

공간비에 의한 재성형 이암 풍화토의 상태경계면 변화 Variation of State Boundary Surface of Remolded Weathered Mudstone soil by spacing ratio

김기영¹⁾, Kim Ki-Young, 전제성²⁾, Jeon Je-Sung, 이종욱³⁾, Lee, Jong-Wook, 김재홍³⁾, Kim, Je-Hong

¹⁾ 수자원연구원 지반구조연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

²⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

³⁾ 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher in Dam Safety Research Center KIWE

SYNOPSIS : Critical state theory involves two state boundary surface. One is Roscoe surface and the other is Hvorslev surface. The shape of these boundary surface was changed because of several parameters : Critical state constant(M), spacing ratio (r) and critical state pore pressure coefficient(Λ). As these constants make difference to each model and the way of solution, they may affect the shape of state boundary surface. Specially, spacing ratio (r) is important. On this study, triaxial compression test was performed using remolded weathered mudstone soil and investigated variation of state boundary surface because of spacing ratio. In the results of prediction, critical state point was located highly and the shape of boundary surface was changed more tightly curve as decreasing spacing ratio.

Keywords : Critical State Theory, State Boundary Surface, Spacing Ratio, Triaxial Compression Test

1. 서론

한계상태 모델의 상태경계면은 정규압밀시료의 응력경로를 평균등가응력(p_e')으로 정규화시켜 p'/p_e' 와 q/p_e' 평면상에 나타낸 Roscoe 곡면과 동일 평면상에 과압밀된 점토의 거동특성을 2 가지 상수(g, h) 로 표현하는 Hvorslev 면으로 구성되어진다. 한계상태 모델 중 Cam-Clay 이론이나, 수정 Cam-Clay 모델에서는 항복면의 중심이 각각 $0.368p_c, 0.5p_c$ 로 일정하다고 보는 반면, 일부 학자들은 항복면의 중심이 토질의 종류에 따라 달리 나타날 수 있다고 보고 있다. 다시 말해 대상 토질에 따라 한계상태 공간비(r)가 달라질 경우 소성변형률비(ψ)의 차이로 인하여 상태경계면의 중심과 그 형상이 변화할 수 있다는 것이다. 이 연구에서는 재성형된 이암풍화토를 이용하여 한계상태 이론의 공간비에 따른 항복면의 변화 양상을 검토하였으며, 그 결과 공간비가 작아질수록 한계 상태점은 높고, 항복면의 형상은 상대적으로 더 볼록한 형태로 변화함을 확인하였다. 따라서 적절한 공간비의 도출방법과 그 결과를 이용할 경우 토질특성에 따른 좀 더 유연한 응력-변형거동 예측이 가능할 것으로 판단된다.

2. 한계상태이론의 상태경계면

한계상태이론은 점토의 응력거동에 따른 상태경계면을 정규압밀 영역과 과압밀 영역으로 나누어 규정하고 있다. Roscoe면이란 정규압밀시료의 응력경로를 평균등가응력(p_e')으로 정규화시켜 p'/p_e' 와 q/p_e' 평면상에 나타내었을 경우 나타나는 일정 곡면을 의미하고, 이때 평균등가응력이란 전단전까지 가해진 압밀 응력을 말한다. Parry(1960)는 과압밀된 점토에 대한 일련의 압축시험에서 배수시험 및 비배

수 시험의 데이터를 정규화된 $p'/p_e' - q/p_e'$ 면 상에 나타낼 경우 응력경로의 최종점은 단일 선상에 놓이게 되며, 그 선상의 오른쪽은 Roscoe면과 만나게 되는데 이 경계면을 Hvorslev 면이라 규정하였으며 이 면을 식(1)과 같은 두 가지 상수(g, h)로 표현하였다.

$$\frac{q}{p'_e} = h\left(g + \frac{p'_e}{p'_e}\right) \quad \text{식(1)}$$

3. 실내시험

3.1 기본물성시험

본 연구에 사용된 이암풍화토는 경북 포항지역에서 채취된 것으로 채취된 이암풍화토를 자연 건조시킨 후 No. 40번 체로 거른 다음 예비압밀 토조에서 액성한계의 약 2배 가량의 함수비로 수일간 교반 시킴과 동시에 진공압을 이용하여 시료 속의 공기를 최대한 제거하였다. 이후 Slurry 상태의 시료를 예비압밀 토조에서 4, 8, 15, 30, 60 kPa로 단계 압밀시켰다. 이후 채취된 시료는 함수비의 변화를 방지하기 위해 파라핀으로 밀봉하여 습윤상자 속에 보관하였다. 이암풍화토의 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 1. 이암풍화토의 물리적 특성

