

피압이 존재하는 연약지반 위의 성토에 대한 유한요소해석

Finite Element Analysis for Embankment on Soft Ground under Artesian Pressure

진현식¹⁾, Hyun-Sik Jin, 조기영²⁾, Ki-Young Cho, 유갑용³⁾, Gap-Yong Yoo, 정성교⁴⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾ 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng, Dong-A Univ.

²⁾ 동아대학교 토목공학과 대학원 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng, Dong-A Univ.

³⁾ 한국토지공사 양산직할사업단 과장, Manager, Korea-Land Corporation.

⁴⁾ 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, Dong-A Univ.

SYNOPSIS : In the mouth of the Nakdong river, the clay deposit is very thick and mostly in the underconsolidated state. Especially, in the area of Yangsan, there exists the Artesian pressure under the thick clay deposit. At present there is being carried out ground improvement and filling on the soft clay. In this area it is very significant to consider change of Artesian pressure.

In this paper the finite element analysis of embankment on soft clay under Artesian pressure was performed and compared with that of the case under static water state. And the effect on change of Artesian pressure was investigated for both cases. As the results of analyses, the settlement of embankment under Artesian condition was larger than that of static water condition, and derivation of excess pore water pressure during construction was showed the same trend as before. And the embankment settled or swelled with change of Artesian pressure.

KEYWORDS : Artesian pressure, Soft clay, FEM, Embankment

1. 서 론

우리나라 남·서해안은 비교적 연약점성토층이 폭넓게 분포하고 있다. 특히 낙동강 하구지역에서는 연약점성토층의 두께가 아주 두터우며, 대체로 미압밀 상태에 있다(정 등, 1996). 그리고 주거지 조성을 위한 양산물금지역에서는 점토층의 하부에서 피압이 작용하고 있어서 관계전문가들의 긴장을 고조시키고 있다.

본 논문에서는 점성토층의 하부에서 피압이 작용할 경우에 제방성토에 따른 영향을 관찰하고자 유한요소해석을 수행하기로 한다. 이 해석에서는 피압이 존재하는 점토지반 위에서 제방성토 뿐만 아니라 피압크기의 변화에 따른 영향을 관찰하며, 또한 정수압 상태의 초기지반 상에서 제방성토 이후에 피압이 작용하는 경우와 비교하고자 한다.

2. 토질 및 성토조건

2.1 토질조건

본 해석을 위한 토질조건은 한국토지공사에서 수행하고 있는 양산시험성토현장에 바로 인접된 지역에서 얻어진 실내 토질시험결과를 사용하기로 한다. 이 지역의 대표적인 토질특성은 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 점성토층의 두께는 약 35m이며, 그 아래로 모래자갈층이 존재하고 있으며 이 층에서 50kPa의 피압이 작용하고 있다고 가정한다.

