

종류가 다른 샘플러로 채취된 점성토의 토질특성에 관한 연구

박성재^{*1}, 오원택^{*2}, 정경환^{*3}

1. 서론

점성토 지반에서 시료를 채취할 경우에는 지반 특성상 시료에 교란이 발생하지 않도록 최대한의 주의 를 기울여야만 하기 때문에 여러 가지 샘플러 중에서 교란의 영향을 최소화한다고 알려져 있는 신월 튜브 샘플러(thin-walled tube sampler)가 가장 많이 사용되고 있다. 우리나라에서는 종전에는 고정 피스톤식 샘플러가 사용되었지만 최근에는 수압 피스톤식 샘플러의 사용이 늘고 있는 추세이며, 일본에서는 일본 지반공학회의 기준에 고정 피스톤식 샘플러를 사용할 것을 엄격하게 규정하고 있다. 그리고 이 외에도 세계 여러 나라들이 자국에 맞는 샘플러를 개발 하거나 사용 중에 있다.

샘플러의 종류가 다양한 만큼 채취된 시료의 토질 시험 결과도 샘플러의 구조와 시료채취 기술에 따라 큰 차이를 나타내게 된다. 따라서, 여러 샘플러로부터 얻어진 시료의 품질평가에 관한 연구자료들을 충분히 비교, 검토해 둘 필요가 있다.

이를 위해 양산물금지구의 연약지반에서 76 mm(NX Size) 수압 피스톤식 샘플러(황동튜브)와 고정 피스톤식 샘플러(스테인레스 스틸 튜브)를 이용하여 시료를 채취한 후, 각각의 물리적·역학적 특성을 비교·분석하였다. 실내시험으로는 기본적 물리시험 외에 압밀시험(표준압밀시험, 일정변형률 압

밀시험)과 전단시험(일축압축시험, 압밀비배수 삼축 압축시험) 그리고 석션(Suction)시험을 행하였다.

2. 시료채취

2.1 개요

흙의 역학적 성질이 원위치 상태와 동일한 특성을 갖는 시료를 채취하는 것이 가장 이상적인 샘플링이라고 할 수 있겠지만, 실제 상황에서 이와 같은 시료를 채취한다는 것은 불가능한 일이다. 또한 이상에 가까운 시료채취일수록 상당한 어려움이 뒤따르기 마련이고 한편으로는 설계 및 시공목적에 따라 높은 품질의 시료가 요구되지 않는 경우도 많으므로, 이용 목적에 상응하는 시료의 품질 정도를 판단하는 것이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 고정 피스톤식 샘플러와 수압 피스톤식 샘플러를 사용하여 세 종류의 시료 - 고정 피스톤식 샘플러에 의해 채취된 시료(이하 FPS, Fixed Piston Sampler)와 수압 피스톤식 샘플러에 의해 채취된 시료(이하 HPS, Hydraulic Piston Sampler) 그리고 고정 피스톤식 샘플러에 의해 채취된 시료를 실내 시험실에서 추출한 다음 랩(wrap)으로 씌워 시험 전까지 시험실에 보관해 놓은 시료(이하 FPS(Exp), Fixed Piston Sampler (exposure)) - 를 채취한 후, 각 시료에 대한 물리적 역학적 특성을 비교·평가하였다.

