

밴드드레인이 부분관입된 연약점토지반을 위한 PDSS 해석

PDSS Analysis on Partially Penetrated Band Drains in Soft Clay Ground

정성교¹⁾, Sung-Gyo Chung, 은성민²⁾, Sung-Min Eun, 백승훈³⁾, Seung-Hoon Baek, 이대명⁴⁾, Dae-Myeong Lee

- 1) 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.
- 2) 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate student, Dept of Civil Eng., Dong-A Univ.
- 3) 동아대학교 토목공학과 대학원 박사과정, Graduate student, Dept of Civil Eng., Dong-A Univ.
- 4) 양산대학 토목과 전임강사, Full time lecturer, Dept of Civil Eng., Yang-San College.

SYNOPSIS : The plane deformation and spatial seepage(PDSS) analysis was developed to consider 3D flow of excess pore water as well as plane deformation of ground. Here is newly developed an equivalent model for PDSS analysis, which was the purpose to reduce number of finite elements and to take the effects of smear and well resistance into consideration. As the result of PDSS analysis with applying the new model, it is showed that the settlement-time relationship by PDSS agrees well with those of plane strain(PS) and axisymmetric analyses, irrespective of existence of untreated layer. And the excess pore pressure distribution by PDSS is relatively agreed with that of axisymmetric analysis, not with that of PS.

KEYWORDS : PDSS, Equivalent model, Finite element analysis, Soft clay, Band drain.

1. 서론

대심도의 연약점토지반에서 지반개량을 위하여 경제적인 연직배수공법이 자주 사용되고 있다. 이때 압밀침하량과 소요시간을 정확히 예측하는 것이 대단히 중요하다. 특히 경과시간에 따른 침하량을 실제와 가깝게 예측하여 공사일정에 차질을 빚지 않도록 하는 것이 중요하며 난제이다.

연약지반의 전층에 걸쳐 연직배수공이 완전히 처리되었을 경우에 압밀소요시간의 예측을 위하여 Barron(1948), Hansbo(1981), Yoshikuni & Nakanodo(1974), Onoue(1988) 등에 의한 압밀해가 존재하고 있다. 그러나, 이러한 해들은 점성토의 전층이 동일한 토질조건으로 형성되어 있을 경우에 적용이 가능하지만, 실제 현장에서는 균질한 토질조건을 기대하기 어렵다. 그리고, 대심도의 연약지반 내에 연직배수공이 부분관입되어 있을 경우에 대하여 Hart et al(1958), Dames & Moore(1982), Zeng & Xie(1989) 등에 의하여 이론해가 제안되었지만, 적용상 문제점을 내포하고 있으며(정 등,1998) 또한 흙의 불균질성에 대한 문제를 해결할 수는 없다.

상기에서 언급된 지층의 불균질성과 배수공의 부분관입에 따른 문제를 해결하는 방법으로 수치해석적 접근이 주로 사용되고 있다. 이러한 조건에서는 간극수의 흐름이 3차원으로 발생하기 때문에 3차원 수치해석에 의하여 문제를 해결하는 것이 당연할 것이지만, 3차원 수치해석은 많은 시간과 노력을 필요로 하고 있다. 3차원 해석이 갖는 단점을 극복하고 동일한 효과를 얻을 수 있는 평면변형 공간침투(Plane Deformation and Spatial Seepage ; PDSS)해석이 Zeng et al(1987), Xie(1987) 및 Cheung et al(1991)에 의하여 개발 및 사용되었다. 그러나, 이들의 해석에서는 배수정 저항에 대해서 충분히 고려되었지만 연직배수재 주변의 교란효과에 대해 전혀 고려되지 못하였다.

본 연구에서는 배수공 주변의 교란효과와 배수정 저항을 고려하여 PDSS해석을 수행하기 위하여 등가

모형이 새로이 개발되었으며, 이 모형을 밴드드레인이 완전 및 부분관입된 연약점토지반에 적용하여 유한요소해석이 수행되었다. 이 결과는 이론해, 2차원 평면변형률 및 축대칭해석들에 의한 결과들과 함께 비교되었다.