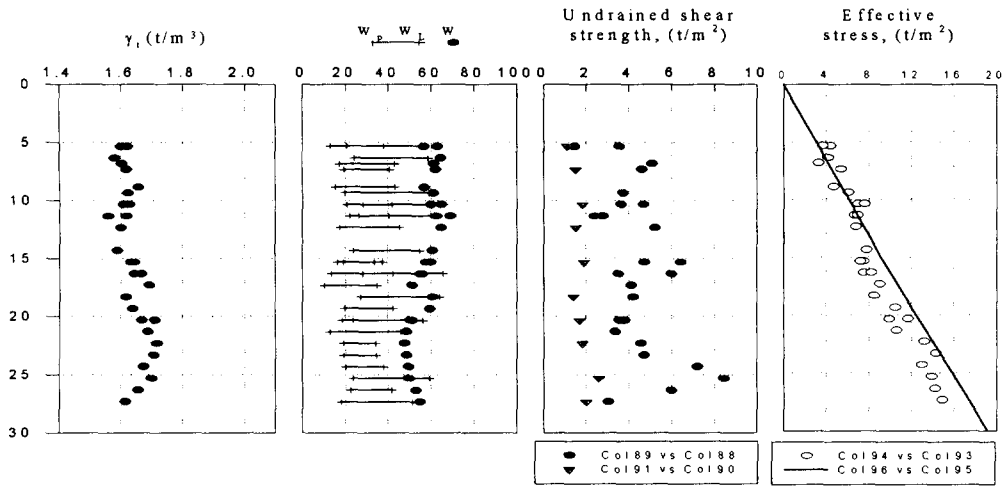


그림 1. 지반특성

2.2 제방성토

성토체는 가로×세로가 200×90m이며, 1:2의 경사로 5m 높이까지 6단계로 성토하여 축조하는 것으로 한다. 시공순서는 먼저 지표면에 토목섬유(인장력=15t/m)를 포설한 후, 연직배수재(PBD)를 25.5m 깊이까지 1.5×1.5m 간격의 정방형 배치로 매설한다. 그리고 일정한 시간을 정하여 단계적으로 성토체를 축조하는 것으로 한다. 이 조건은 양산물금 시험성토 중의 한부분에 해당한다.⁽⁴⁾

3. 연약점토지반 위의 제방성토를 위한 압밀변형해석

3.1 유한요소 모형화

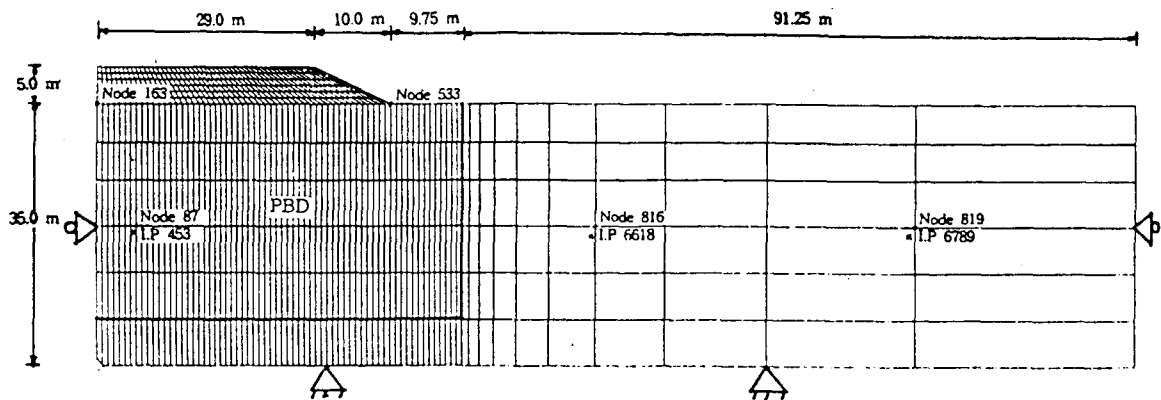


그림 2. 유한 요소망

그림 2는 본 해석을 위하여 2차원으로 모형화된 유한요소망과 경계조건을 나타내고 있다. 유한요소는 827개의 8절점 등매개 요소(장방형)와 65개의 3절점 선요소가 850개의 절점으로 구성되어 있다. 경계조건은 두 연직경계면에 대하여 수평변위를 구속하며, 최저면에 대해서는 연직변위를 구속하였다. 그리고, 시험성토체 아래에 가로×세로 = 48.75×28.75m의 부분에는 연직배수공을 1.5×1.5m간격으로 배치하도록 모형화 하였다.

3.2 재료상수

본 해석에 사용된 재료상수는 참고문헌(1)을 참조하여 점토층 및 성토체에 대하여 각각 표 1 및 표 2와 같이 결정하였다. 여기서, 점토층에 대해서는 수정 Cam-Clay모형, 또한 성토체에 대해서는 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 만족하는 탄소성모형을 사용하였다. 그리고, 토목섬유에 대해서는 Bar요소를 사용하였으며 탄성계수 $E=1.0 \times 10^6$ kPa, 포아송비 $\nu=0.1$ 및 면적 $A=0.002m^2$ 로 하였다.