*1 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*3 정회원, (주) 동아지질 대표이사

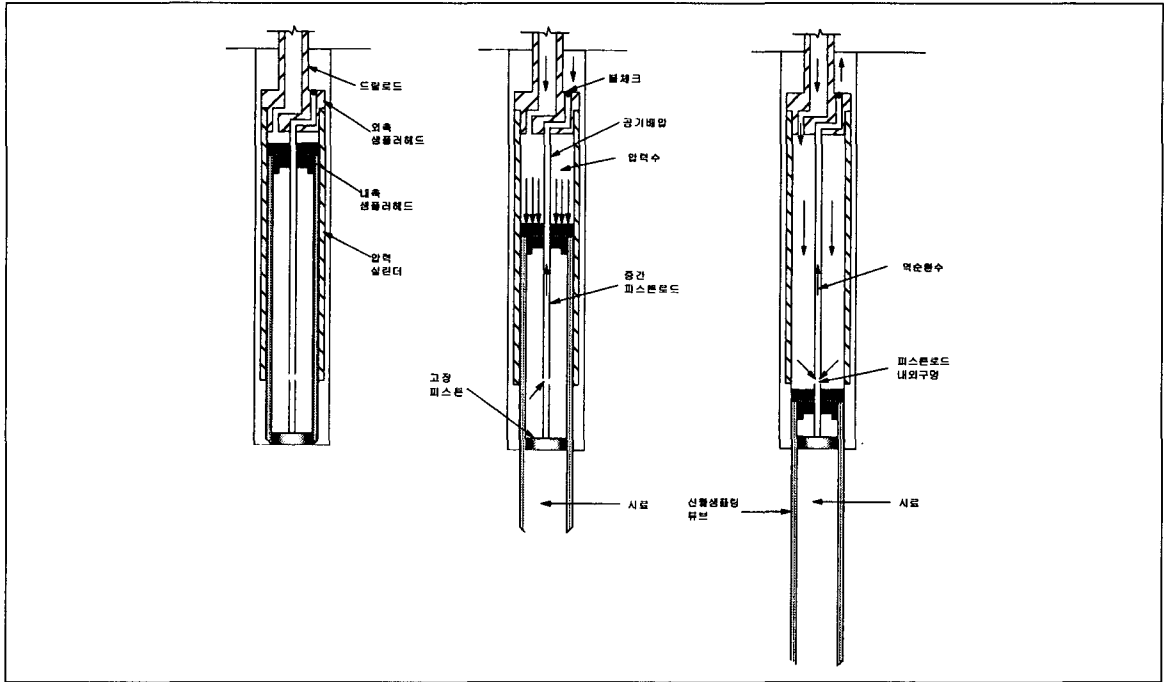


그림 1. 수압 피스톤식 샘플러와 작업과정

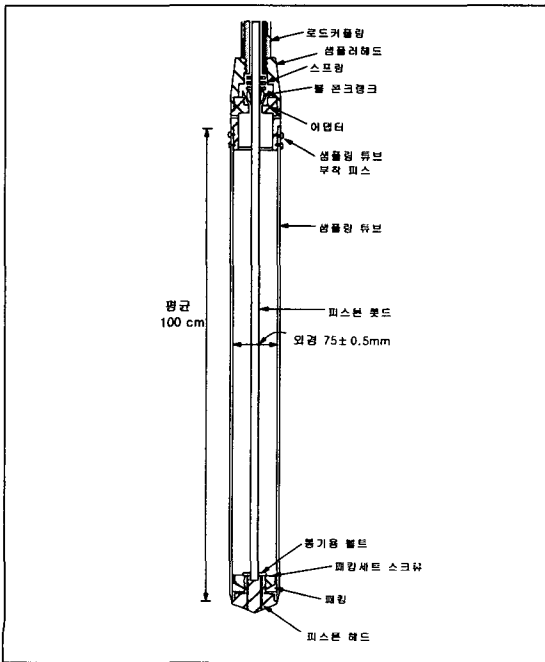


그림 2. 고정 피스톤식 샘플러

2.2 샘플러

2.2.1 수압 피스톤식 샘플러

시추기의 로드를 통해 가해진 수압으로 튜브를 압입시켜 시료를 채취하며, 작업순서는 그림 1과 같다.

2.2.2 고정 피스톤식 샘플러

피스톤을 피스톤 로드(rod)에 이어 이것을 지상부의 3각에 단단히 고정한 후 보링로드를 내리고 샘플링 튜브를 흙 속에 압입하여 시료를 채취한다. 개략적인 구조는 그림 2와 같다.

2.3 연구에 사용된 튜브

샘플러의 종류 외에, 튜브의 치수나 재질도 실내시험 결과에 많은 영향을 끼치게 된다. 우리나라와 일본의 튜브 사용 현황을 살펴보면, 우리나라에서는 황동으로 만든 튜브가 주로 쓰이고 있는 반면, 일본에

표 1. 튜브의 형상 및 치수

재질	길이 (mm)	선단 두께 (mm)	선단 각도 (°)	선단 내경 (mm)	선단 외경 (mm)	튜브 내경 (mm)	튜브 외경 (mm)	내경비 (%)	단면적비 (%)
황동	850	0.4±0.05	3~4	73.8±0.2	74.7±0.2	74±0.2	76±0.1	0.27	2~3
SS	1000	0.2±0.05	6±1	74.4±0.2	74.8±0.1	74.8±0.1	77.8±0.1	0.54	0.8

서는 스테인레스 스틸로 만든 튜브(이하 SS, Stainless Steel)가 주로 이용되고 있다. 이런 이유로 본 연구에서는 황동과 스테인레스 스틸로 된 두 종류의 튜브를 모두 사용해 보았는데 수압식에는 황동을, 그리고 고정식에는 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 각각은 우리나라와 일본의 규격에 의해 제작되었다. 두 튜브의 치수는 표 1과 같다.

두 튜브를 비교해 보면, 선단 각도는 황동 튜브가 더 날카로운 반면 단면적비는 SS가 더 작아서 각각 장단점을 가지고 있다고 볼 수 있다.

2.4 교란의 원인

2.4.1 지중응력의 해방

지중의 흙을 채취하여 지상으로 꺼내게 되면 시료 내에는 유효응력과 동일한 부(-)의 간극수압이 발생하게 된다. 이 간극수압은 시간이 경과할 수록 '0'에

가까워지게 되는데 이때 유효응력도 '0'으로 수렴하면서 역학적 특성이 변하게 된다. 채취한 시료에 대한 시험을 최대한 빨리 해야하는 것도 바로 이러한 이유 때문이다.

2.4.2 기계적 교란

응력해방에 의한 교란 이외의 인자로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 시추시 압력수에 의한 전단 및 압축
- 샘플러 튜브의 압입에 의한 전단 및 압축
- 샘플러를 지상으로 올릴 때의 인장 및 비틀림
- 시료의 운반에 의한 충격
- 샘플러를 해체하고 시료를 밀봉할 때의 충격 및 진동
- 시료의 성형에 의한 전단 및 압축

2.5 유효응력의 변화

그림 3은 Ladd & Lambe(1963)의 시료채취와 시험 도중에 시료에 발생하는 유효응력의 변화를 나타낸 모식도로서 각 단계에 대한 설명은 아래와 같다.

A(이상시료) → P(완전시료)

: 원지반에서 K_0 압밀상태로 평형상태를 유지하고 있던 시료(A점)가 시추에 의해 토피압이 제거되면서 P점(완전시료)에 도달하게 됨.

B → C: 시료를 채취한 후 샘플러를 지상으로 끌어올리는 과정.