2. PDSS해석을 위한 등가모형의 개발

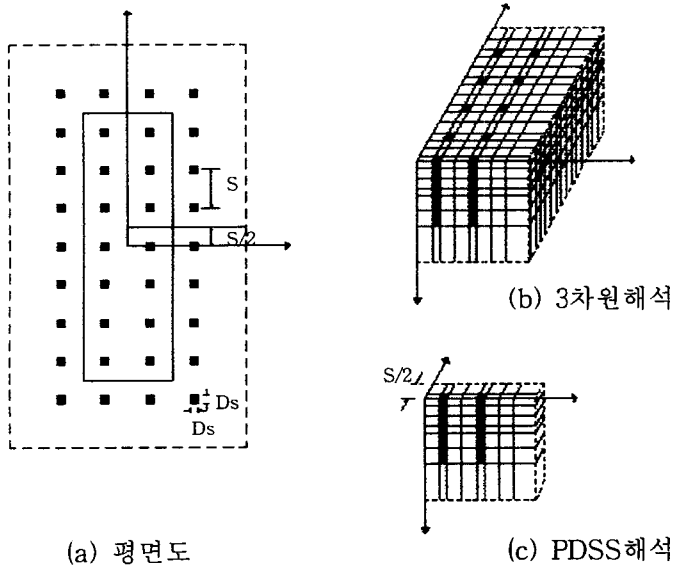


그림 1. PDSS 해석기법에서의 유한요소망

PDSS(평면변형 공간침투)해석의 개념은 그림 1에서 볼 수 있다. 그림 1(a)와 같이 S간격으로 연직배수공이 배치되어 있을 경우에 3차원해석을 위해서는 (b)와 같이 유한요소망을 구성하여야 할 것이다. 그러나 동일한 효과를 기대하면서 노력 및 시간을 절약하기 위하여 (c)와 같이 유한요소망을 구성할 수 있을 것이다. 이러한 PDSS해석에서는 배수정 저항효과를 위하여 별도의 고려가 필요하지 않지만, 배수정 주변의 교란효과를 고려하기 위해서는 아주 조밀한 유한요소망이 배수정을 위한 망과 함께 추가되어야 할 것이다.

본 연구에서 새로이 제안되는 PDSS해석을 위한 등가모형은 유한요소망을 최소화하면서 간극수의 3차원 흐름효과를 최대한 얻고자 하는데 있다. 그림 2는 밴드드레인이 매설된 단위셀의 1/4을 나타내고 있는 평면도이다. 그림 2(a)는 교란영역이 포함된 실제평면이며, (b)는 밴드드레인의 두께가 무시되고 교란영역 및 배수정 효과가 고려되어 등가투수계수로 모형화된 평면을 나타내고 있다.

Hansbo(1981)의 압밀해를 이용하면 교란 및 배수정저항을 고려한 (a)의 경우와 이들의 영향이 포함된 등가투수계수를 지닌 (b)의 경우에 대한 압밀해는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

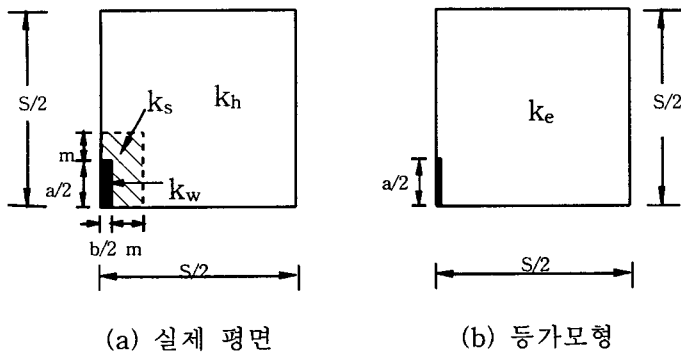


그림 2. 등가모형을 위한 모식도

$$(a) \text{의 경우 : } \bar{U}_h = 1 - \exp \left[- \frac{2T_h}{F(n, s)} \right] \quad (1a)$$

$$(b) \text{의 경우 : } \bar{U}_e = 1 - \exp \left[- \frac{2T_e}{F(n)_e} \right] \quad (1b)$$