표 1. 점토층을 위한 수정 Cam-Clay 매개변수

λ	α	e_{cs}	M	G' (kPa)	k_x (m/s)	k_y (m/s)	γ_{sat} (kN/m ³)
0.025	0.27	2.594	0.95	400	1.6×10^{-9}	1.2×10^{-9}	16.5

표 2. 성토체를 위한 재료상수

E (kPa)	ν'	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	Remarks
1.5×10^3	0.3	3	30	18.0	

3.3 연직배수공을 위한 2차원 등가모형 및 적용상수

연직배수공 주변의 물 흐름은 3차원적으로 나타나지만, 해석을 위한 시간과 노력을 절약하기 위하여 연직배수공을 2차원 등가모형화하여 평면변형률 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 기존의 2차원 등가모형은 조 등(1998)이 언급한 바와 같이 실제 적용상의 복잡함과 오차를 상당히 내포하고 있다.

여기서는 상기의 단점을 보완하여 조 등(1998)에 의하여 새롭게 개발된 등가모형을 사용하기로 한다. 이 모형에 의하면, 배수재의 실제 간격대로 2차원 모형화하며, 단지 투수계수만 조정하면 가능하다. 이 해석에서는 $\eta = k_x/k_s = 3$, $S = \gamma_s/\gamma_w = 5$ 그리고 PBD의 투수계수를 5×10^{-2} m/s로 하였을 때, 등가수평투수계수 $k'_h = 1.622 \times 10^{-10}$ m/s로 산출되었다. 여기서 γ_s 와 k_s 는 교란영역의 반경 및 투수계수이며, k_x 는 원 점토층의 수평투수계수이며, 또한 γ_w 는 배수재의 등가반경이다. 여기서 산출된 등가수평투수계수는 그림 2에서 PBD부분의 점성도에 대한 수평투수계수로 입력한다.

3.4 초기지반조건

초기지반조건은 성토체가 없이 수평하게 놓여 있으며, 지하수위는 지표면과 일치한다. 지표면에서 과압밀비(OCR)가 2.0이며, 그 아래의 10m 깊이에서 OCR=1.0이 되도록 직선적으로 변한다고 가정한다(그림 1 참조). 그리고 10m 깊이 아래에서는 정규압밀상태인 것으로 간주한다.

피압수가 존재하는 조건을 만족하기 위하여 과잉간극수압이 최저면에서 50kPa가 작용하며, 지표면에서 0으로 되는 직선분포로 가정하였다. 그리고 초기지반조건이 정수압상태인 경우에는 과잉간극수압의

존재가 없을 것이다.

3.5 해석종류 및 단계

해석종류는 초기지반에서 피압이 존재할 경우와 정수압 상태로 구분되며, 그들의 해석번호는 각각 YS-T2 및 YS-T3이다. 이들에 대한 해석단계는 표 3과 같다.

표 3. 해석의 종류 및 단계

해석종류	Inc. No.	시 간	내 용	비 고
YS-T2 (YS-T3)*	1	1 (day)	토목섬유의 포설	연직배수공 설치
	2	30 (day)	1단계 성토	
	3	95 (day)	압 밀	
	4	15 (day)	2단계 성토	
	5	15 (day)	3단계 성토	
	6	15 (day)	4단계 성토	
	7	15 (day)	5단계 성토	
	8	15 (day)	6단계 성토	
	9	500 (yr)	압 밀	
	10	500 (yr)	$U_b = 0$ ($U_b = 50$)*	$U_b =$ 최저면에서의 과잉간극수압
	11	500 (yr)	$U_b = 50$ ($U_b = 0$)*	