C → D: 시료를 튜브에서 추출하는 과정

E → F: 실내시험을 위해 트리밍(trimming) 하는 과정.

G : 삼축압축시험을 할 때의 유효응력 상태.

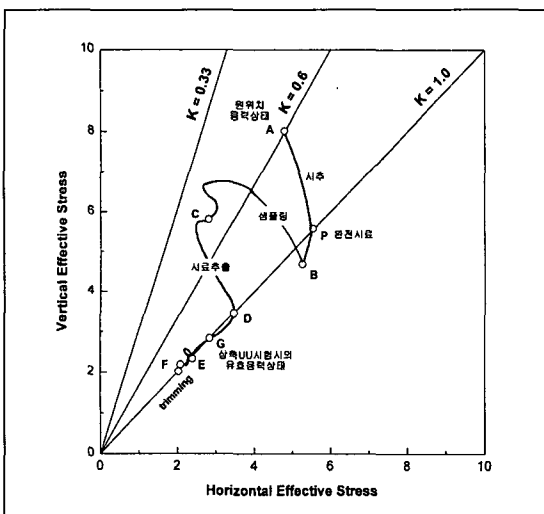


그림 3. 시료채취와 시험중의 유효응력 변화

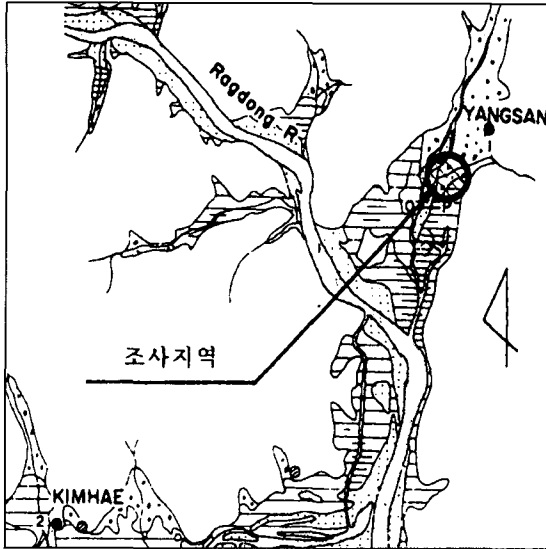


그림 4. 연구대상지역

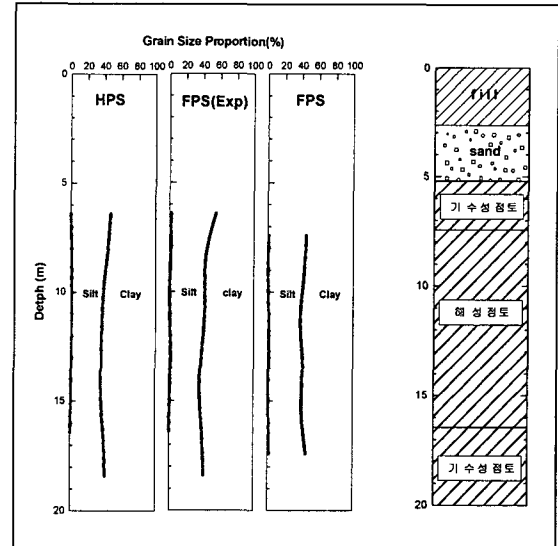


그림 5. 입도분포 및 지층구분

3. 조사 지역

본 연구의 대상이 된 양산물금지구(그림 4)는 낙동강하구 퇴적토와 양산천 퇴적토 그리고 하부에는 해성 퇴적토 등이 분포되어 있는 대표적인 연약지반이다. GL-16.45(m) 이하에서는 해성 상태에서 퇴적됨을 나타내는 미화석(유공층, 패형층, 해수성규조)이 전혀 없어 하성퇴적 상태임을 알 수 있다. GL-7.42 ~ GL-16.45(m)에서는 해성미화석이 거의 연속적으로 나오는 것으로 보아 해성의 퇴적환경이었을 것으로 생각된다. GL-5.21 ~ GL-7.42(m)에서는 해성미화석이 적고 운모와 식물조각 등의 물

질이 다량으로 함유되어 있었기 때문에 내항의 간석과 같은 환경하에서 형성된 기수성물질인 것으로 생각된다. 대상지역은 원지반의 모래층과 성토층이 약 5m를 형성하고 있으며 그 아래로 실트와 점토가 약 40:60의 비로 섞여 있는 세립층으로 조사되었다(北田奈緒子等, 1999).

4. 물리적 특성

3가지 시료에 대한 물리적 특성은 표 2와 같다(鄭京皖等, 1999).

표 2. 물리적 특성

토질특성 \ 시료	HPS	FPS(Exp)	FPS
자연함수비(%)	54.69~61.73	53.28~63.57	54.61~64.53
흙의 분류	CH(CL)	CH	CH(CL)
#200체 통과량	99% 이상	98% 이상	98% 이상
비중	2.637~2.679	2.613~2.675	2.645~2.668
초기간극비(%)	1.489~1.775	1.444~1.716	1.480~1.734
액성한계(%)	48.1~68	51~66.8	47.1~65.3
소성지수(%)	25.3~40.6	30.2~41.8	24.9~41.8