임의의 시점에서 두 경우의 평균압밀도가 동일하다면 식 (2)와 같이 된다.

$$\frac{T_e}{T_h} = \frac{F(n)_e}{F(n, s)} \quad (2)$$

여기서, 시간계수 $T_h = \frac{C_h t}{R^2} = \frac{k_h t}{R^2 m_v \gamma_w}$ 이며, $T_e = \frac{k_e t}{R^2 m_v \gamma_w}$ 이므로 식 (2)는 식 (3)이 된다.

$$k_e = \frac{k_h F(n)_e}{F(n, s)} \quad (3)$$

여기서,

$$F(n)_e = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$F(n, s) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left(\ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln s - \frac{3}{4} \right) + \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(\frac{s^4 - 1}{4n^2} - s^2 + 1 \right) + \frac{2}{3} \pi \left(\frac{k_h \ell^2}{q_w} \right) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

$n = R / r_w$, $s = r_s / r_w$, $\eta = k_h / k_s$
 $q_w =$ 배수재의 통수능력, $\ell =$ 배수재의 관입깊이.

3. 단위셀에 대한 유한요소해석

3.1 대상지반

연구대상으로 선정된 지반은 낙동강 하구지역에 위치한 녹산국가공단의 연약점성토지반을 이상화한 것으로 수정 Cam-Clay 모형을 사용하여 매개변수를 표 1과 같이 나타내었다. 그리고 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 하였다.

표 1. 수정 Cam clay 매개상수

Depth(m)	κ	λ	e_{cs}	M	ν'	γ_t (kN/m ³)	$k_v(=k_h)$ (m/s)
(a) 0 ~ 25	0.04	0.29	2.59	1.2	0.3	17	1.0×10^{-9}
(b) 25 ~ 50	0.04	0.29	2.91	1.2	0.3	17	1.0×10^{-9}

연직배수재로 사용되는 PBD(밴드드레인)은 9.5×0.3 cm이며, 1.49×1.49 m의 격자형으로 배치되는 것으로 하였다. 그리고 지표면 위의 성토는 3m의 높이까지 0.125m/hr로 실시되도록 하였으며, 성토체의 단위중량은 20 kN/m^3 으로 하였다.

3.2 해석의 종류

해석의 종류는 표 2와 같으며 PDSS, 평면변형률(PS) 및 축대칭(AX)해석으로 나누어진다. 여기서 PS는 조 등(1998)에 의하여 개발된 2차원 등가모형을 이용한 평면변형률해석을 의미한다.

표 2. 해석의 종류

구 분	관입형태	해석번호	내 용
단위셀	25m 지층, 완전관입	PDSS25 - O PDSS25 - E PS25 AX25	배수재의 두께, 교란영역을 포함 등가모형 2차원평면변형을 해석 축대칭 해석(등가면적으로 환산)
	50m 지층, 25m까지 부분관입	PDSS50 - O PDSS50 - E PS50 AX50	배수재의 두께, 교란영역을 포함 등가모형 2차원평면변형을 해석 축대칭 해석(등가면적으로 환산)

3.3 등가투수계수의 산정

표 2에서 언급된 바와 같이 등가모형이 적용되는 PDSS-E 및 PS해석을 위하여 2장의 식 (3)과 조 등 (1998)의 제안식을 각각 사용하여 얻어진 등가투수계수는 표 3과 같다. 여기서 교란영역비 $s(=r_s/r_w) = 5$, 이의 투수계수비 $\eta(=k_h/k_s) = 2$, 또한 연직배수재의 연직투수계수(k_w)는 $2.55 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 를 선택하였다.