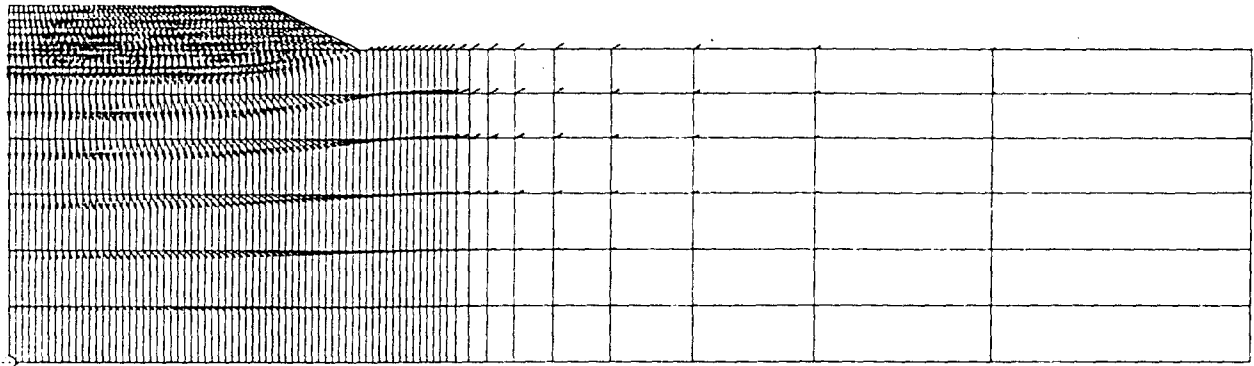
* ()속의 값은 YS-T3에 해당한다.

4. 해석결과 및 분석

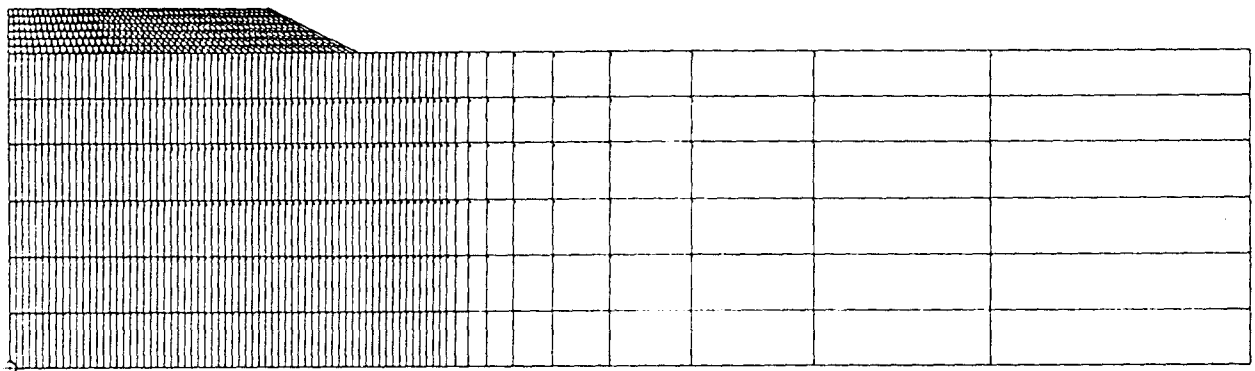
본 해석은 초기 과잉간극수압을 입력할 수 있는 SAGE CRISP 3.02b(SAGE, 1997)을 사용하여 수행되었다. 표 3에서 기술된 두 해석을 수행하여 분석된 결과는 다음과 같다.