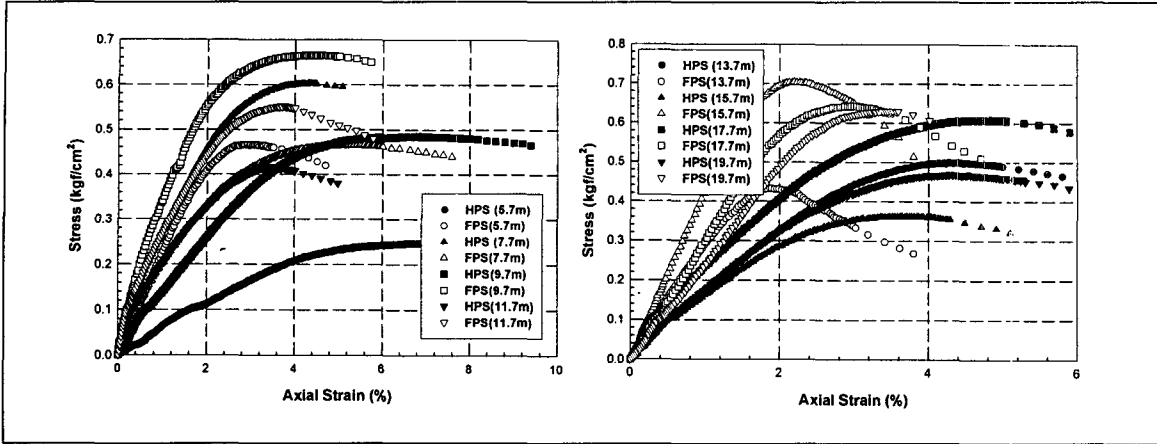


그림 6. 응력 - 변형률의 심도별 형태(일축압축시험에 의함)

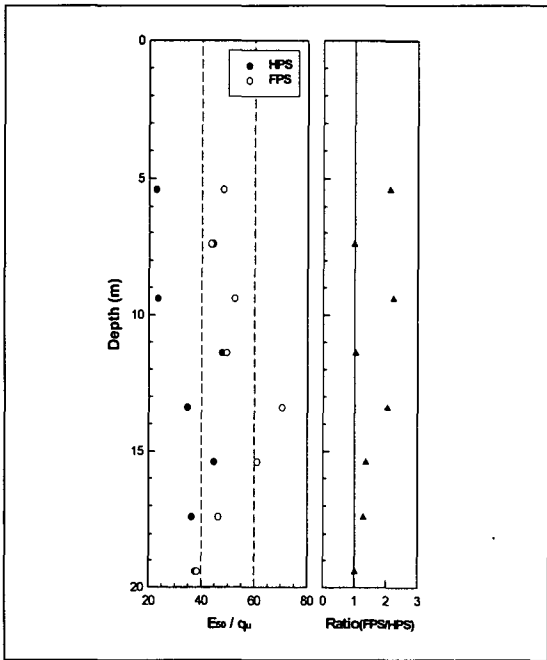


그림 7. E50/qu 값의 심도분포

5. 역학적 특성

5.1 일축압축시험 성과 비교

그림 6은 일축압축시험의 결과를 깊이별로 정리한

것이다(三鳥理等, 1999). 대체적으로 q_u 와 E_{50} 은 FPS에서 더 큰 값을 보인 반면 ϵ_f 는 탄대 경향을 보였다. 압축강도의 피크(peak) 점도 FPS에서 더 뚜렷하게 나타났다. 깊이별로 자세히 살펴보면 5.7, 9.7, 15.7, 17.7, 19.7(m)에서는 세 파라미터(q_u , ϵ_f , E_{50})가 모두 품질 상위 조건(q_u : 大, ϵ_f : 小, E_{50} : 大)을 만족한 반면 7.7m에서는 정 반대의 경향을 보였고 나머지 깊이에서는 복합적으로 나타났다. 그리고 교란의 정도를 비교할 수 있는 탄성계수와 일축압축강도와의 비(E_{50}/q_u)는 그림 7(오른쪽 그림은 HPS를 1로 했을 때의 비)에서도 알 수 있듯이 세 군데 심도(7.7m, 11.7m, 19.7m)를 제외하고는 FPS가 뚜렷이 큰 것으로 나타나 교란성이 적음을 알 수 있었다.

5.2 삼축압축시험 성과 비교

HPS와 FPS 두 시료에 대하여 압밀비배수 삼축압축시험(CU)을 하였다. 그림 8은 HPS의 파괴시 전 단강도와 변형률을 1로 했을 때의 상호 비(比)를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 5.4m, 21.4m에서는 FPS의 품질이 더 좋은 것으로 나타났지만 7.4m, 13.4m에서는 HPS가 더 좋게 평가되었다. 그리고 17.4m에서는 파괴시 강도는 HPS가 더

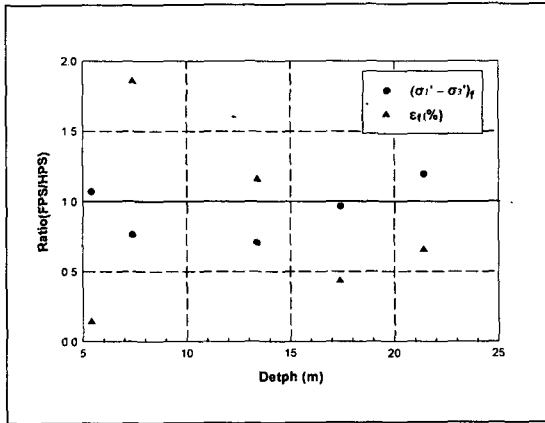


그림 8. HPS에 대한 FPS의 전단강도 및 변형을 비(比) (삼축압축시험에 의함)

