, part Ⅱ : clay, Can. Geotech. J. 20, PP.734-745
5. Roy, M. Tremblay, M, Tavenas, F. & Rochelle, P. L.(1982), Development of pore pressures in quasi-static penetration tests in sensitive clay, canadian Geotech. J, PP.124-138
6. Levadoux, J. N & Baligh, M. M.(1986), Consolidation after undrained piezocone penetration Ⅱ: Interpretation. J. of Geotechnical Engineering, ASCE, VOL. 112, No 7. July
7. Gupta, R. C(1983), Determination of the In situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soil using electrical piezoprobe sounding. Ph. D. Dissertation, univ, of Florida
8. Houlsby, G. T. & Teh, C. I.(1988), Analysis of the Piezocone in clay, ISOPTI, orlando, Florida, VOL 2. PP.777-783