4.1 압밀침하 및 팽창

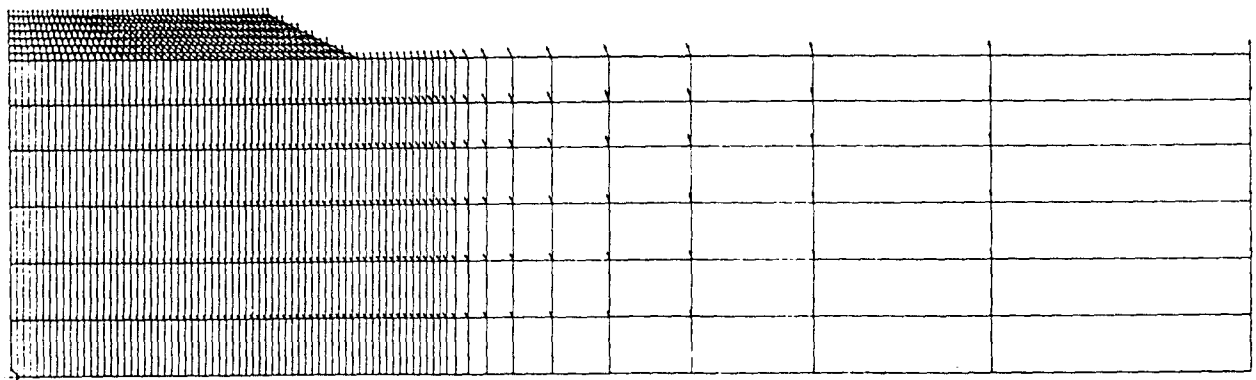
제방의 축조 및 피압크기의 변화에 따른 전반적인 지반거동은 변형요소망과 변위벡터로써 관찰될 수 있다. 지면관계상 여기서는 그림 3과 같이 Inc.No. 9, 10 및 11 이후에 발생된 변위벡터만 나타낸다. 그림 3(a)를 보면, 최종성토와 추가압밀이 수행된 후에 성토체의 중앙부분에서 과도한 침하가 발생하였으며, 모서리쪽으로 갈수록 침하량은 줄어들고 있다. 그리고 성토체의 외곽에서는 약간의 팽창현상이 지표면 및 지중에서 발생하고 있다. 그림 3(b)은 최저면에서 작용하던 피압이 사라질 경우를 나타내고 있다. 여기서 보면, 지반 내에 존재하던 과잉간극수압이 소산되면서 임의 깊이마다 거의 동일한 양의 침하를 나타내고 있다. 그림 3(c)는 피압이 원상태로 회복된 후의 변위벡터를 나타내고 있다. 여기서 변위벡터는 전자의 것들에 비하여 5배로 확대된 것이다. 변위는 전체적으로 팽창하고 있으나, 성토체에서



(a) Inc No. 9



(b) Inc No. 10



(c) Inc No. 11

그림 3. YS-T2에 대한 하중단계별의 변위벡터

는 외곽부에 비하여 작은 팽창량을 보여주고 있다.

그림 4는 그림 2에서 표기된 절점 No.163 및 533에 대하여 초기지반조건이 피압이 존재하는 경우(YS-TR2)와 정수압상태(YS-TR3)에서의 하중단계별 연직변위의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면, 제방성토 중에 제방의 끝단(절점 No.533)에서는 두 경우가 차이를 보이지만, 제방의 중앙(절점 No.163)에서는 피압(50kPa)이 존재하는 경우가 정수압상태보다 최대 0.42m까지 크게 침하를 나타내고 있다.

초기상태에 피압이 존재하다가 최종성토후(Inc.No.9) 피압이 사라질 때(Inc.No.10) 약 0.7m의 추가침하를 보여주며, 다시 피압이 원래상태($U_b = 50$)로 회복될 때는 약 0.2m의 팽창을 나타내고 있다. 그러나, 초기지반 조건이 정수압상태일 경우에는 피압크기의 변화에 따라 미세하게 팽창 또는 침하를 유발하게 된다.

4.2 과잉간극수압

그림 5는 지중의 3절점에 대하여 하중단계별의 과잉간극수압 변화를 나타내고 있다. 피압의 존재여부에 따른 2종류의 곡선에서 초기 과잉간극수압의 차이는 초기 피압의 영향을 의미한다. 피압이 존재하는 경우가 정수압 상태보다 특히 제방의 중앙 아래에서 과잉간극수압이 성토중에 약간 크게 유발되고 있다. 이러한 원인은 4.1절에서와 동일하게 초기 유효응력이 작아서 지반이 크게 변형된 이유 때문인 것으로 사료된다.

