

약간 과압밀된 점성토에서 발생하는 피에조콘 지연소산 메커니즘

Mechanism of Dilatory Dissipation during Piezocone Tests in Lightly Overconsolidated Cohesive Soil

하 태 균¹ Ha, Tae-Gyun

정 종 홍² Jung, Jong-Hong

김 홍 종³ Kim, Hong-Jong

박 래 선⁴ Park, Lae-Seon

정 충 기⁵ Chung, Choong-Ki

Abstract

For standard piezocones with shoulder filter elements immediately behind the cone tip, general dissipation curves show monotonically decreasing pore pressure from the initial value. However, dilatory dissipation behavior, showing a temporary increase in pore pressure followed by a decrease in the hydrostatic pressure, has been observed in lightly overconsolidated cohesive soils ($1 < OCR \leq 4$). This unusual dissipation behavior was reported mostly in heavily overconsolidated ground and previous researches were limited to such cases. In this study, the mechanism of dilatory dissipation in lightly overconsolidated cohesive soils was investigated. The relativities of the ground properties evaluated from the CPTu data to the dilatory dissipation were analyzed. And, finite difference analyses on dissipation after cone penetration were performed. It was found that dilatory dissipation occurs in lightly overconsolidated soils since the higher excess pore pressure at the cone face propagates upward to the shoulder filter. Also, it was shown that the ratio of initial excess pore pressure at the cone face to that of the shoulder filter ($\Delta u_1 / \Delta u_{2i}$), which is related to overconsolidation ratio (OCR) and hydrostatic pressure (u_0), affects the dilatory dissipation.

요 지

원추 후면에서 간극수압이 측정되는 표준 피에조콘의 경우, 일반적인 소산곡선은 간극수압이 초기값에서부터 단조적으로 감소하는 경향을 보인다. 그러나, 간극수압이 일시적으로 증가한 후에 감소하는 지연소산 거동이 과압밀비 4 이하의 약간 과압밀된 점성토 지반에서 확인되었다. 이와 같은 비정규적인 소산 거동은 주로 매우 과압밀된 지반에서 발생하는 것으로 보고되었으며, 기존의 연구도 이러한 경우로 한정되어 진행되었다. 본 연구에서는 약간 과압밀된 점성토 지반에서 발생하는 지연소산의 메커니즘을 규명하였다. 피에조콘 시험으로부터 산정된 지반의 특성과 지연소산의 상관성을 분석하였으며, 콘 관입 이후의 소산거동에 대하여 유한차분해석을 수행하였다. 연구 결과, 약간 과압밀된 점성토에서는 원추 선단에서 발생하는 큰 과잉간극수압이 원추 후면 필터로 상향 전파되어 지연소산이 유발되고, 과압밀비(OCR) 및 정수압(u_0)과 관련된 원추 선단과 원추 후면의 초기 과잉간극수압비($\Delta u_1 / \Delta u_{2i}$)가 지연소산에 영향을 미치는 것이 확인되었다.

Keywords : Dilatory dissipation, Finite difference analysis, Overconsolidated cohesive soil, Piezocone

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil and Environ. Engrg., Seoul National Univ., taegyun0@snu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Expressway and Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation)

3 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Expressway and Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation)

4 정회원, 한국도로공사 건설본부본부장 (Member, Executive Managing Director for Construction, Korea Expressway Corporation)

5 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof. School of Civil and Environ. Engrg., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

피에조콘 관입시험(piezocone penetration test, CPTu)은 지반 내부에 원추형 관입체를 일정한 속도(20mm/sec)로 관입시키면서 원추 관입저항력(q_c), 마찰저항력(f_s), 그리고 간극수압(u)을 측정하는 현장시험이다. 이 시험은 측정 결과를 심도에 따라 연속적으로 획득할 수 있고 토층 구분을 원활하게 할 수 있으며 지반의 다양한 역학적 특성들을 비교적 정확하게 구할 수 있으므로 현재 널리 활용되고 있다.

피에조콘 소산시험(piezocone dissipation test)은 특정 깊이에서 콘의 관입을 멈춘 후 시간에 따라 간극수압이 변화하는 양상을 측정함으로써 진행되며, 이 소산곡선으로부터 공동팽창이론(Torstensson, 1977), 변형률 경로법(Baligh & Levadoux, 1986), 유한요소해석(Teh & Houlsby, 1991) 등에 근거한 해석적 방법을 이용하여 지반의 현상수평압밀계수(c_h)를 구한다. 일반적으로 50% 압밀이 진행되는 데 소요되는 시간(t_{50})과 이에 해당하는 각 해석법의 시간계수(T_{50})가 c_h 산정에 이용된다. 간극수압은 원추 선단(U_1), 원추 후면(U_2), 주변마찰부(U_3) 등에서 측정되는데, 이 중 장비의 내구성을 확보하고 지반 특성 변화에 민감하게 반응하기 위하여 U_2 위치가 주로 이용된다(그림 1). 대부분의 상용화된 피에조콘은 U_2 위치에서만 간극수압을 측정할 수 있으며, 다양한 위치에서 간극수압을 측정할 수 있는 멀티 피에조콘은 연구를 목적으로 매우 드물게 활용되고 있다. 따라서 이 연구의 범위 또한 U_2 필터에서 간극수압이 측정된 경우로 한정하였다.

피에조콘 소산곡선은 그림 2에 나타난 바와 같이 과잉간극수압(Δu_2)이 경과시간에 따라 초기부터 단조적으로 감소하는 것으로 나타나며, 관련 해석 이론도 이를 근간으로 제시되었다. 그러나 표 1에 제시된 국내 7개

점성토 지역에서 수행한 피에조콘 소산시험의 결과를 살펴보면 초기에 과잉간극수압이 증가하여 최고치에 도달한 후에 감소하는 그림 3과 같은 비정규적인 소산곡선을 상당 부분 확인할 수 있다. Burns & Mayne(1998)은 이러한 형태의 비정규적인 소산곡선을 지연소산(dilatancy dissipation)으로 규정하였다. 본 연구에 활용한 전기적 콘관입시험기는 ISSMFE(1989)와 ASTM(1995) 표준 규격에 준한 장비로서 콘의 선단각 60°, 투영단면적 10cm², 마찰슬리브의 표준단면적 150cm²이다. 간극수압은 U_2 필터에서 측정되며, 실험 준비과정에서 콘의 포화에 만전을 기하였다. 본 연구에서 분석한 총 34회의 시험 결과 중 16회의 시험 결과에서 최대 과잉간극수압(Δu_{2max})이 초기 과잉간극수압(Δu_{2i})보다 10% 이상 증가한 지연소산이 확인되었다. 만일, 시험을 통해 얻어진 소산곡선과 이론해의 소산곡선의 형태가 유사하다면 이는 이론해에서 가정하고 있는 초기 과잉간극수압 발생과 분포, 그리고 사용된 압밀 이론이 적절함을 의미한다. 그러나 지연소산처럼 그 소산 양상이 매우 다를 경우에는 기존의 이론해를 바탕으로 도출된 압밀계수가 부적절할 수 있다.