표 3. 등가투수계수

(단위 : m/s)

구 분	I(ideal)	S(smear only)	W(W/R only)	SW(smear & W/R)
PDSS-E	1.0×10^{-9}	6.352×10^{-10}	9.91×10^{-10}	6.314×10^{-10}
PS	2.405×10^{-10}	1.520×10^{-10}	2.400×10^{-10}	1.518×10^{-10}
AX		$k_h=k_v=1.0 \times 10^{-9}$ $k_{wv}=2.55 \times 10^{-2}$	$k_s=5.0 \times 10^{-10}$ $k_{wh}=5.0 \times 10^{-5}$	

3.4 유한요소망 및 경계조건

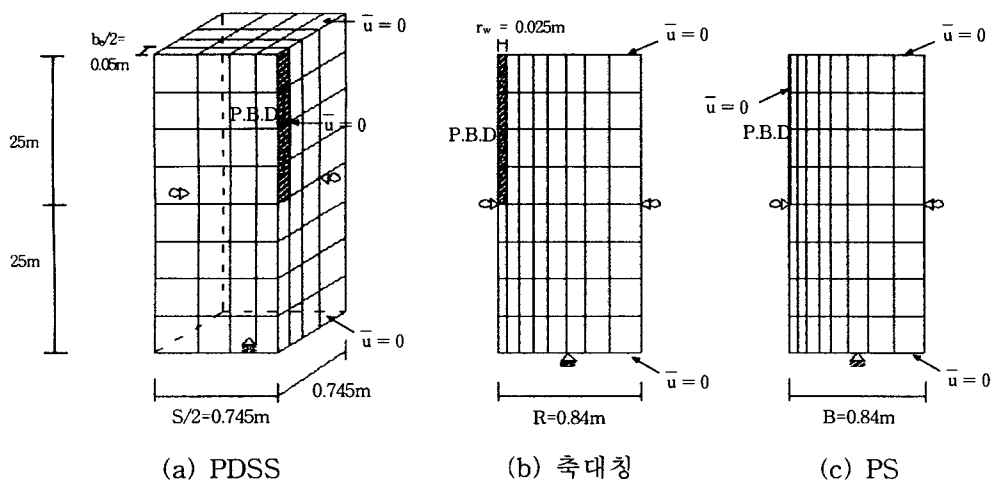


그림 3. 단위셀을 위한 유한요소망

단위셀의 해석을 위하여 각 해석종류별로 사용된 유한요소망과 경계조건은 그림 3과 같다. 모든 경우에 연직면은 가로방향의 변형을 구속하였으며, 저면은 가로 및 세로방향의 변위를 모두 구속하였다. 과잉간극수압(\bar{u})은 요소망의 상·하면에서 0으로 하였으며, PDSS-E 및 PS해석에서는 PBD가 설치되는 면에 대하여 $\bar{u} = 0$ 로 하였다.