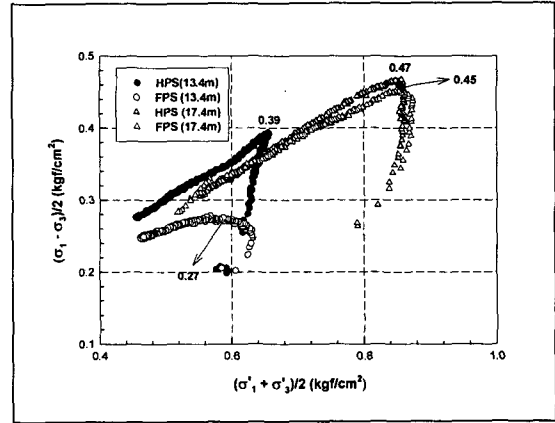


그림 9. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2 - (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (삼축압축시험에 의함)

표 3. 체적 변형률에 따른 교란정도

OCR	깊이 (m)	아주 양호 ϵ_v	양호 $\langle \epsilon_v \rangle$	불량 $\langle \epsilon_v \rangle$
1-1.2	0-10	3	3-5	5
	10-50	2	2-4	4
1.2-1.5	0-10	2	2-4	4
	10-50	1	1-3	3
1.5-2	0-10	1.5	1.5-3.5	3.5
	10-50	1	1.0-2.5	2.5
2-3	0-10	1	1-3	3
	10-50	0.75	0.75-2	2
3-8	0-10	0.5	0.5-1	1
	10-50	0.5	0.5-2	2

표 4. 체적 변형률을 이용한 교란정도 평가

HPS			
깊이 (m)	OCR	ϵ_v (%)	시료 상태
5.4	2.02	0.71	아주 양호
7.4	1.34	0.277	아주 양호
13.4	0.82	1.494	아주 양호
17.4	1.07	2.196	양호
21.4	1.15	2.557	양호
FPS			
깊이 (m)	OCR	ϵ_v (%)	시료 상태
5.4	2.02	0.303	아주 양호
7.4	1.75	0.52	아주 양호
13.4	0.96	5.371	불량
17.4	0.97	1.206	아주 양호
21.4	1.07	1.739	양호

켰지만 변형률은 FPS에서 훨씬 작게 나타났다. 따라서, 5.1에서와 같이 FPS의 품질이 비교적 더 좋은 것으로 평가되었던 일축압축시험의 결과와는 달리, 어느 시료의 품질이 더 좋다고 논할 만한 뚜렷한 판단의 근거를 발견할 수는 없었다. 이와 같은 결과는 채취된 시료를 현장 유효응력까지 압밀하는 과정에서 교란이나 압밀의 영향이 상당히 감소했기 때문인 것으로 생각된다.

한편, Berre(1981)는 현장유효응력으로 압밀 시켰을 때의 체적 변형률을 이용하여 시료의 교란 정도를 판단할 수 있는 방법을 제시한 바 있는데 이것을 정리하면 표 3과 같다. 이 표를 이용하여 시료의 품질을 평가한 결과를 표 4에 정리하였다.

여기서, 과압밀비(OCR)는 CRS시험으로 구한 값을 사용했으며 체적변형률은 $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ 를 이용해서 구했다. 그 결과, FPS(13.4m)를 제외한 모든 시료가 양호한 것으로 평가되었다. FPS(13.4m)가 불량으로 평가된 것은 그림 9의 $(\sigma_1' + \sigma_3')/2 - (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 곡선의 형태를 통해서도 알 수 있듯이 시료 자체에 많은 교란이 생겼기 때문인 것으로 생각된다.

5.3 표준압밀시험 성과 비교

HPS, FPS, FPS(Exp) 세 시료에 대하여 표준압

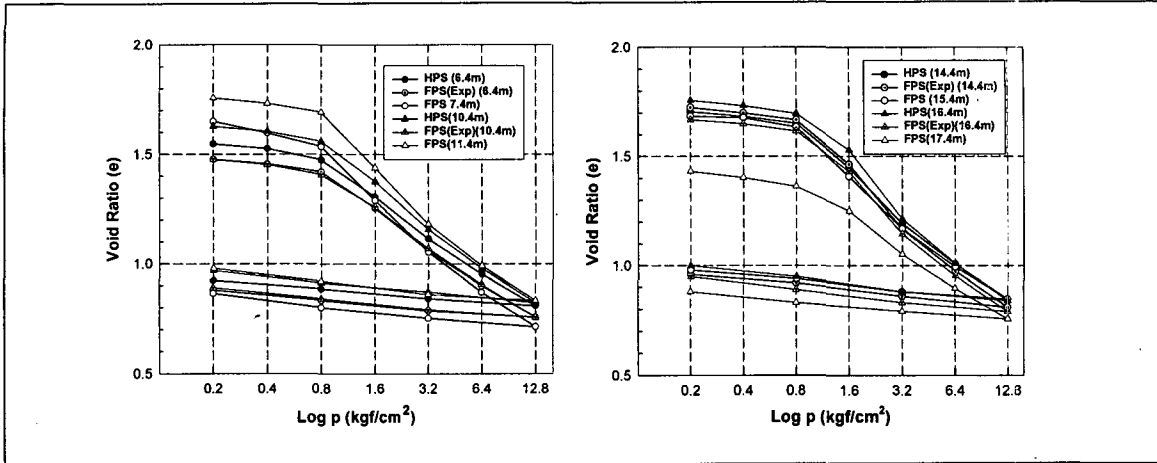


그림 10. 압밀곡선의 심도별 형태(표준압밀시험에 의함)