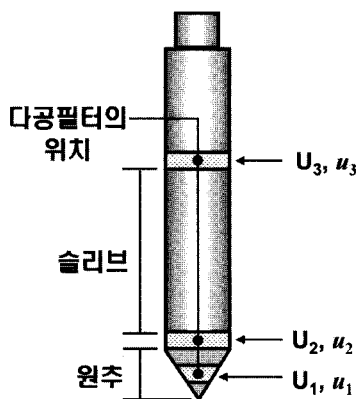


그림 1. 간극수압 필터의 위치(U_1, U_2, U_3)와 측정된 간극수압(u_1, u_2, u_3)

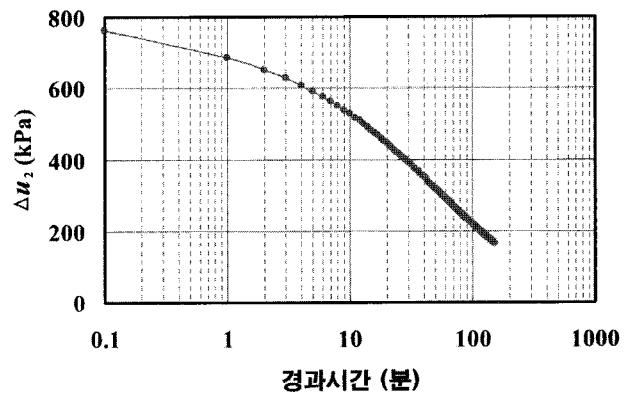


그림 2. 일반적인 소산시험 곡선

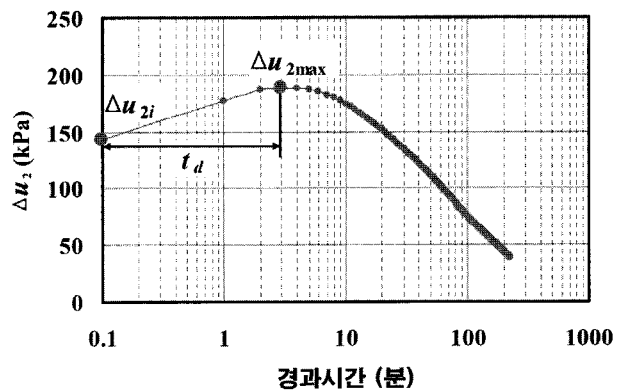


그림 3. 지연소산 곡선

표 1. 현장의 CPTu 데이터와 상관식으로 추정된 지반 특성 및 유한차분해석 결과

현장	CPTu 데이터						D_v (%)	OCR (Chen & Mayne)	지반분류 (이선재)	$\Delta u_1 / \Delta u_2$	$D_{d(FDA)}$ (%)		
	심도(m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)	u_{2i} (kPa)	u_0 (kPa)	u_{2max} (kPa)							
대저	3.2	0.32	0.1	90	12	113	30.1	2.52	CL	1.20	-		
	8.7	0.52	6.1	195	66	254	46.2	1.85	CL	1.42	-		
	12.1	0.68	0.5	289	98	329	20.7	1.85	CL	1.43	-		
	14	0.67	6.2	436	118	437	0.3	1.58	CL	1.24	-		
	16	0.71	7.2	499	137	500	0.3	1.45	CH	1.21	-		
남 약	#1	6.1	0.28	20.0	167	60	194	25.4	1.72	CL	1.41	-	
		6	0.49	12.1	175	49	228	42.2	2.95	CL	1.62	8.3	
	#2	119	0.45	11.7	500	107	502	0.5	1.32	CH	1.13	-	
		5.7	0.41	6.3	166	36	206	30.8	2.13	CL	1.29	-	
	#4	3.5	0.32	2.8	68	25	102	78.6	2.92	CL	1.89	16.6	
		9	0.53	4.2	303	78	313	4.4	2.15	CL	1.36	-	
	부산	5.3	0.23	1.4	133	42	138	6.3	1.27	CL	1.09	-	
	양 산	#1	16	0.72	16.7	463	147	494	9.8	1.57	CL	1.30	-
20			0.87	15.2	576	186	601	6.3	1.52	CL	1.29	-	
25			1.07	19.7	760	235	760	0.0	1.52	CH	1.27	-	
30			1.15	6.8	803	316	894	18.8	1.07	CH	1.19	-	
37.4			1.55	15.3	106.	357	1060	0.0	1.46	CH	1.28	-	
#2		20.6	0.94	5.5	601	143	601	0.0	1.27	CH	1.13	-	
		24.6	1.11	11.3	728	182	734	1.1	1.31	CH	1.15	-	
		37.3	1.46	19.5	1064	307	1064	0.0	1.16	CH	1.14	-	
		39.9	1.61	21.9	1041	333	1139	13.8	1.20	CH	1.18	-	
#3		5	0.24	1.2	120	39	135	18.1	1.44	CL	1.26	-	
		10	0.42	1.0	295	88	295	0.0	1.37	CH	1.21	-	
		14.7	0.59	2.5	365	134	382	7.3	1.29	CL	1.26	-	
		20.4	0.71	2.0	544	190	555	3.0	1.08	CH	1.16	-	
		24.8	0.86	1.5	587	233	597	2.9	1.06	CH	1.18	-	
군산		5	0.30	9.2	134	39	171	39.2	1.95	CL	1.37	-	
현풍		6.1	0.76	27.7	101	37	162	96.0	39.3	MH	2.34	28.7	
인 천		#1	18	1.29	5.0	306	127	376	39.3	2.17	MH	1.76	8.9
			24.8	1.49	35.6	403	194	521	56.2	1.86	MH	1.78	5.1
		#2	26	1.88	36.9	424	176	545	48.7	2.13	ML	1.73	7.8
			28.6	2.05	43.2	745	202	874	23.7	2.24	ML	1.41	-
	#3	20	1.38	4.8	454	98	469	4.3	1.76	MH	1.21	-	
		25	1.75	24.8	515	147	612	26.5	1.92	MH	1.35	-	

q_c : 원추 관입저항력, f_s : 마찰저항력, u_{2i} : 초기 간극수압, u_0 : 정수압, u_{2max} : 최대 간극수압, D_v ($= (\Delta u_{2max} - \Delta u_2) / \Delta u_2$): 지연소산 정도, $\Delta u_1 / \Delta u_2$: 원추 선단과 U_2 필터의 초기 과잉간극수압비, CL: 저소성성 점토, CH: 고소성성 점토, ML: 저소성성 실트, MH: 고소성성 실트

본 연구는 지연소산곡선에서 현장수평압밀계수(C_h)를 산정하는 적절한 해석법을 제안하기 위한 선행연구로서 지연소산의 메커니즘을 규명하고자 한다. CPTu 결과로부터 추정된 지반 특성과 지연소산의 상관성을 분석하였으며, 콘의 관입으로 발현되는 초기 과잉간극수압의 분포양상에 근거하여 유한차분해석을 수행하였고 이를 통해 지연소산을 모델링하였다. 특히, 기존의 연구(Burns & Mayne 1998; Kim 2005)가 매우 과압밀된 지반을 대상으로 진행된 반면 본 연구에서는 과압밀비(OCR) 4 이하의 국내 점성토 지반에서 발생하는 지연소산에 주목하였다.

2. 지반 특성과 지연소산의 상관성

연약한 세립질의 실트와 점토 지반에서 피에조콘 소산시험을 수행할 경우 과잉간극수압은 초기부터 단조적으로 감소하는 반면, 매우 과압밀된 실트나 점토 지반에서는 일시적으로 과잉간극수압이 증가하여 최대값(Δu_{2max})에 도달한 후 정수압(Δu_0)으로 감소하는 양상을 보이는 것이 여러 연구 결과로부터 확인되었다(Davidson 1985; Lutenegger & Kabir 1988; Chen & Mayne 1994).