G_s	LL(%)	PL(%)	PI	#200통과율(%)	USCS
2.59	58	23	35	84	CH

3.2 삼축압축시험

이 연구에서 정규압밀시료에 대한 최대 수직 구속압은 각각 200, 300, 400, 600kPa, 그리고 과압밀 시료의 OCR 값은 각각 2, 4, 8, 10, 12로 나누어 시험하였다. 전단 시 재하속도의 결정은 Blight(1963)의 방법을 이용하여 결정하였으며 정규압밀, 과압밀시료 모두 동일한 0.1%/min의 재하율을 사용하였다. 각 시료의 삼축압축 시험결과는 표 2, 그림 1, 2, 3, 4와 같다.

표 2. 삼축압축시험결과

시험방법	과압 밀비	수직구속압 (σ_v') (kPa)	최대축차응력 ($\sigma_1' - \sigma_3'$) _{max} (kPa)	비배수 전단강도 (S_u)	$S_{u'}/\sigma_v'$	$S_{u'}/P_m$	유효마찰각(ϕ)		과파시 간극수압계수(A_r)		
							최대 축차응력 기준	최대 주응력비 기준	최대 축차응력 기준	최대 주응력비 기준	
정규 압밀	CIUC	1	200	180.2	90.1	0.45	0.45	34.5°	34.5°	0.74	0.74
		1	300	256.86	128.43	0.43	0.43			0.75	0.77
		1	400	344.51	172.25	0.43	0.43			0.77	0.77
		1	600	524.51	262.25	0.44	0.44			0.75	0.75
과압 밀	CIUC	2	300	417.35	208.7	0.7	0.7	27.18°	34.5°	0.31	0.32
		4	150	367.81	183.9	1.23	1.23			0.06	0.06
		8	75	303.04	151.5	2.02	2.02			-0.09	0.14
		10	60	267.99	134	2.23	2.23			-0.13	0.06
		12	50	252.02	126	2.52	2.52			-0.16	0.02

정규압밀시료의 경우 구속압이 커질수록 최대축차응력은 증가하였으며, 최대응력은 변형률 12~14% 범위에서 발생하였다. 축변형률에 따른 과잉 간극수압의 크기는 구속압이 증가할수록 높게 나타났으며, 그

크기는 구속압의 약 75% 수준으로 나타났다..

과압밀시료의 파괴시 변형률은 정규압밀에 비하여 상당히 낮은 변형률에서 나타났으며, 과압밀비가 증가할수록 초기 응력-변형률 곡선의 기울기가 상당히 완만하며 최대 축차응력은 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 과압밀비 8이상에서 부의 간극수압이 발생하였다.

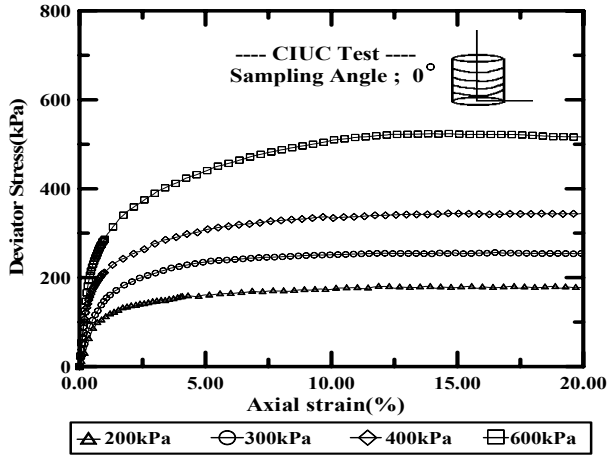


그림 1. 응력-축변형률(정규압밀)