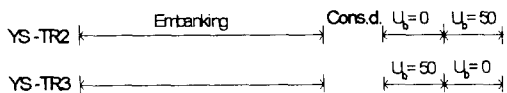
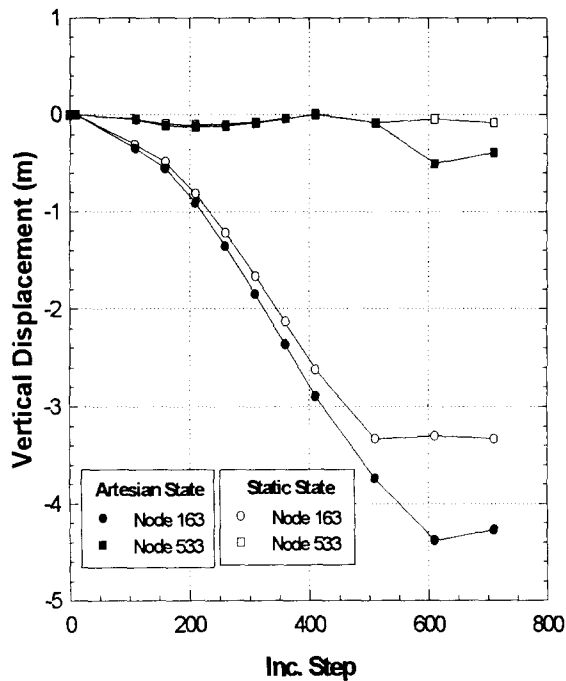


그림 4 제방 두 끝단에서의 연직변위

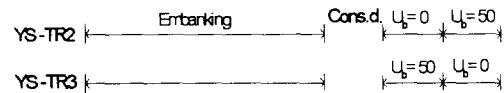
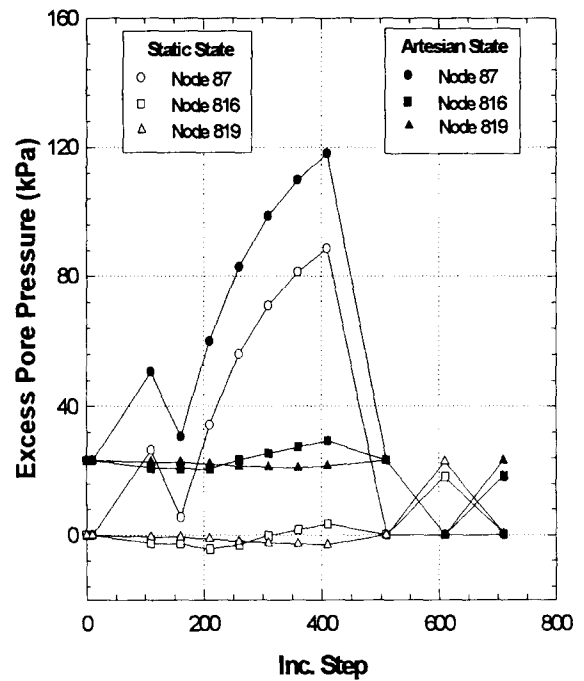
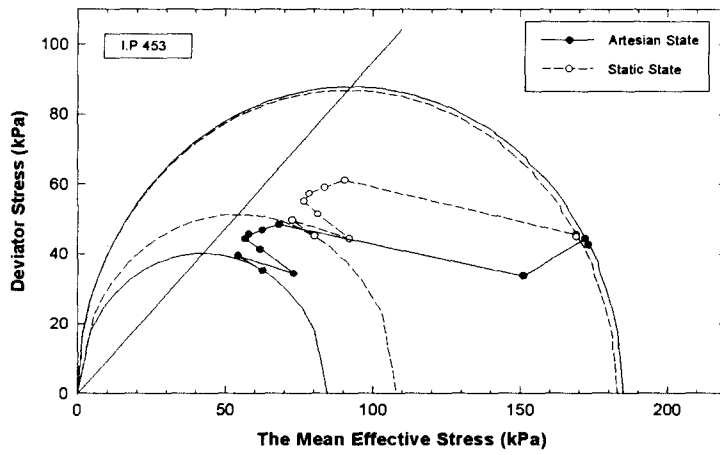