대상 지반의 특성과 지연소산의 상관성을 파악하기 위하여 OCR을 산정하고 흙을 분류하였다. CPTu 데이터를 이용하여 OCR을 추정하는 방법으로는 통계적 기

법이나 회귀분석을 통해 제안된 경험적 방법(Chang 1991; Chen & Mayne 1996)과 흙의 이론적 거동모델을 도입한 이론적 방법(Konrad & Law 1987; Mayne & Bachus 1988)이 있다. 이 중 Chen & Mayne(1996)이 경험적으로 제안한 식 (1)과 Mayne & Holtz(1988)가 제안한 상관계수($N_{\alpha}=2.5$)를 이용해서 선행압밀하중(σ_p')을 구하고 OCR을 산정하였다.

$$\sigma_p' = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{\alpha}} \quad (1)$$

여기서, σ_p' : 선행압밀하중

q_t : 보정된 선단저항값($q_t = q_c + (1-a)u_2$)

σ_{v0} : 연직응력

N_{α} : 상관계수

흙의 분류는 이선재(1998)가 국내 연약지반에서 수행한 CPTu 결과를 바탕으로 통일분류법에 근거하여 제안한 정규화된 콘 저항값, $Q_t=(q_t-\sigma_{v0})/\sigma_{v0}$ 와 간극수압계수, $B_q=(u_2-u_0)/(q_t-\sigma_{v0})$ 의 분류도표를 이용하여 수행하였다. 한편, 지연소산은 그림 3에 제시된 바와 같이 정규화된 과잉간극수압의 증가량($(\Delta u_{2max}-\Delta u_2)/\Delta u_2$)과 최대 과잉간극수압에 도달하는 시간(t_d)으로 그 양상을 정량화할 수 있는데, 이 중 t_d 는 지반의 압밀계수와 직접적으로 관련되므로 지연소산에 대한 적절한 해석법이 없는 현 상황에서 비교변수로 사용할 수 없다. 따라서 $(\Delta u_{2max}-\Delta u_2)/\Delta u_2$ 를 ‘지연소산 정도(D_d , degree of dilatatory dissipation)’로 정의하고 이것과 지반 특성을 비교 분석하였다.

표 1에 제시된 것처럼 대상 지반은 $1.06 \leq OCR \leq 3.93$ 의 약간 과압밀된 실트 및 점토에 해당한다. D_d 는 최고 95.9%까지 확인되었으며, 기존의 연구 결과와는 달리 약간 과압밀된 지반($1 < OCR \leq 4$)에서도 지연소산이 발생하였다. OCR과 지연소산의 상관관계는 그림 4에 제시되어 있다. OCR이 커질수록 D_d 가 증가하는 경향을 보이며 결정계수(R^2)는 0.6961이다. 일반적인 통계적 기준에서 R^2 가 0.4~0.7의 범위에 속하면 상당히 상관관계가 있다고 간주되므로 OCR과 지연소산은 상관성이 있다고 판단된다. 참고로, OCR을 산정하는 기타 상관식과 상관계수를 이용하더라도 유사한 결과가 확인되었다.

흙의 종류와 지연소산의 상관관계는 그림 5에 제시되어 있다. 실트(MH, ML)의 평균적인 D_d 는 42.1%로 점토(CH, CL)의 평균값인 15.0%에 비하여 2.8배 크다. 그러

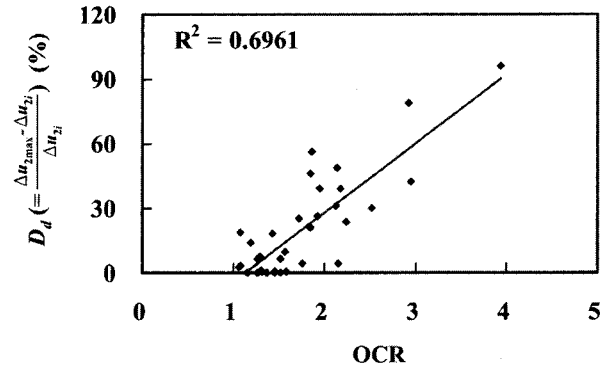


그림 4. 과압밀비와 지연소산의 상관관계

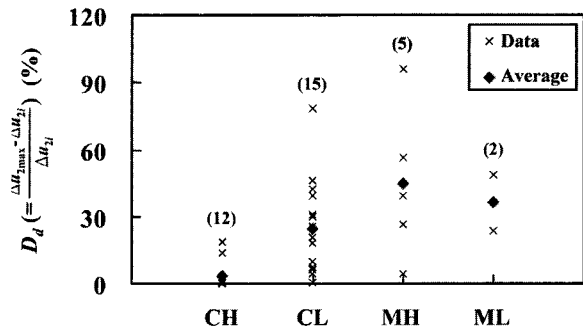


그림 5. 흙의 종류와 지연소산의 상관관계: 이선재(1998) 분류도표 (Q_t-B_q)이용

나 실트의 데이터 수가 적고, 지연소산이 거의 발생하지 않은 것부터 심하게 발생하는 것까지 고루 분포하는 점으로 미루어 실트와 점토의 차이, 즉 흙 입자의 크기가 지연소산과 관련이 있다고 단정하기에는 무리가 있다. 한편, 소성성의 측면에서 저소성성 흙(ML, CL)의 평균적인 D_d 는 25.8%로 고소성성 흙(MH, CH)의 평균값인 15.5%에 비하여 1.6배 컸다. 그러나 역시 데이터의 분산이 매우 크고, 실트의 경우에는 오히려 고소성성 흙에서 D_d 가 더 크게 나타난 관계로 소성성과 지연소산 사이에는 직접적인 관련성이 없는 것으로 판단된다.

3. 지연소산의 메커니즘

매우 과압밀된 지반에서 발생하는 지연소산 메커니즘에 대한 기존의 연구결과를 살펴보고, 이에 착안하여 본 연구의 주요 관심 대상인 약간 과압밀된 지반에서 발생하는 지연소산의 메커니즘을 규명하였다.

3.1. 매우 과압밀된 지반: 과잉간극수압의 횡방향 전파

Burns & Mayne(1998)은 콘의 관입으로 발생하는 U_2 위치에서의 과잉간극수압 횡방향 분포양상과 이에 따

른 일차원 압밀해석을 통해 매우 과압밀된 점성토에서 발생하는 지연소산의 메커니즘을 다음과 같이 설명했다. 1) 콘의 관입으로 발생하는 원추 후면(U_2)에서의 초기 과잉간극수압(Δu_{2i})은 관입시 연직응력성분에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{2oct})과 관입시 전단응력성분에 의해 발생하는 과잉간극수압(Δu_{2shear})의 합이다(식 (2)). 2) 구형 공동팽창이론으로부터 식 (3)을 통해 산정할 수 있는 Δu_{2oct} 는 항상 양의 값을 가지며, 소성영역 내에서 중심으로부터 거리에 따라 반대수적으로 감소하는 분포를 갖는다. 3) Δu_{2shear} 는 Worth(1984)가 제안한 콘의 관입에 따른 응력경로와 Modified Cam-Clay 모델을 통해 식 (4)로 표현되며, 전단영역 내에서 선형적으로 분포한다. 4) 소성영역 반경(r_p)은 구형 공동팽창이론에 의거하여 식 (5)로 구하며, 전단영역의 범위(r_s)는 1~10mm로 가정한다. 5) U_2 위치에서의 초기 과잉간극수압 횡방향 분포양상은 Δu_{2shear} 의 분포와 Δu_{2oct} 의 분포를 조합한다. 특히, 매우 과압밀된 지반($OCR > 10$)에 콘이 관입될 경우에는 식 (4)에서 확인되는 것처럼 Δu_{2shear}

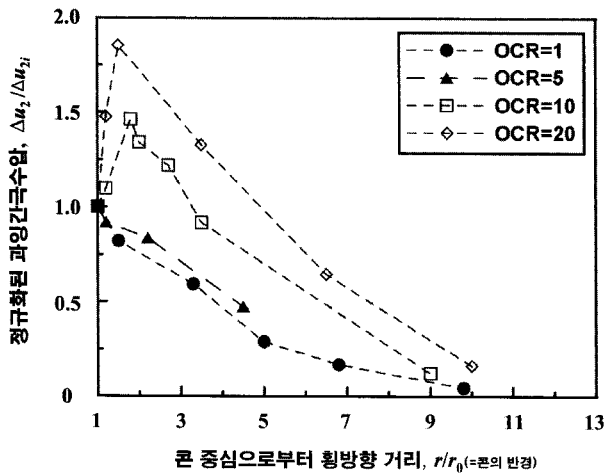


그림 7. 과압밀비에 따른 초기 과잉간극수압의 횡방향 분포(Kim et al., 2007)