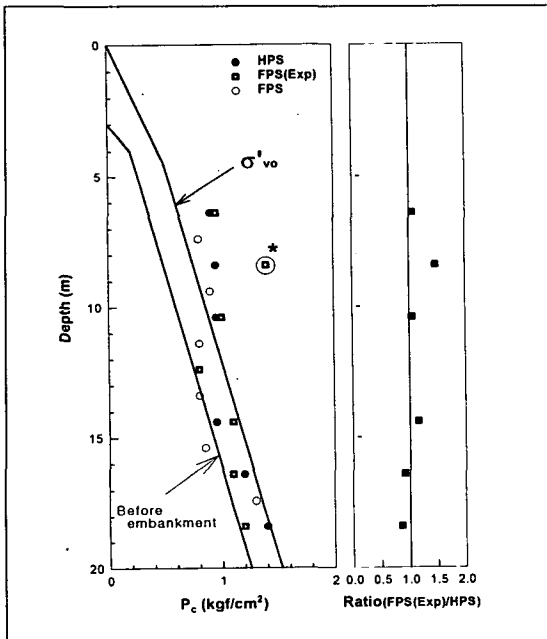


그림 11. 선행압밀압력(표준압밀시험에 의함)

밀시험(Standard Consolidation Test)을 하였다. FPS는 채취심도가 달라서 정확한 비교가 될 수 없었기 때문에 HPS와 FPS(Exp)의 비교에 중점을 두면서 FPS는 참고 자료로서 활용하였다. HPS와 FPS(Exp)의 압밀곡선(그림 10)은 거의 모든 심도

에서 HPS의 간극비가 임의 하중에 대하여 FPS(Exp)의 간극비보다 더 큰 값을 보였는데, 이것은 HPS(Exp) 시료를 미리 추출하여 보관하는 과정에서 시간 경과에 따른 교란이 발생했기 때문인 것으로 생각된다.

선행압밀압력은 HPS가 0.9~1.4, FPS(Exp)가 0.8~1.1, 그리고 FPS가 0.8~1.3의 범위로 조사되었다(그림 11). HPS와 FPS(Exp)는 과대 평가된 것으로 생각되는 한 점(* 표시)을 제외하고는 12.4m 까지 거의 같은 값을 보였으며 그 이상의 심도에 대해서는 최대 15% 이내의 차이를 보였다. FPS의 경우에는 채취 깊이가 나머지 두 시료와 달라서 정확한 비교는 할 수 없었지만 깊이별 변화 추이를 통해서 살펴 볼 때 동일 깊이에서의 그 차이가 약 15% 이내에 존재할 것으로 추측된다. 선행압밀압력에서의 FPS(Exp)/HPS의 비는 약 13.4m까지는 FPS(Exp)가 더 컸지만 그 이후로는 HPS에서 더 큰 값을 보였다. 하지만, 표준압밀시험에서 얻어진 선행압밀압력은 그 값을 구하는 사람에 따라서 달라질 수 있으므로 이 결과를 이용해서 교란에 관한 어떠한 경향을 말하기는 힘들 것으로 생각된다.

압밀계수의 경우에는, 압밀 초기에는 약간의 차이를 보였지만 압밀압력이 선행압밀하중에 해당하는

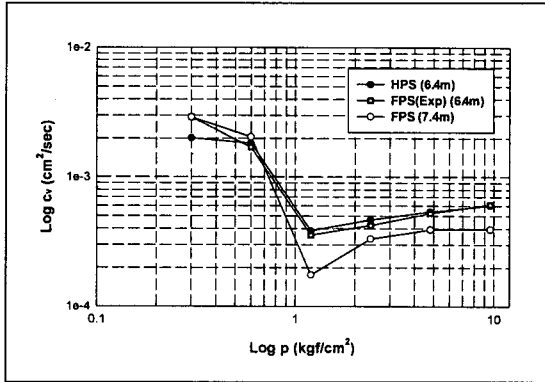


그림 12. 압밀계수(표준압밀시험에 의한)

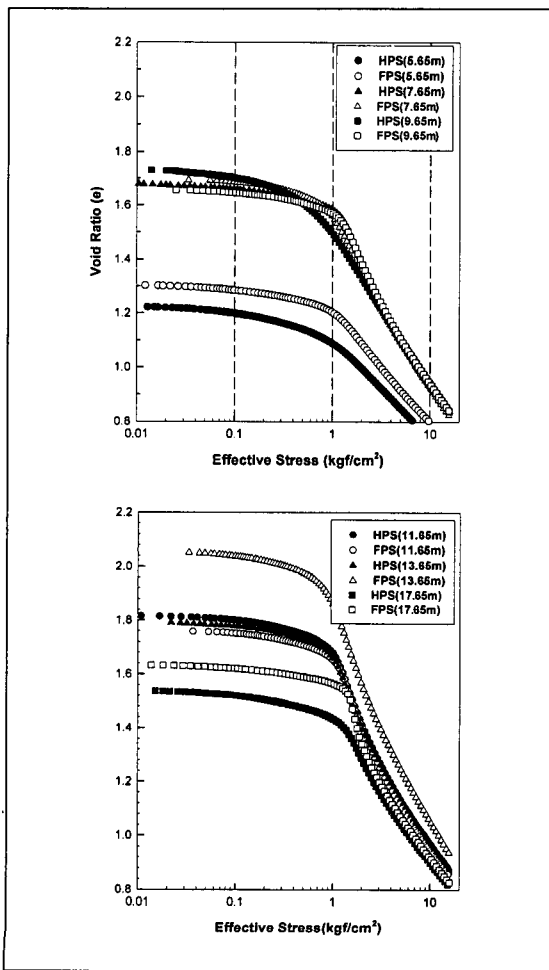


그림 13. 압밀곡선의 심도별 형태(CRS시험에 의한)