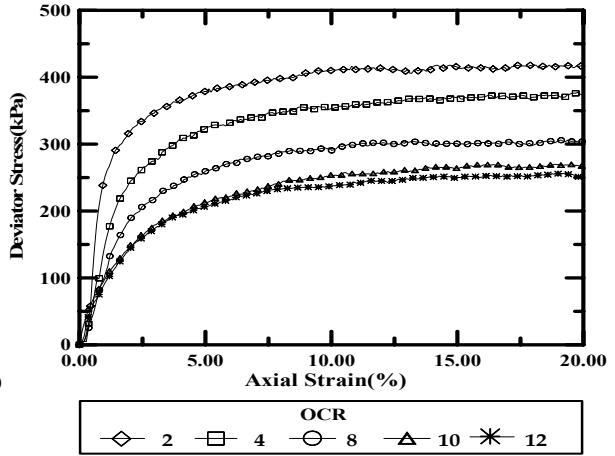


그림 2. 응력-축변형률(과압밀)

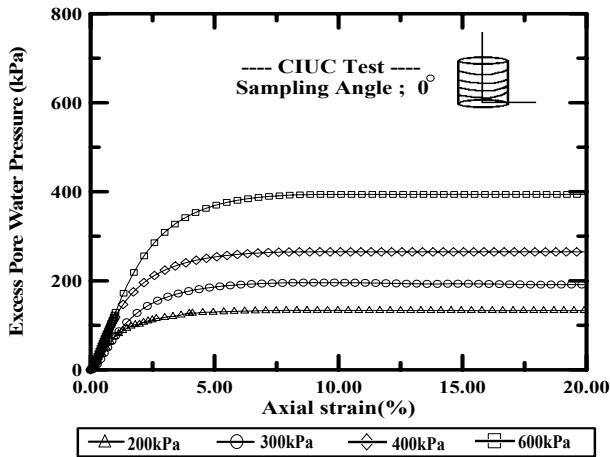


그림 3. 과잉간극수압-축변형률(정규압밀)

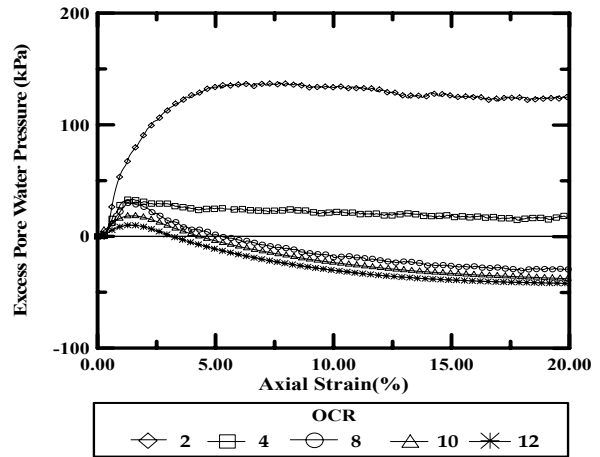


그림 4. 과잉간극수압-축변형률(과압밀)

3.3 한계상태상수

3.3.1 공간비(λ)

한계상태 공간비란 $\ln p' - v$ 평면상에서 팽창곡선위에 나타나는 정규압밀상태에 대한 한계상태의 체적비를 의미하며, 도출방식에 따라 조금씩의 차이를 나타낸다. Cam-Clay 모델 및 수정 Cam-Clay 모델의 경우 공간비는 2.72와 2.0으로 일정하게 규정하고 있는 반면, Wroth(1984)는 비배수 전단강도부터 한계상태 공간비를 도출하는 방법을 제시하고 시료에 따라 그 값이 변화한다고 발표한 바 있다. 모델별 공간비는 표 3과 같다.

표 3. 모델별 공간비

방법	Cam-Clay 모델	M.C.C 모델	Wroth(1984)의 강도식
한계상태 공간비(r)	2.72	2.0	1.86

3.3.2 상태경계면

그림 5(a)는 각 구속압에서의 응력경로를 정규화시켜 나타낸 그림으로 실선으로 표시된 면은 수정 Cam-Clay 이론을 이용한 이론적인 Roscoe 면을 나타낸 것으로 그림에서처럼 비배수 거동 경로는 변형초기에 이론적인 Roscoe 면과 이론상의 한계상태점을 다소 벗어나는 양상을 나타내었다.