3.5 해석결과 및 분석

3.5.1 침하량-시간 관계의 비교

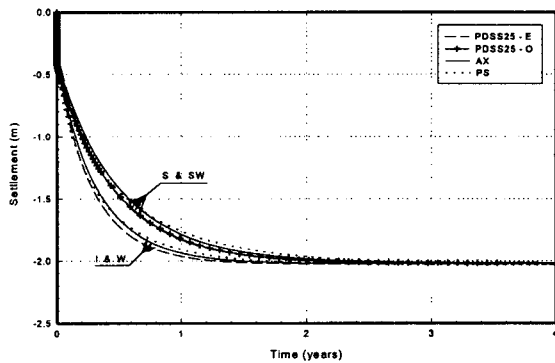


그림 4. PBD가 완전관입된 경우에 침하량-시간 관계의 비교

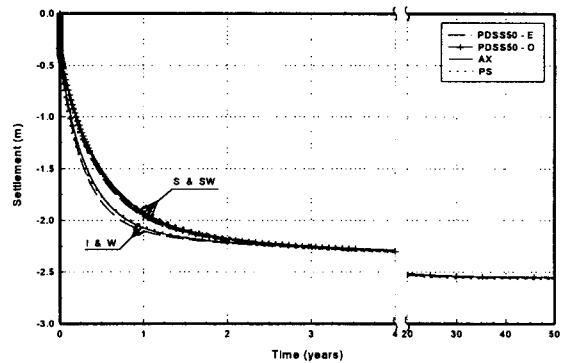


그림 5. PBD가 완전관입된 경우에 침하량-시간 관계의 비교

그림 4는 점성토층이 25m의 깊이까지 존재하며, PBD가 25m이상의 깊이로 관입되어 양면배수가 발생하는 경우에 각종 해석에 의한 침하량-시간 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 보면, 배수정 저항이 거의 무시되어서 이상적인 경우(I)와 배수정 저항만을 고려한 경우(W)가 거의 동일하게 얻어졌으며, 교란효과만 고려한 경우(S)와 교란 및 배수정 저항을 모두 고려한 경우(SW)가 거의 일치되게 나타났다. 해석방법에 따른 결과를 보면, PDSS-E와 PDSS-O가 아주 잘 일치하고 있으며, 축대칭(AX) 및 PS는 PDSS에 비하여 다소 늦게 침하가 발생하는 것으로 나타났지만 좋은 일치를 보여준다.

그림 5는 50m두께의 점토층에 PBD를 25m까지 부분관입된 경우에 각종 해석에 의한 침하량-시간 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림을 보면, 영향인자에 따른 경향은 그림 4의 경우와 동일하지만, 미처리층의 존재로 인하여 PDSS-E, PDSS-O, AX 및 PS의 결과는 거의 일치되게 나타났다. 따라서, 침하량-시간 관계를 위해서는 간편한 방법인 PS해석을 수행하여도 무방하리라 판단된다.

3.5.2 과잉간극수압의 비교

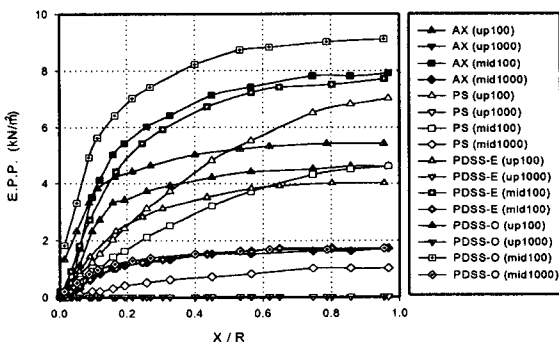


그림 6. 수평거리에 따른 과잉간극수압의 비교

그림 6은 PBD의 중간(up) 및 하단(mid)에서 재하후 100 및 1000일이 경과된 시점에서 수평거리에 따른 과잉간극수압의 분포를 각종 해석에 의하여 비교하여 나타내고 있다. 여기서 보면, PDSS-O와 PDSS-E는 축대칭해석의 경우와 비슷한 분포양상을 나타내고 있지만 약간의 정량적인 차이가 있다. 반면에, PS의 경우는 조 등(1998)이 지적하였던 바와같이 PDSS 및 AX에 비하여 정성적으로 다르게 나타나고 있다.