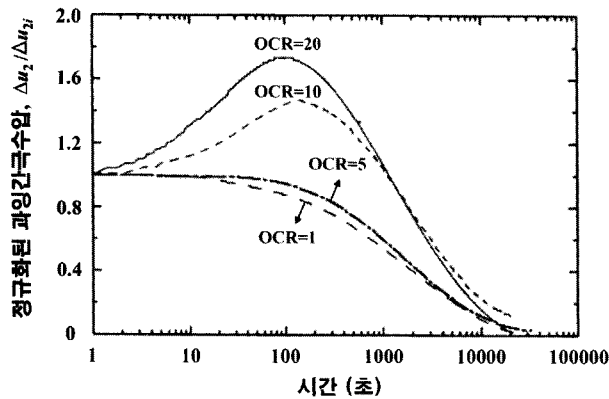
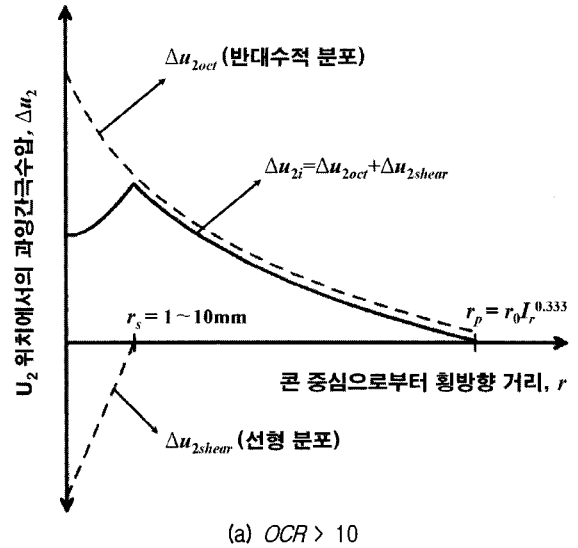
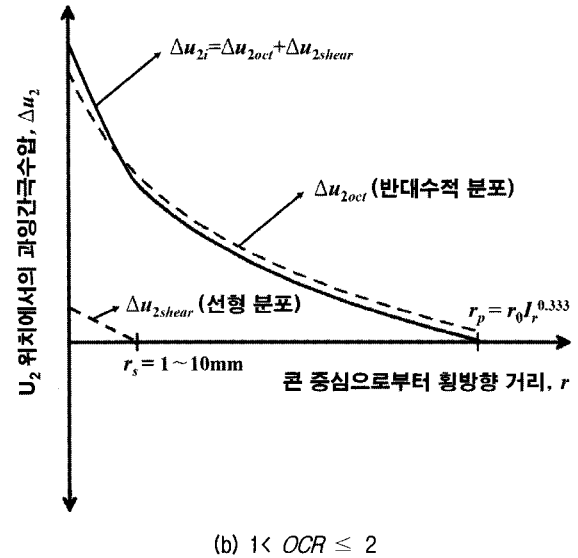


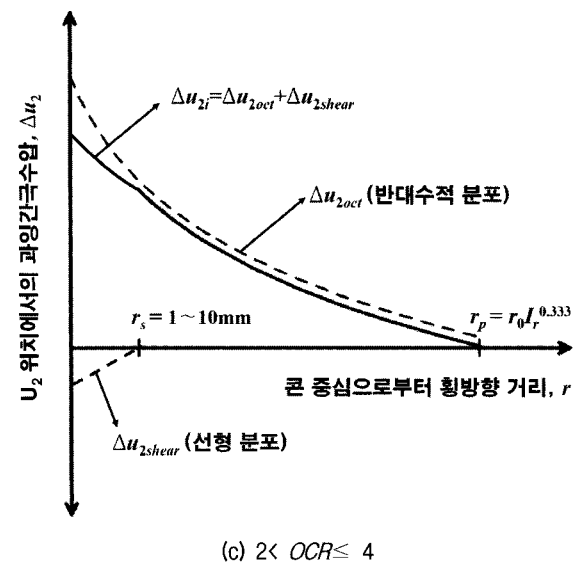
그림 8. 과압밀비에 따른 소산곡선(Kim, 2005)



(a) $OCR > 10$



(b) $1 < OCR \leq 2$



(c) $2 < OCR \leq 4$

그림 6. 과잉간극수압 성분들의 초기 횡방향 분포(Kim et al., 2007 인용) : U_2 위치

가 0보다 작고 그 절대값이 크므로 그림 6(a)와 같이 콘의 중심에서 전단영역의 끝으로 갈수록 과잉간극수압이 증가하다가 전단영역을 넘어서면서 다시 감소한다. 따라서 소산시험 초반부에 과잉간극수압이 평형상태로 도달하는 과정에서 주위의 큰 과잉간극수압이 횡방향으로 전파되므로 U_2 필터에서 측정되는 간극수압(Δu_2)이 증가한다.

$$\Delta u_{2i} = \Delta u_{2oct} + \Delta u_{2shear} \quad (2)$$

$$\Delta u_{2oct} = \frac{4}{3} s_u \ln I_r \quad (3)$$

$$\Delta u_{2shear} = \sigma'_{v0} \left[1 - \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \right] \quad (4)$$

$$r_p = r_0 I_r^{0.333} \quad (5)$$

여기서, I_r : 비배수 전단강도

σ'_{v0} : 지반의 강성지수($I_r = G/s_u$, G 는 전단탄성계수)

Λ : 연직유효응력

r_0 : 소성 체적 변형률 비($\Lambda = 1 - C_s/C_c$, C_s 는 팽창지수, C_c 는 압축지수)

r_0 : 콘의 반지름

Kim(2005, 2007)은 모래와 카올리나이트의 혼합시료를 대상으로 다양한 과압밀비 조건($OCR=1, 5, 10, 20$)에서 모형토조시험(chamber test)을 수행하여 OCR 에 따라 과잉간극수압의 횡방향 분포양상(그림 7)과 소산 거동(그림 8)이 다름을 확인하였다. 모형토조의 크기는 직경 1.2m, 높이 1m이고, 시험에는 표준콘이 사용되었으며, 간극수압은 U_2 필터와 이에 해당하는 모형토조 내의 높이에서 측정되었다.

정규압밀 혹은 중간 과압밀된($OCR=1, 5$) 시료에서는 U_2 필터에서 가장 큰 과잉간극수압이 발생하였고, Δu_2 는 시간이 지나면서 단조적으로 감소하는 결과가 확인되었다. 반면, 매우 과압밀된($OCR=10, 20$) 시료에서는 U_2 필터보다 전단영역의 끝 부분에서 더 큰 과잉간극수압이 발생하였고 그로 인해 소산시험 초기에 Δu_2 가 증가하였다. 매우 과압밀된 시료 중에는 식 (4)에서 확인되었듯이 상대적으로 큰 음의 Δu_{2shear} 가 발생하는 $OCR=20$ 인 시료에서 D_d 가 더 크게 나타났다. 전단영역(r_s)의 크기는 1.5~2.2 r_0 로 Burns & Mayne(1998)이 제안한 것보

다 크며, 소성영역(r_p)의 크기는 OCR 이나 강성지수(I_r)에 무관하게 10.0 r_0 ~11.5 r_0 인 것으로 확인되었다.

3.2. 약간 과압밀된 지반: 과잉간극수압의 연직방향 전파

약간 과압밀된 대상 지반($1.06 < OCR \leq 3.93$)에 대하여 Burns & Mayne(1998)이 제안한 방법을 이용하여 콘의 관입될 때 발생하는 U_2 위치에서의 과잉간극수압 횡방향 분포양상을 산정하였으며, 그 결과는 그림 6(b)~(c)와 같다. 이에 대한 자세한 설명은 4.2절에 제시되어 있다. $1 < OCR \leq 2$ 인 지반에서는 Δu_{2shear} 가 0 이상이므로 그림 6(b)와 같은 분포양상이 나타났으며, $2 < OCR \leq 3.93$ 인 지반에서는 Δu_{2shear} 가 0보다 작지만 그 절대값이 Δu_{2oct} 에 비하여 상대적으로 작기 때문에 그림 6(c)와 같은 분포양상이 산정되었다. 이러한 결과는 Kim(2005)이 모형토조시험을 수행하여 측정한 분포양상과 일치한다. 결국, OCR 4 이하의 약간 과압밀된 점성토에서는 U_2 필터에서 가장 큰 과잉간극수압이 발생하고 콘에서 횡방향으로 멀어질수록 그 값이 감소할 것으로 추정되며, 이는 곧 U_2 필터로 주위의 과잉간극수압이 횡방향 유입될 수 없음을 의미한다.