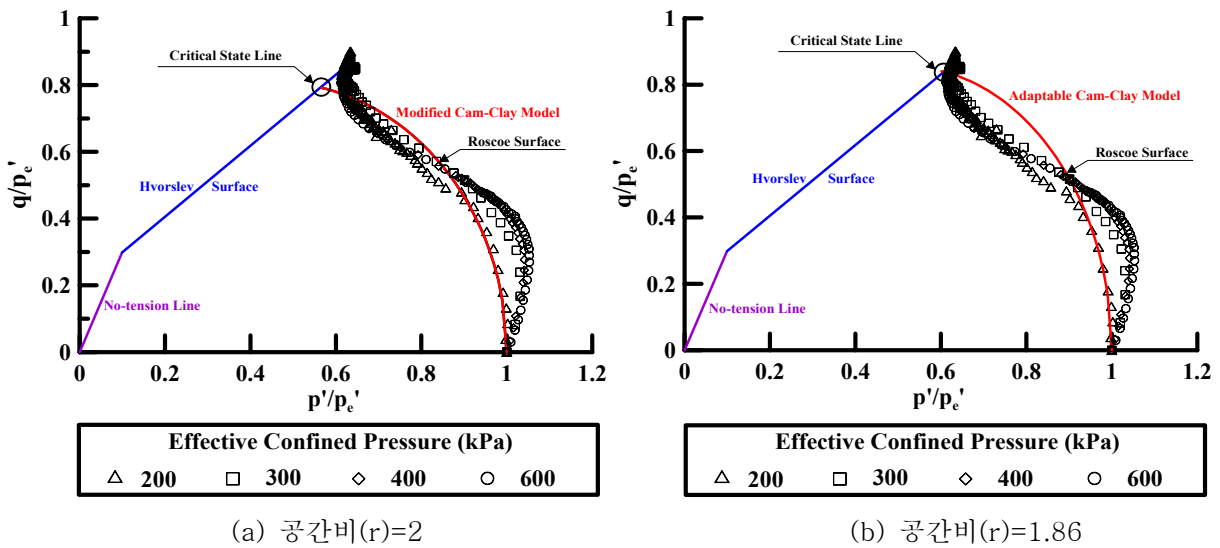


그림 5. 공간비에 따른 Roscoe면의 변화

그림 5(b)는 Wroth의 공간비를 적용한 응력경로를 이론적인 Roscoe 면과 함께 도시한 것이다. 강도식으로부터 구해진 공간비를 적용한 경우 이론적인 Roscoe 면이 실측치의 최대 응력 경로점에 조금 더 근접하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 적용 Cam-Clay 이론의 전단변형률은 수정 Cam-Clay 모델과 동일한 방법으로 구해지지만 항복면을 규정하는 함수가 달라지므로 소성변형률비(ψ)가 달라지기 때문으로 판단된다. 그림 6은 과압밀시료의 시험결과를 평균 등가응력(p'_e)으로 정규화시킨 응력거동 양상으로 과압밀비에 상관없이 일정 선상에서 파괴가 일어나고 있어 Hvorslev면의 존재를 확인할 수 있었으며, Hvorslev 상수 g, h 는 각각 0.17, 1.08 로 나타났다. 또한 Worth(1968)은 Hvorslev 면에서 얻어진 상수 g, h 를 이용하여 정규화된 ϕ'_e, c'_{pe} 를 식(2)와 같이 제안하였으며, 그 결과 이암풍화토의 ϕ'_e, c'_{pe} 는 각각 27.18°, 0.09로 나타났다. 표 4는 3 가지 종류의 점토를 대상으로 구해진 Hvorslev 강도 정수와 비교한 것이며, 정규압밀 영역의 Roscoe 면과 과압밀 영역의 Hvorslev면의 조합하여 나타낸 상태경계면의 양상은 그림 7, 8과 같다. 그림 7의 실선 부분은 수정 Cam-Clay 이론에서 구해진 항복곡면을 나타낸 그림이며, 그림 8의 실선 부분은 Wroth의 공간비를 적용해 구해진 항복곡면을 도시한 것이다.