4. 제방성토에 대한 유한요소해석

4.1 제방성토의 조건

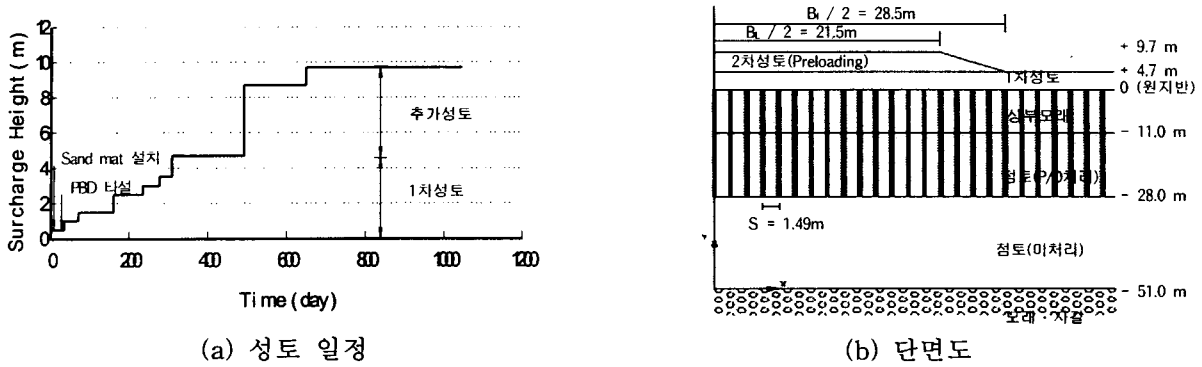


그림 7. 성토제방의 예

그림 7은 제방성토 및 지반조건을 나타내고 있다. 지층조건은 0 ~ 11m까지가 모래층이며, 11 ~ 51m까지가 점성토로 모래·자갈층 위에 위치하고 있다. 그리고 지하수위는 지표면과 일치하였다. 여기서 11 ~ 28m까지의 점성토는 표 1의 (a)에 해당하는 흙이며, 그 아래로 PBD가 미처리된 층(28 ~ 51m)은 (b)에 해당한다. 그리고 모래 및 성토체는 유한요소해석에서 탄소성모형(Mohr-Coulomb과괴규준)이 사용되었으며 표 4와 같다.

표 4. 탄소성모형의 매개변수

구 분	E (kN/m ²)	ν'	c (kN/m ²)	φ (°)	γ_t (kN/m ³)
모래층	3.0×10^5	0.3	1.0	30	18
성토체	1.5×10^4	0.28	1.0	33	19

4.2 유한요소망 및 등가무수계수

본 해석을 위하여 구성된 유한요소망은 그림 8과 같다. PDSS해석(a)을 위하여 사용된 유한요소망은 2920개의 절점, 1944개의 육면체 요소(20적분점)가 사용되었다. PS해석을 위하여 984개의 절점과 915개의 8절점 등매개요소(장방형)가 구성되었다. 경계조건으로 연직경계면은 수평변위를 구속하였으며, 저

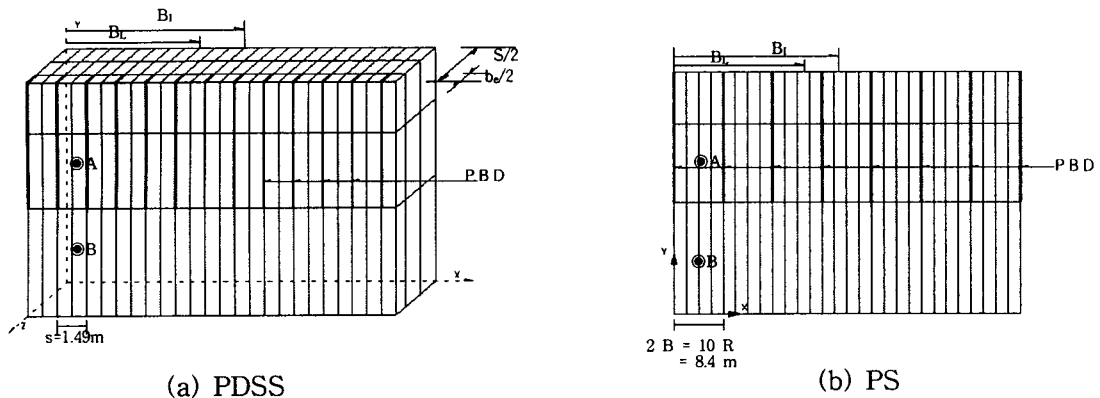


그림 8. 제방성토를 위한 유한요소망

면은 연직 및 수평변위를 모두 구속하였다. 그리고 지표면, 모래와 점성토층의 경계면 및 PBD의 매설면에 대해서는 과잉간극수압이 0이 되도록 하였다.