콘의 관입으로 발생하는 과잉간극수압은 횡방향으로 변화할 뿐만 아니라 연직방향으로도 일정하지 않고 변화하는 분포를 갖는다. Robertson et al.(1986)은 현장 계측 결과를 바탕으로 관입하는 콘 주위의 간극수압 연직방향 분포양상을 그림 9처럼 제시하였다. 각 위치에서의 관입 직후 간극수압(u_i)은 시험 심도에서의 정수압(u_0)으로 정규화되어 있다. 원추 선단의 초기 간극수압(u_{1i})은 원추 후면의 초기 간극수압(u_{2i})보다 항상 큰 값을 가지며, OCR 이 증가함에 따라 u_{1i} 와 u_{2i} 의 차이는 증가한다. 심지어 London clay처럼 매우 과압밀된 지반에서는 u_{2i} 가 u_0 보다 작아지거나 음의 값을 갖기도 하는데 이는 과압밀 점성토가 전단되면서 부피가 팽창하기 때문이다. 더 나아가 Sully et al.(1988)은 정규화된 u_{1i} 와 u_{2i} 의 차(PPD, pore pressure difference)가 OCR 에 비례하여 증가하며(그림 10), $OCR \leq 10$ 인 지반에서는 식 (6)으로 정량화된다고 제안하였다.

$$PPD = \frac{u_{1i} - u_{2i}}{u_0}, \quad OCR = 0.66 + 1.43(PPD) \quad (6)$$

소산시험이 시작된 후 U_2 필터에서 측정되는 과잉간

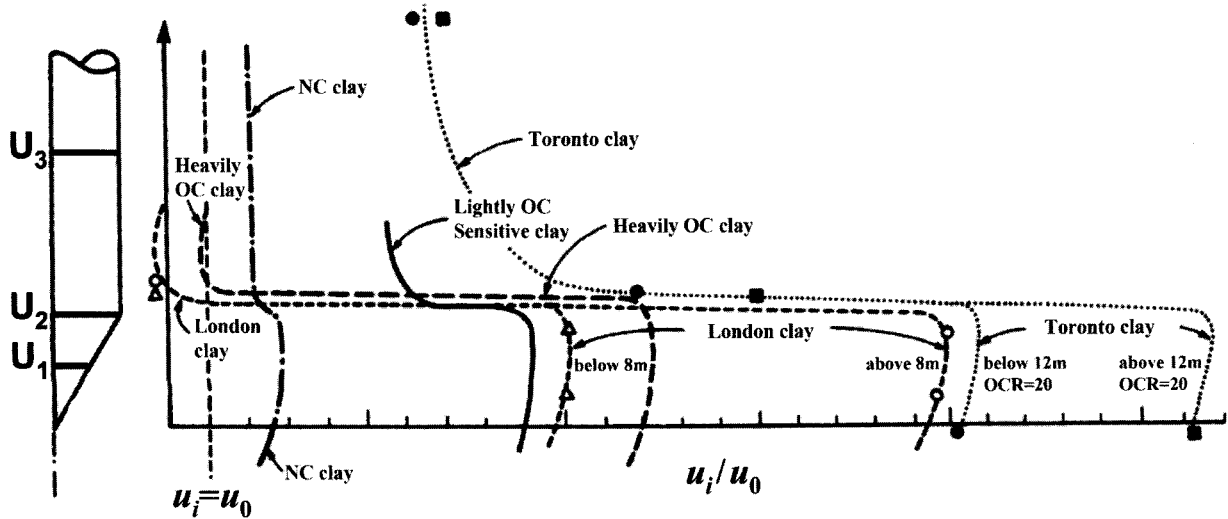


그림 9. 관입하는 콘 주위의 간극수압 연직방향 분포양상(Robertson et al., 1986)

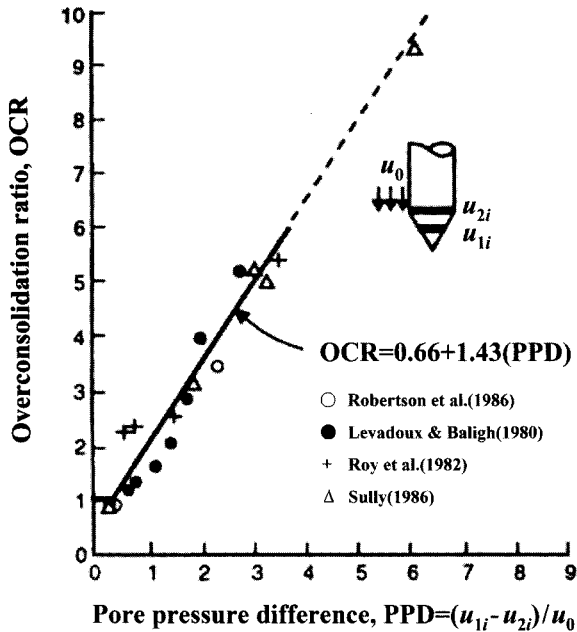


그림 10. 과압밀비와 PPD의 상관관계(Sully et al., 1988)

극수압 크기(Δu_2)는 축대칭 조건을 고려할 때 횡방향과 연직방향 유출입량에 의하여 결정된다. 횡방향 유출입량은 과잉간극수압의 횡방향 분포양상에 따른 수평구배(horizontal gradient)와 관련되며, 그림 6(a)처럼 U_2 필터보다 주변의 과잉간극수압이 더 클 경우에는 유입이, 그림 6(b)와 그림 6(c)처럼 U_2 필터에서의 과잉간극수압이 가장 클 경우에는 유출이 일어난다. 연직방향 유출입량은 과잉간극수압의 연직 분포양상(그림 9)에 따른 연직구배(vertical gradient)와 관련되며, U_2 필터를 기준으로 상부와 하부의 유출입량을 각각 고려해야 한다. 상부에서는 그림 9에 제시된 것처럼 연직구배가 크지 않으므로 유출입이 발생하지 않거나 미약하게 유출이 발생

하며, 그 양은 상대적으로 적어 무시할 수 있다. 반면, 하부에서는 원추 선단의 과잉간극수압이 U_2 필터의 과잉간극수압보다 크므로 항상 유입이 일어나며, 그 양은 OCR이 증가하여 연직구배가 커질수록 증가한다. 이상을 종합해보면, Δu_2 는 원추 선단에서의 유입량과 횡방향의 유입 혹은 유출량에 의해 변화하게 된다.

U_2 필터에서의 과잉간극수압 유출량이 유입량보다 크면 소산시험이 진행되면서 Δu_2 는 단조적으로 감소한다. 하지만 이와 반대로 유입량이 유출량보다 클 경우에는 소산시험 초기에 Δu_2 가 증가하는 지연소산이 발생하게 된다. 매우 과압밀된 지반에서는 3.1절에서 설명한 대로 과잉간극수압이 횡방향으로 유입되며, 이와 더불어 연직방향으로도 유입되기 때문에 Δu_2 가 크게 증가한다. 그에 반해 약간 과압밀된 지반에서는 과잉간극수압이 횡방향으로 유출되지만, 이 양보다 원추 선단에서 유입되는 양이 더 클 경우에 Δu_2 가 증가하게 된다.