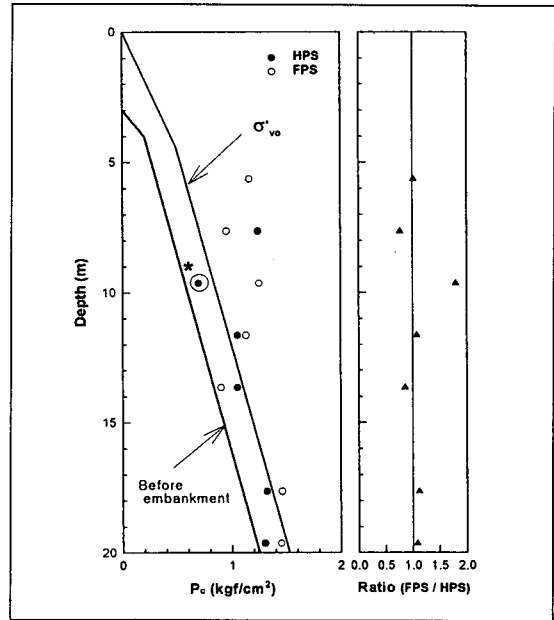


그림 14. 선행압밀압력(CRS시험에 의한)

약 1(kg/cm²)을 넘어서면서부터는 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있다(그림 12).

5.4 일정변형률 압밀시험의 성과 비교

변형률을 0.02%/min로 하여 HPS와 FPS 두 시료에 대한 CRS 시험을 하였다. 압밀정수는 Wissa 등(1971)이 제시한 방법을 사용하였으며 변형률은 액성한계에 따른 추천 변형률을 참고로 하였다 (ASTM D4186-89).

압밀곡선에서의 최소 곡률반경은 HPS보다 FPS에서 더 뚜렷이 나타났으며 선행압밀압력보다 큰 응력 하에서의 두 곡선이 거의 일치했다(그림 13). 그리고 선행압밀압력도 과소 평가된 것으로 생각되는 한 점(*표시)을 제외하고는 거의 같은 값을 나타냈다(그림 14).

압밀계수는 압밀압력이 현장유효응력 보다 작을 때에는 압밀계수가 불규칙적인 경향을 보였지만 현장유효응력을 초과하게 되면서부터 거의 같은 값을 가지면서 일정해지는 경향을 볼 수 있다. 그러나, 비

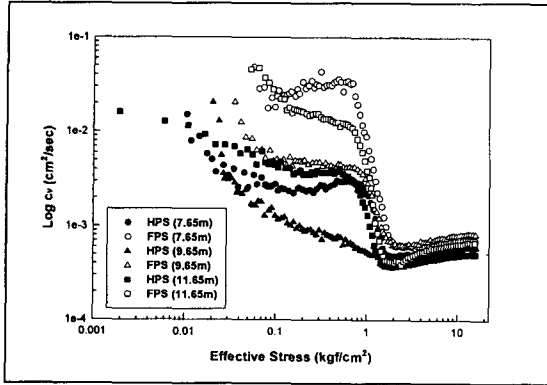


그림 15. 압밀계수(CRS시험에 의한)

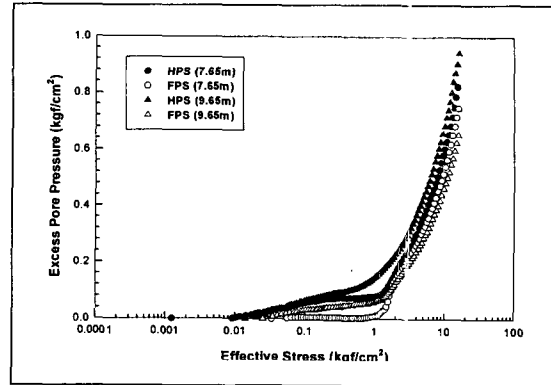


그림 16. 과잉간극수압(CRS시험에 의한)

록 초기의 값들이 불규칙적이기는 하지만 일정한 값을 나타내기 전까지는 임의 하중에 대해서 FPS의 압밀계수가 항상 큰 값을 보였는데, 이것은 HPS의 교란의 정도가 FPS보다 큰 것에서 기인된 것으로 생각된다(그림 15).

그림 16은 압밀 중에 발생한 과잉간극수압을 측정하여 깊이별로 비교한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이, 재압축 구간에서 아주 작은 값과 증가를 보이던 과잉간극수압은 하중이 선행압밀하중에 가까워지면서부터 갑작스럽게 증가하는 경향을 보이는데, 임

의 하중에 대해서는 HPS가 FPS보다 항상 큰 값을 보였다. 그러므로, 과잉간극수압에서의 이와 같은 뚜렷한 차이를 이용하면 앞으로의 시료 교란도 연구에 도움이 될 것으로 생각된다.

5.5 현장유�효응력조건 하에서의 압밀계수

그림 17은 표준압밀시험과 CRS 시험 결과에 대해서 현장유�효응력조건 상태의 압밀계수를 비교한 것이다. 표준압밀시험의 경우에는 비교 심도가 달라서 정확한 판단은 할 수 없었지만 대체적으로 FPS에서 구한 압밀계수가 더 크게 평가되었으며, 동일심도에서 비교한 CRS시험은 FPS가 HPS보다 더 크게 평가된다는 것을 정확하게 알 수 있다.