연직배수재의 간격은 PDSS의 경우에 실제간격(S)인 1.49m, PS해석의 경우에 5R인 8.4m간격으로 하였다. 교란영역비 $s(=r_s/r_w) = 5$, $\eta(=k_h/k_s) = 2.0$, $q_w = 5.0 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 를 채택할 때에 PDSS 및 PS해석을 위한 등가투수계수는 3장에서와 같은 방법으로 계산하면 각각 5.58×10^{-10} 및 $5.78 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 이었다. 성토체의 단위중량은 19kN/m^3 이며, 하중단계는 그림 4(a)에서와 동일하게 재하하였다.

4.3 해석결과 및 분석

4.3.1 시간별의 침하량에 대한 비교

그림 9는 PDSS 및 PS해석에 의한 깊이별의 시간 - 침하량 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 침하량은 제체의 중앙부에서의 값이다. 이 그림에서 보면, PDSS 및 PS해석에 의한 시간별의 침하량 차이는 거의 발생하지 않고 있다.

4.3.2 과잉간극수압의 비교

그림 10은 PDSS 및 PS해석에 의하여 임의의 적분점에서 얻어진 시간별의 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면, PBD의 처리층에서는 과잉간극수압이 소산되는 속도가 빠른 이유로 PDSS 및 PS해석에 의한 차이를 거의 나타내고 있지 않으나, 미처리층에서는 두 값이 약간의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 제 3장의 그림 6에서 볼 수 있었던 바와같이 PS해석에 의한 과잉간극수압의 소산은 PDSS와 축대칭 해석에서와 같이 방사상 흐름을 나타내지 않기 때문이다. 따라서, 과잉간극수압을 보다 정확히 예측하기 위해서는 PS보다는 PDSS 또는 축대칭 해석에 의하여 수행되는 것이 바람직할 것이다.