약간 과압밀된 지반에서 발생하는 지연소산 메커니즘의 적절성을 평가하기 위하여 원추 선단에서 U_2 필터로 유입되는 과잉간극수압의 양과 지연소산의 상관성을 분석하였다. 유입량은 원추 선단과 U_2 필터의 과잉간극수압 연직구배와 관련되며, 기지의 원추 선단과 U_2 필터 사이의 거리를 단위길이로 가정하고 Δu_{2i} 로 정규화하면 식 (7)이 된다. 단, 여기서 유입되는 경우를 양의 값으로 표현하기 위하여 일반적인 구배와는 부호를 반대로 취하였다. 식 (7)의 우변에서 확인되듯이 원추 선단과 U_2 필터의 초기 과잉간극수압비($\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$)는 연직구배와 직접적으로 관련되면서도 동시에 그 물리적 의미가 명확하므로 이 값을 이용하여 유입되는 양을 평

가하였다. $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 는 원추 후면에서 측정된 초기 간극수압(Δu_{2i})과 정수압(u_0) 그리고 OCR을 알면 식 (6)로부터 얻어진 식 (8)을 이용하여 산정할 수 있으며, OCR은 2장에서 식(1)과 $N_{\sigma}=2.5$ 를 이용하여 산정한 결과를 이용하였다.

정규화된 과잉간극수압 연직구배

$$= \frac{\Delta u_{1i} - \Delta u_{2i}}{\Delta u_{2i}} = \frac{\Delta u_{1i}}{\Delta u_{2i}} - 1 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta u_{1i}}{\Delta u_{2i}} = 1 + \frac{OCR - 0.66}{1.43(u_{2i} - u_0)} u_0 \quad (8)$$

대상 지반의 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 는 표 1에 제시된 바와 같이 1.09~2.34이며, 이것과 지연소산의 상관관계는 그림 11과 같다. 결정계수(R^2)는 그림 4에 제시된 OCR과 D_d 사이의 결정계수보다 더 큰 0.8208인데, 일반적인 통계적 기준에서 R^2 가 0.7 이상이면 양호한 상관관계가 있다고 간주된다. 한편, 앞서 설명한 것처럼 대상 지반에 콘이 관입될 경우 U_2 필터에서 과잉간극수압이 횡방향으로 유출된다. 그럼에도 불구하고 소산시험의 초기에 Δu_2 가 증가하는 현상은 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 가 클수록 선단부에서 상향으로 전파되어 유입되는 과잉간극수압의 양이 횡방향으로 유출되는 양보다 크기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

식 (8)에서 알 수 있듯이 OCR이 증가하면 그에 비례하여 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 가 증가하므로 그림 4에 제시된 것처럼 OCR이 커지면 D_d 역시 증가한다. 그러나 Kim(2005)이 수행한 모형토조시험에서는 OCR이 5임에도 불구하고 지연소산이 발생하지 않은 결과가 확인되었다(그림 8).

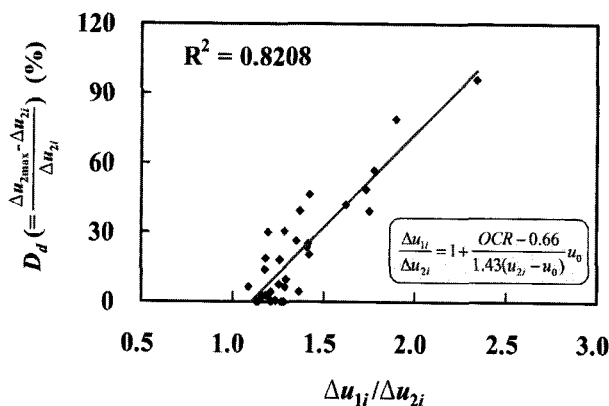


그림 11. $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 와 지연소산의 상관관계

이러한 현상은 정수압(u_0)이 매우 작은 모형토조시험의 특성상 식 (8)을 통해 산정되는 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 가 동일한 OCR의 현장 지반에 비하여 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 OCR=5인 시료의 경우 소산시험이 수행된 위치에서의 정수압(u_0)은 4.9kPa이고 U_2 필터에서 측정된 초기 과잉간극수압(Δu_{2i})은 135kPa이므로 식 (8)로 구한 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 가 1.11 밖에 되지 않았고, 그에 따라 지연소산이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

4. 지연소산의 유한차분해석

기존의 소산시험 해석 모델들은 콘의 관입으로 발생하는 과잉간극수압의 초기 분포양상을 예측함에 있어 원추 선단과 주면부의 차이를 제대로 반영하지 못했기에 지연소산을 모사할 수 없었다. 이에 본 연구에서는 계측을 통해 확인된 초기 과잉간극수압의 분포양상에 근거하여 해석을 수행하고자 다음과 같은 유한차분해석 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 제안된 지연소산 메커니즘의 타당성을 규명하였다.

4.1 유한차분해석 프로그램

유한차분해석 프로그램은 콘의 관입으로 발생하는 초기 과잉간극수압을 각 절점에 입력하고 압밀계수를 포함한 지반특성을 고려하여 유한차분 압밀해석을 진행하도록 구성되어 있다. 콘의 관입은 축대칭 조건이므로 원통형 좌표계(cylindrical coordinate)를 사용했으며, 알고리즘의 편의성을 위하여 외재적기법(explicit method)과 중앙차분법(central difference method)을 채택했다. 유한차분 메시는 콘의 형상을 고려하여 그림 12처럼 구성되어 있으며, 콘의 관입으로 발생하는 과잉간극수압의 영향반경(r_p)을 충분히 포함하도록 하였다. 외주면과 하부 경계는 영향반경에서 충분히 떨어져 있으므로 과잉간극수압이 발생하지 않는 Dirichlet 경계조건을 적용하였으며, 콘 중심과 상부 경계는 외부로의 흐름이 발생하지 않는 Neumann 경계조건을 적용하였다. 압밀해석은 축대칭의 선형 비혼합 압밀이론(axisymmetric linear uncoupled consolidation theory)을 바탕으로 수행된다. 식 (9)에 제시된 Terzaghi-Rendulic 압밀방정식을 지배방정식으로 사용했으며, 중앙차분법으로 구한 유한차분방정식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_h \frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{c_h}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} + c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (9)$$

$$u_{i,j}^{t+1} = u_{i,j}^t + c_h \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \left[u_{i+1,j}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i-1,j}^t + \frac{\Delta r}{2r_i} (u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t) \right] + c_v \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (u_{i,j+1}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i,j-1}^t) \quad (10)$$

여기서, c_v : 연직방향 압밀계수

c_h : 수평방향 압밀계수

u_e : 과잉간극수압

t : 시간

r : 콘의 중앙 축부터의 횡방향 거리

$\Delta r, \Delta z$: 절점 간격

외재적기법을 사용한 유한차분해석은 제약조건으로 수렴성과 안정성을 만족해야 한다. 수렴성(convergence)은 절점 간격($\Delta r, \Delta z$)과 시간 간격(Δt)이 0에 접근하면 해석의 결과가 참값에 접근하는 것을 의미하며, 안정성(stability)은 매 단계마다 오차가 증폭되지 않음을 의미한다. 축대칭 조건하에서 수렴성과 안정성을 확보하기 위해서는 식(11)을 만족해야 한다. 따라서 유한차분 메쉬의 $\Delta r, \Delta z$ 와 해석에 사용된 압밀계수(c_v, c_h)를 고려하여 수렴성과 안정성을 충분히 만족하도록 Δt 을 조

절하여 유한차분해석을 수행하였다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta r^2}{c_h} + \frac{\Delta z^2}{c_v} \right) \quad (11)$$

4.2 초기 과잉간극수압장

콘의 관입으로 콘 주변 지반에 발생하는 초기 과잉간극수압장의 전체적 형상은 Whittle & Aubeny(1993)가 변형률 경로법과 Modified Cam-Clay 모델을 혼합하여 수행한 수치해석의 결과에 근거하여 그림 12처럼 구형의 하부와 원통형의 상부로 가정하였다. 이 중 원추 하부의 구형 과잉간극수압장은 소성영역(r_p) 내에서 Δu_{ii} 가 콘의 중심에서부터 반대수적으로 감소한다고 가정하였으며, 이때 Δu_{ii} 의 크기는 식 (8)을 이용하여 구하였다. 주변부의 원통형 과잉간극수압장은 Robertson et al.(1986)이 현장 계측을 통해 확인한 간극수압의 연직방향 분포양상(그림 9)에 비추어 U_2 위치에서의 초기 과잉간극수압 횡방향 분포가 연직방향으로 동일하게 확장됨을 가정하였다.