전자에서 언급한대로 공간비에 따라 항복면의 형태와 크기가 조금씩 변화하게 되는데 시험결과 공간비

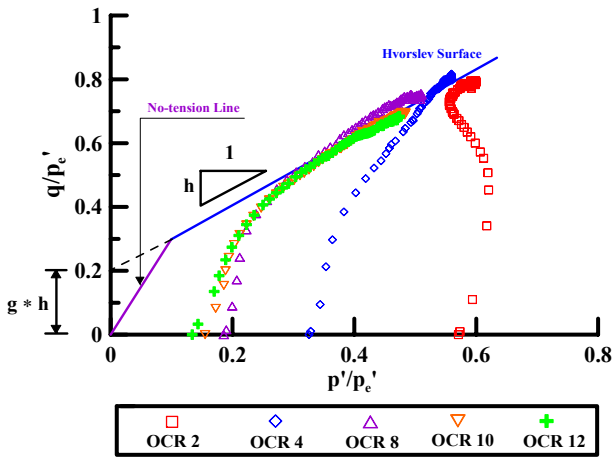


그림 6. 과압밀 영역의 Hvorslev면

표 4. 정규화된 ϕ'_e, c'_{pe}

Soil	c'_{pe}	ϕ'_e (deg)
Vienna Clay	0.141	17.5
Little Belt Clay	0.187	9.9
Weald Clay	0.046	18.8
이암풍화토	0.089	27.18

$$\sin \phi'_e = \frac{3h}{6+h} \quad \text{식(2)}$$

$$c'_{pe} = g \tan \phi'_e$$

가 작아질수록 한계상태점은 좀더 상향된 지점에 위치하고 항복면의 형상은 조금 더 볼록한 형태로 나타났다.

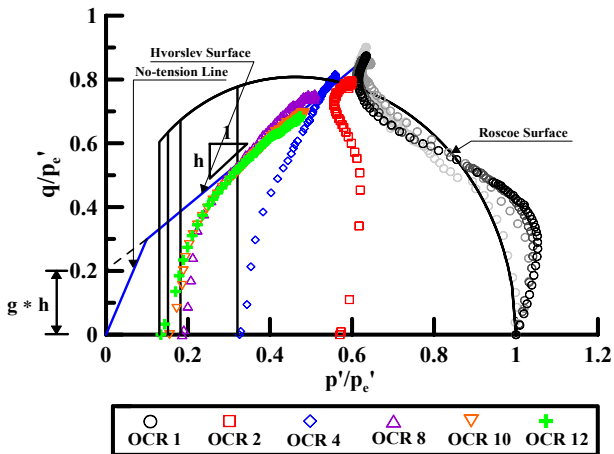


그림 7. 상태경계면의 양상(공간비=2)

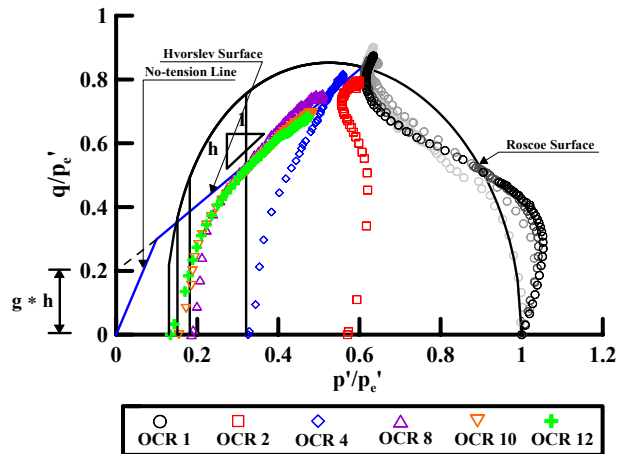


그림 8. 상태경계면의 양상(공간비=1.86)

5. 결론

한계상태 이론에서 공간비는 적용 모델과 시험결과의 도출방법에 따라 상이하며 이러한 차이는 상태경계면의 양상 및 중심위치를 조금씩 변화시키게 된다. 이암풍화토의 경우 공간비가 작아질수록 한계상태점의 위치는 상대적으로 커지고 항복면의 형상은 조금 더 볼록한 형태를 나타내었다. 따라서 적절한 공간비의 도출방법과 그 결과치를 이용할 경우 토질특성에 따른 좀 더 유연한 응력-변형거동 예측이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Parry, R. H. G. (1960), "Triaxial compression and extension tests on remolded saturated clay", *Geotechnique*, 10, pp.166-180.
2. Worth, C. P.(1984), "The Interpretation of Insitu Soil Test", *Geotechnique*, Vol. 34, No.4, pp.449-489.