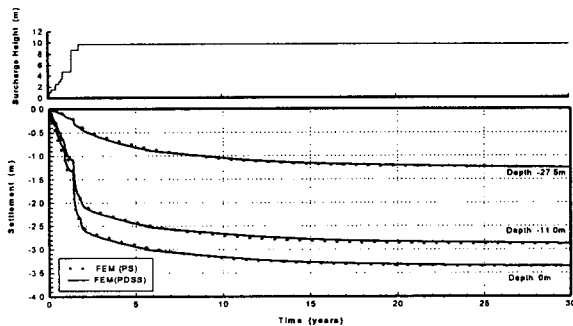


그림 9. PDSS 및 PS해석에 의한 시간-침하량 관계의 비교

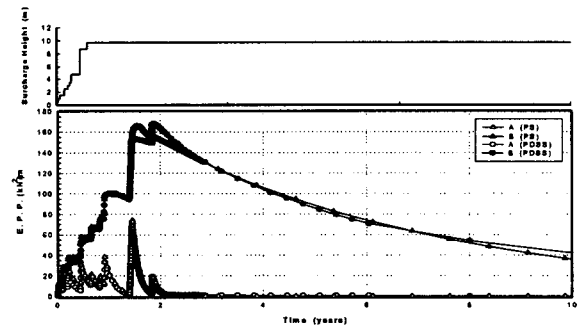


그림 10. PDSS 및 PS해석에 의한 과잉간극수압의 비교

4.3.3 축방변위

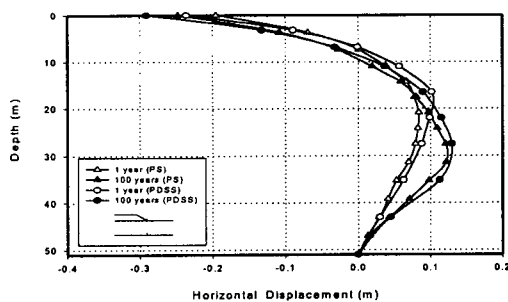


그림 11. 제방사면 아래에서의 축방변위에 대한 비교

그림 11은 제방의 사면하단 아래에 위치한 연직축에 대하여 1년 및 100년 후에 발생하는 축방변위를 PDSS 및 PS해석에 의하여 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 보면, 두 값의 차이는 약간 존재하지만 정성적 및 정량적으로 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

연약점성토지반 내에 밴드드레인이 부분 또는 완전 관입되어 있을 경우에 평면변형과 간극수의 3차원 흐름을 고려하기 위하여 평면변형 공간침투(PDSS)해석이 사용되고 있다. 본 연구에서는 배수재주변의 교란효과와 배수정저항을 고려하고 유한요소망을 최소화할 수 있는 새로운 등가모형이 PDSS해석을 위하여 제안되었다. 이 모형을 각종 조건에 적용하여 얻어진 PDSS해석결과를 평면변형률 및 축대칭해석에 의한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 새로이 개발된 등가모형을 적용하여 얻어진 PDSS해석결과는 거의 모든 경우에 실제경우를 고려한 PDSS해석결과와 잘 일치하였다.
- (2) 침하량-시간관계를 예측하기 위해서는 복잡한 PDSS해석보다는 평면변형률해석으로도 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 수평거리에 따른 과잉간극수압의 분포를 위해서는 PDSS 및 축대칭해석의 결과가 평면변형률(PS)해석보다 실제 경향에 가까웠다.
- (3) 제방성토의 경우에 측방변위는 PDSS 및 PS해석에 의한 결과가 비슷하게 얻어졌다.

참고문헌

1. 정성교, 진현식, 제호경, 김진근, 도현영(1998). “연직배수재가 부분관입된 대심도 연약지반에 대한 압밀해석,” **한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집**, pp.397-404.
2. 정성교, 조기영, 백승훈, 이대명(1998). “연직배수공이 설치된 연약지반에 대한 2차원 등가모형의 개발,” **한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집**, pp.149-156.
3. Barron, R. A. (1948). “Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells,” **Transaction ASCE**, Vol.113: pp.718-742.
4. Cheung, Y. K., Lee, P. K. K. and Xie, K. H. (1991). “Some Remarks on Two and Three Dimensional Consolidation Analysis of Sand Drained Ground,” **Computers and Geotechnics**, Vol.12: pp.73-87.
5. Dames and Moore (1982b). “Replacement Airport at Chek Lap Kok Study Report No.2-Test Embankment.”
6. Hansbo, S. (1981). “Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains,” **Proc. 10th ICSMFE**, Vol.3: pp.677-682.
7. Hart, E. G., Konder, R. L. and Boyer, W. C. (1958). “Analysis for Partially Penetrating Sand Drains,” **JSMFD, ASCE**, Vol.84, No.SM4, pp.1-15.
8. Onoue, A. (1988b). “Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration,” **Soils and Foundations**, Vol.28, No.4, pp.165-174.
9. Xie, K. H. (1987). Sand Drained Ground : Analytical and Numerical Solutions of consolidation and Optimal Design. Ph.D. **Dissertation**, Zhijang Univ.
10. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974). “Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability,” **Soils and Foundations**, Vol.14, No.2, pp.35-46.
11. Zeng, G. X. and Xie, K. H. (1989). “New Development of the Vertical Drain Theories,” **Proc. 12th ICSMFE**, Vol.2: pp.1435-1438.
12. Zeng, G. X., Xie, K. H. and Shi, Z. Y. (1987). “Consolidation Analysis of Sand Drained Ground by FEM,” **Proc. 8th ARCSMFE**, Vol.1: pp.139-142.