Δu_{2r} 의 크기 및 초기 과잉간극수압의 횡방향 분포양상은 Burns & Mayne(1998)의 연구결과를 기초로 다음과 같이 산정하였다. Δu_{2r} 는 소성영역 내에서 연직응력이 작용하여 발생하는 Δu_{2oct} 와 전단영역 내에서 전단응력에 의해 발생하는 Δu_{2shear} 로 구분된다. Δu_{2oct} 는 식 (3)을 이용하여 산정하거나 혹은 $\Delta u_{2r} - \Delta u_{2shear}$ 로 구할 수 있는데, 전자의 방법을 이용할 경우 비배수 전단강도(s_u)와 강성지수(I_r)를 가정해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 입력변수를 최소화하면서 동시에 Δu_{2shear} 의 영향을 주요하게 고려하기 위하여 후자의 방법으로 Δu_{2oct} 를 산정하였다. Δu_{2shear} 는 콘의 관입에 따른 응력경로가 한계상태에 도달함을 가정하고 Modified Cam-Clay 모델을 이용하여 식 (4)로부터 산정하였다. 여기서 OCR은 2장에서 구한 결과를 이용했으며, 소성체적 변형률 비(Δ)는 Mayne(1998)이 제안한 0.8을 가정했다.

과잉간극수압이 발생하는 영향반경을 의미하는 소성영역의 크기(r_p)는 공동팽창이론에 의한 식 (5)를 이용하여 산정할 수 있다. 그러나 위 식에 포함된 강성지수(I_r)는 변형률 수준, 변형률 속도, 응력 경로 등에 따라 그 값이 달라지므로 콘 관입시 주변 지반에 형성되는 넓은 변형률 범위에 대하여 하나의 상수로 결정하기 어렵다.

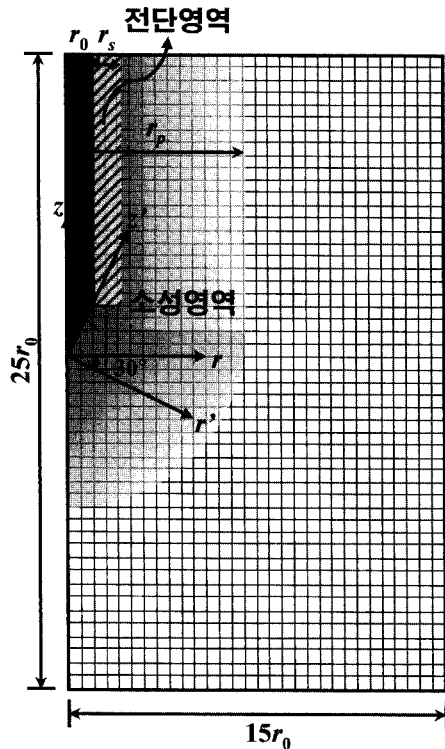


그림 12. 유한차분 메쉬와 초기 과잉간극수압장 형상

또한 Kim(2005)이 수행한 모형토조시험의 결과를 보면 r_p 가 OCR이나 강성지수(I_r)에 무관하게 $10.0r_0 \sim 11.5r_0$ 로 나타났으며, 이론식으로부터 산정한 r_p 가 측정결과와 상당한 차이가 있음이 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 Kim(2005)의 모형토조시험 결과를 근거로 $r_p=10r_0$ 로 가정하였다. 그리고, 전단영역의 크기(r_s)는 Burns & Mayne(1998)이 제안한 1~10mm와 Kim(2005)이 모형토조시험을 통해 확인한 9~21mm의 절충점인 10mm로 가정하였다. 초기 과잉간극수압의 횡방향 분포양상은 그림 6에 제시된 것처럼 선형적으로 분포하는 Δu_{2shear}

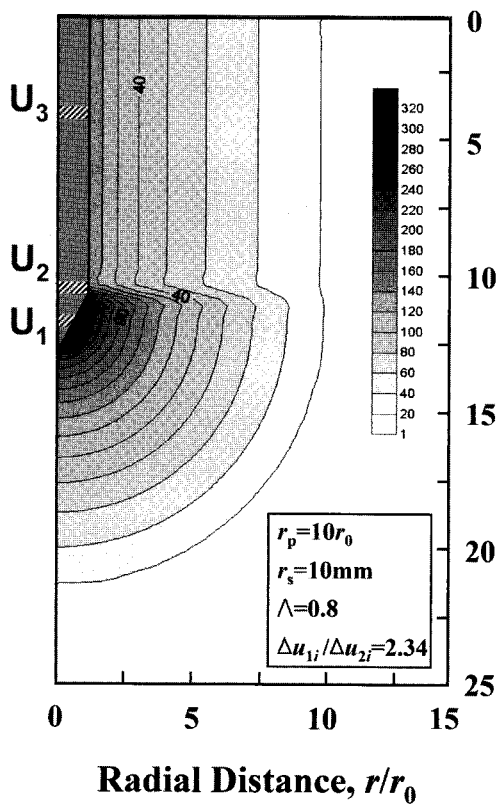
와 반대수적으로 분포하는 Δu_{2ocr} 의 합으로 산정하였다.

이상의 방법으로 대상 지반의 Δu_{2ocr} 와 Δu_{2shear} 를 구하고 초기 과잉간극수압장을 산정했으며, 그 대표적인 결과는 그림 13과 같다. r_p 와 r_s 가 동일한 값으로 가정되었으므로 모든 현장에서 초기 과잉간극수압장의 전체적인 형상이 비슷하며, 계산된 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 에 따라 원추하부와 주변부에서 과잉간극수압이 차이난다. U_2 위치에서의 초기 과잉간극수압 횡방향 분포양상은 모든 현장에서 그림 6(b)와 그림 6(c)처럼 U_2 필터에서 가장 크고 횡방향으로 멀어질수록 감소하게 산정되었다.

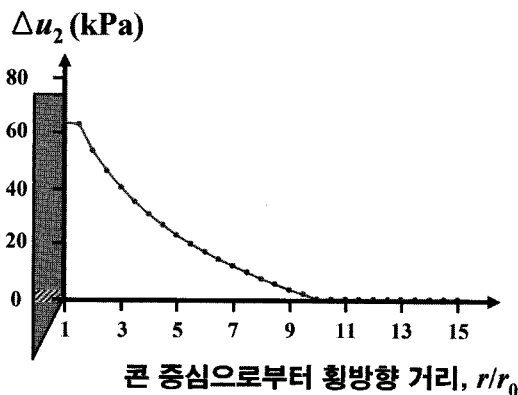
4.3 해석 결과 및 분석

각 절점에 해당하는 초기 과잉간극수압을 입력하고 유한차분해석을 수행하여 소산곡선을 모델링하였다. 압밀계수의 크기는 소산속도와 관련되므로 동일한 초기 과잉간극수압장에 대하여 압밀계수의 크기를 변화시켜 해석을 수행할 경우 시간 축으로의 변화만 있을 뿐 D_d 는 동일하게 나타난다. 따라서 c_h 와 c_v 는 일반적인 점성토의 압밀계수에 해당하는 $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 가정하고 해석을 수행하였다.