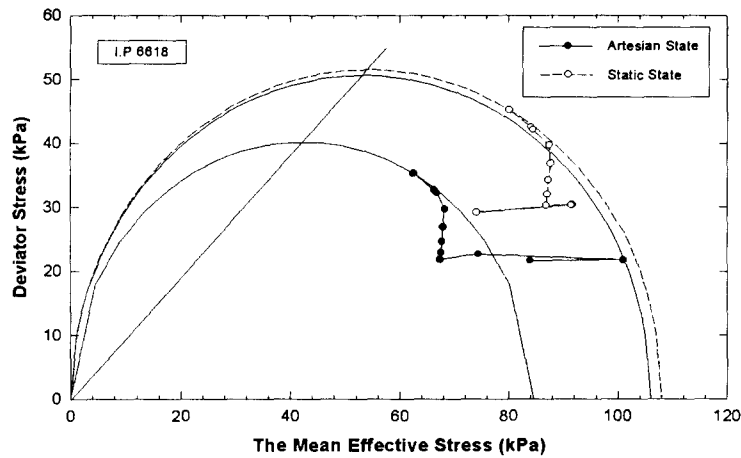
그림 5. 지중의 3절점에서 과잉간극수압의 변화

4.3 응력경로

그림 6은 지층의 2적분점(IP)에서 하중단계에 따라 관찰된 응력경로를 나타내고 있다. IP 453(제체의 중앙아래)에서 피압이 존재하는 경우는 유효응력의 감소 때문에 정수압 상태보다 초기 항복곡선이 작으며, 두 경우 모두 정규압밀상태(NC)에서부터 출발하여 경화현상(hardening)을 나타내고 있지만 한계상태까지 도달되지 않았다. 그러나, 성토체의 외곽에 있는 IP 6618에서는 두 경우에 상반되는 응력경로를 나타내고 있다. 즉, 피압의 경우는 정규상태로부터 출발하여 성토중에 탄성상태로 존재하다가, 피압이 사라질 때에 경화현상을 보이다가, 피압이 다시 원상회복될 때 탄성상태로 되었다. 반면에, 정수압 조건에서는 처음에 정규압밀상태에서 하중단계가 계속되면서 탄성상태로 그대로 지속되고 있음을 보여주고 있다.



(a) IP 453



(b) IP 6618

그림 6. 두 적분점에서의 응력경로

5. 결 론

낙동강 하류지역인 양산물금 주거단지에서는 두터운 연약점성토지반 하부에 피압 대수층이 존재하고 있다. 피압수의 존재여부 및 피압크기의 변화에 따른 지반거동을 관찰하기 위하여 수행된 유한요소해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기지반에서 피압이 존재할 경우는 정수압조건에 비하여 제방성토 중에 더 크게 침하를 유발시켰다. 그리고, 과잉간극수압도 전자의 경우에 약간 더 크게 유발되었다.
- (2) 피압이 존재하는 지반 위에 성토를 수행한 후 피압크기가 변화할 때 성토체의 추가 침하 또는 팽창이 발생하였다. 그러나, 초기상태가 정수압 조건일 경우에는 피압의 변화에 따라 아주 둔하게 거동하였다.

참고문헌

1. 도화지질(주)(1997), “양산물금 택지개발사업 2단계 조성공사(2-5공구) 지질조사 보고서”.
2. 정성교 등(1996). “낙동강 하구지역의 충적점토에 대한 토질역학적 특성“, **대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅲ)**, pp.543~546
3. 조기영 · 백승훈 · 이대명 · 정성교(1998). “연직배수공이 설치된 연약지반에 대한 2차원 등가모형의 개발“, **98년 봄 학술발표회 논문집**, 한국지반공학회.
4. 토지연구원(1992), “연약지반의 처리공법과 침하예측에 관한 연구-양산물금 연약지반 시험시공”, N0.연구96-7-22, 한국토지공사 토지연구원, 194p.
5. SAGE(1995). SAGE CRISP : *Users guide and technical reference guide*, SAGE Engineering Ltd.