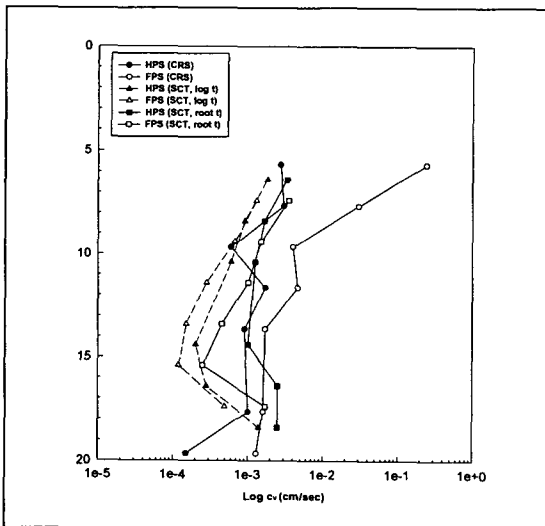


그림 17. 현장유�효응력조건 하에서의 압밀계수

6. 결론

샘플러의 종류에 따라 흙시료의 교란정도를 판단하기 위해 고정 피스톤식 샘플러와 수압 피스톤식 샘플러로 채취된 시료에 대해서 실내시험을 행하였다. 세 종류의 시료에 대한 물리적·역학적 특성을 비교·분석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일축압축시험에서는 HPS 보다 FPS의 품질이 더 좋은 것으로 나타났지만 압밀비배수 삼축압

축시험(CU)에서는 품질의 우열을 논할만한 뚜렷한 판단의 근거를 발견할 수 없었다. 이는 채취된 시료를 현장 유효응력까지 압밀하는 과정에서 교란이나 압밀의 영향이 상당히 감소했기 때문인 것으로 생각된다.

- 2) HPS와 FPS의 일축압축강도에 대한 변형계수의 비(E_{50}/q_u)는 FPS가 전반적으로 큰 값을 보였는데 이것은 FPS의 교란성이 적음을 나타낸다.
- 3) 삼축압축시험시 현장유효응력으로 압밀했을 때의 체적변형률을 통해서 HPS와 FPS의 품질을 비교해 본 결과, 두 시료 모두 아주 양호하거나 양호한 것으로 나타났다
- 4) HPS와 FPS(Exp)에 대해 표준압밀시험을 해본 결과, 두 곡선이 거의 일치하는 14.4m를 제외한 모든 심도에서 FPS(Exp)의 간극비가 임의 하중에 대하여 더 작은 값을 나타내는 것으로 조사되었다.
- 5) CRS 시험의 경우, 압밀곡선에서의 최소 곡률반경이 HPS보다 FPS에서 더 뚜렷이 나타났으며 선행압밀압력보다 큰 응력 하에서의 두 곡선이 거의 일치했다.
- 6) CRS 시험을 통해 측정된 간극수압과 간극수압비는 HPS에서 항상 큰 값을 보이다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였으며 압밀계수는 그 반대의 경향을 보였다. 이러한 뚜렷한 차이를 이용한다면 교란도의 추정에 도움이 될 것으로 생각된다.
- 7) 현장유효응력 조건 하에서의 압밀계수는 HPS에서 보다 FPS에서 크게 나타났다.

이상의 내용으로 살펴 볼 때 FPS가 품질 적인 면에서 HPS 보다 더 나은 것으로 나타났다. 앞에서도 살펴봤듯이 사용된 튜브는 각각의 장단점을 가지고 있다.

따라서, 샘플의 품질이 튜브에 의해 결정되었다고는 보기 어려우며 오히려 수압식에서 수압이 일정하지 않거나 수압에 의한 교란으로 HPS의 품질이 더 나쁘게 평가되었다고 생각된다. 따라서, 시료채취시 수압을 일정하게 조절할 수 있는 시스템의 개발이 필

요하다. 또한 교란된 시료에서 원지반의 역학적 특성(압밀, 강도)을 추정할 수 있는 새로운 방법에 대한 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

7. 감사의 글

본 고의 연구수행이 가능하도록 지원하여 주신 일본의 SUWA, TANAKA님과 (주)동아지질 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 北田奈緒子, 田中洋行, 朴性栽, 鄭京皖(1999), "釜山(梁山) 粘性土의土質力學的的特性", 第34回地盤工學研究發表會(東京), pp. 271~272
2. 三鳥 理, 田中洋行, 朴性栽, 鄭京皖(1999), "釜山(梁山) 粘性土의工學的的特性(その2) - 壓密・一軸壓縮試驗 -", 第34回地盤工學研究發表會(東京), pp. 535~536
3. 鄭京皖, 朴性栽, 北田奈緒子, 田中洋行(1999), "釜山(梁山) 粘性土의工學的的特性(その1) - 物理・化學特性 -", 第34回地盤工學研究發表會(東京), pp. 533~534
4. ASTM D4186-89, "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading"
5. Berre, T.(1981), Triaxial Testing at the Norwegian Geotechnical Institute/Norwegian Geotechnical Institute, Publication 134, pp.7~23
6. Ladd, C.C. and Lambe, T.W.(1963), "The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests", ASTM, STP361
7. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S.(1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 97(10), pp. 1393~1413