지연소산이 발생한 현풍 현장에 대하여 유한차분해석을 수행한 결과는 그림 14에 제시되어 있다. 이 현장의 OCR은 3.93이고, $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 는 2.34이다. 해석 결과, Δu_{2i} 는 소산시험 초기 65초 동안 증가한 후 점차적으로 감소하며, $D_d(\text{FDA})$ 는 28.7%로 확인되었다. 이 현장에 대한 U_2 위치에서의 초기 과잉간극수압 횡방향 분포양상은 그림 13(b)에 제시된 것처럼 U_2 필터에서 가장 크고 콘에서 멀어질수록 감소하므로 U_2 필터에서 과잉간극수압이 횡방향으로 유입될 수 없다. 그림에도 불구하고 소산시험 초기에 Δu_{2i} 가 증가한 것은 약간 과압밀된 점



(a) 초기 과잉간극수압장



(b) U_2 위치에서의 과잉간극수압 횡방향 분포양상

그림 13. 산정된 초기 과잉간극수압장: 현풍 현장

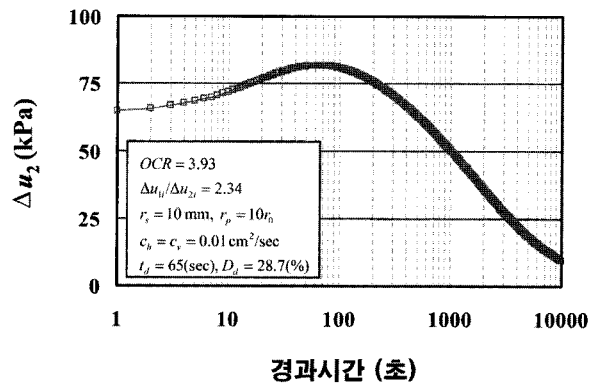


그림 14. 유한차분해석 결과: 현풍 현장

성토에서 과잉간극수압의 연직방향 전파로 인해 지연소산이 유발된다는 본 연구의 제안이 타당함을 입증해 준다.

유한차분해석을 통해 얻어진 각 현장의 소산곡선에서 D_d 를 재평가하였으며, 그 결과는 표 1에 제시되어 있다. 현장 계측 결과와는 달리 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i} \geq 1.5$ 인 현장에서만 지연소산이 발생하고, $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i} < 1.5$ 인 현장에서는 지연소산이 발생하지 않았다. 수치해석을 통해 확인된 $D_{d(FDA)}$ 는 계측된 D_d 의 9~30%(평균 19.7%)로 과소 평가되었다. 이러한 현상은 초기 과잉간극수압장을 산정함에 있어 가정된 이론이나 지반의 물성치, 특히 식 (8)을 통해 산정한 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 등이 불확실성을 내포하고 있기 때문이며, 이에 관해서 앞으로 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

피에조콘 소산시험 초기에 과잉간극수압이 증가하는 비정규적인 거동을 보이는 지연소산의 메커니즘을 규명하고자 국내 7개 지역 총 34회에 걸쳐 수행한 소산시험 결과를 토대로 지반 특성과 지연소산의 상관성을 분석하고, 유한차분해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 연구에서는 매우 과압밀된 점성토 지반에서 지연소산이 발생하는 것으로 보고되었으나, 본 연구를 통해 과압밀비 4 이하의 약간 과압밀된 국내 점성토 지반에서도 지연소산이 발생함이 확인되었다.
- (2) 지연소산은 U_2 필터에서 측정되는 과잉간극수압의 크기가 주변 지반보다 작을 경우에 평형상태로 도달하는 과정에서 발생한다. 매우 과압밀된 지반에서는 횡방향과 연직방향으로 과잉간극수압이 유입되어 지연소산이 발생한다. 반면, 약간 과압밀된 지반에서는 연직방향으로 유입되는 과잉간극수압이 횡방향으로 유출되는 과잉간극수압보다 클 경우에 지연소산이 발생한다.
- (3) 약간 과압밀된 국내 점성토 지역에서 수행된 CPTu 결과로부터 도출된 지반 특성과 지연소산의 상관성을 분석한 결과, 원추 선단과 U_2 필터의 초기 과잉간극수압비($\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$)가 클수록 선단부에서 연직으로 전파되는 과잉간극수압이 증가하여 지연소산이 유발됨이 확인되었다. $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 는 과압밀비에 비

례하여 증가하며, 정수압 역시 $\Delta u_{1i}/\Delta u_{2i}$ 를 결정하는 중요한 인자이다.

- (4) 콘의 관입으로 발생하는 과잉간극수압의 분포양상에 근거하여 유한차분해석을 수행하였고, 이를 통해 제안된 지연소산 메커니즘의 타당성을 규명하였다. 초기 과잉간극수압장의 산정에는 현장시험이나 모형토조시험을 통해 확인된 과잉간극수압의 분포양상을 최대한 반영하였다. 유한차분해석을 수행한 결과, 약간 과압밀된 점성토에서 과잉간극수압의 연직방향 전파로 인해 지연소산이 발생할 수 있음이 입증되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 이선재, 정충기, 김명모 (1988), "피에조콘을 이용한 국내 지반 흙의 분류", *한국지반공학회지*, 제14권, 제4호, pp.163-176.
2. Baligh, M. M., and Levadoux, J. M. (1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration II: Interpretation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.7, pp.727-745.
3. Burns, S. E., and Mayne, P. W. (1998), "Monotonic and dilatatory pore-pressure decay during piezocone tests in clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp.1063-1073.
4. Chang, M. F. (1991), "Interpretation of overconsolidation ratio from in situ tests in Recent clay deposits in Singapore and Malaysia", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.210-225.
5. Chen, B. S. Y., and Mayne, P. W. (1994), *Profiling the overconsolidation ratio of clays by piezocone tests*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, International Report GIT-CEE-94-1.
6. Chen, B. S. Y., and Mayne, P. W. (1996), "Statistical relationships between piezocone measurements and stress history of clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.488-498.
7. Davidson, J. L. (1985), "Pore pressures generated during cone penetration testing in heavily overconsolidated clays", *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.5, pp.2699.
8. Kim, T.J. (2005), *Dissipation of pore water pressure due to piezocone penetration in OC clay*, Ph. D. Dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
9. Kim, T.J., Kim, N.K., Tumay, M.T., and Lee, W.J. (2007), "Spatial distribution of excess pore-water pressure due to piezocone penetration in overconsolidated clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.6, pp.674-683.
10. Konrad, J. M., and Law, K. T. (1987), "Undrained strength from

- piezocone tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.392-405.
11. Luteneegger, A. J., and Kabir, M. G. (1988), “Interpretation of Piezocone Results in Overconsolidated Clays”, *Proceedings of Penetration Testing in the U.K.*, Thomas Telford, London, pp.147-150.
 12. Mayne, P.W. (1988), “Determining OCR of clays from laboratory strengths”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.1, pp.76-92.
 13. Mayne, P. W. and Bachus, R. C. (1988), “Profiling OCR in clays by piezocone soundings”, *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, 2, pp.857-864.
 14. Mayne, P.W., and Holtz, R.D. (1988), “Profiling stress history from piezocone soundings”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.16-28.
 15. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Grieg, J. (1986), “Use of piezometer cone data”, *Proceedings of ASCE Specialty Conf. In Situ' 86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, New York, pp.1263-1280.
 16. Sully, J.P., Campanella, R.G., and Robertson, P.K. (1988), “Over-consolidation ratio of clays from penetration pore water pressures”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.2, pp. 209-215.
 17. Teh, C. I. and Housby, G. T. (1991), “An analytical study of the cone penetration test in clay”, *Geotechnique*, No.41, Vol.1, pp. 17-34.
 18. Torstensson, B. A. (1977), *The pore pressure probe*, Nordiske Geotekniske Mte, Oslo, Paper No.34, pp.34.1-34.15.
 19. Whittle, A. J., and Aubeny, C. P. (1993), “The effects of installation disturbance on interpretation of in situ tests in clay”, *Predictive soil mechanics*, pp.742-767.
 20. Worth, C.P. (1984), “The interpretation of in-situ soil tests: 24th Rankine Lecture”, *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489.

(접수일자 2007. 3. 28, 심사완료일 2007. 10. 10)