

제방 성토시 지반거동에 대한 점토의 비선형 투수성의 영향

Effect of the Non-linear Permeability of Clays on the Behavior of Soils in Embankment Construction

김 태 훈¹ Kim, Tae-Hoon

한 태 곤² Han, Tae-Gon

류 기 정³ Yoo, Ki-Cheong

이 송⁴ Lee, Song

Abstract

The coefficient of permeability of natural clay shows a nonlinear property which is related to various stress level of soils, and this nonlinear property has effect on the period of consolidation and the property of deformation in clay soils under loading. Thus, in this paper the numerical analysis was conducted by FEM-using coupled theory which incorporated Biot's consolidation theory into modified Cam-clay model- to consider the effects of nonlinear permeability on the behavior of clay soils under loading. The result of this paper showed that nonlinear permeability had different effects on the deformation and excess pore water pressure in clay soils according to the change of ratios of coefficients of permeability which was presented a degree of nonlinear property, and average coefficients of permeability of soils. Therefore, it was concluded that nonlinear permeability should be considered according to both the change of ratios of coefficients of permeability and average coefficients of permeability to conduct more simultaneous analyses to field conditions.

요 지

일반 자연 점토지반의 투수계수는 다양한 응력수준에 따라 비선형적인 특성을 보이며, 이러한 지반 투수계수의 비선형성은 상재하중 재하시 지반의 압밀시간 및 지반 변형 특성에 영향을 주게 된다. 따라서, 본 연구에서는 지반의 비선형 투수계수의 영향성을 고찰하기 위해 수정 Cam-clay 모델과 Biot의 압밀이론을 접목한 연립이론(Coupled theory)을 이용하여 FEM 수치해석을 실시하였다. 점토 결과 비선형 투수성은 비선형 특성을 나타내는 투수계수 변화비와 전체 간극비에 대한 평균 투수계수의 크기에 따라 지반 변형과 지중 과잉간극수압에 미치는 영향성이 상이하게 나타났다. 따라서, 보다 현장에 근접한 해석을 실시하기 위해서는 지반 투수계수의 변화비와 평균 투수계수의 크기에 따라 투수계수의 비선형 특성을 고려해야 할 것인지를 판단해야 할 것이다.

Keywords : Consolidation analysis, Coupled analysis, Modified cam-clay model, Nonlinear permeability

1. 서 론

연약 점토지반상 중량의 구조물을 건설하기 위해서는 지반개량공법이 요구되며, 그 중 공사부지와 공기의

여유가 확보된다면 계획된 성토 하중을 재하시켜 지반의 압밀침하를 사전에 촉진시키고 기초지반의 전단강도 증진과 잔류침하 억제를 목적으로 하는 프리로딩 공법이 사용되고 있다. 하지만, 지반개량시 성토하중

1 정회원, 한진중공업 토목설계팀 (Member, Civil Design Dept., Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd., kth73@hanjinco.com)

2 정회원, 한진중공업 토목설계팀 부장 (Member, Dept. manager, Civil Design Dept., Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd.)

3 정회원, 한진중공업 상무 (Member, Managing director, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd.)

4 정회원, 서울시립대 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., University of Seoul)

을 급속히 재하시키면 지반의 전단응력이 증가되어 전단변형이 심하게 유발되는 측방변형이 발생되거나, 심한 경우 지반의 전단파괴를 유발시킬 수 있으므로 성토 재하시 단계성토 및 완속재하를 실시하여 제방의 안정성을 확보하고 있다.

이러한 이유로 연약지반상 성토시 지반의 거동분석 및 안정성을 위하여 Tavenas(1978), Watson(1984) 등뿐만 아니라 많은 연구자들은 관측된 현장 계측자료를 바탕으로 연구를 실시해 왔으며, 국내에서는 현장의 계측자료와 FEM 및 FDM 해석기법 등의 수치해석을 이용하여 기초지반의 안정성과 그 거동을 검토 및 분석하고 있다.

하지만, 상기의 안정성 검토 수치해석 방법들은 지반의 투수성을 선형적, 또는 상수로 취급함으로써 간극비, 유효응력에 따라 변화되는 비선형 투수계수의 특성을 고려하지 못하며, 지반의 응력이력 및 응력상태에 따라서 압밀기간을 과대 및 과소 예측할 우려가 있다.

따라서, 본 논문은 실내 표준압밀시험 결과를 입력자료로 한 FEM 수치해석 프로그램을 개발하여 연립이론(Coupled theory)의 압밀해석을 실시하였고, 그 결과를 연약지반상 건설된 제방 현장의 계측자료와 비교·검토하여 지반 비선형 투수성의 영향성을 고찰하였다.

2. 지반 투수계수의 비선형성

정규 압밀 영역에서 점토 지반의 투수계수는 간극비 변화에 따라 일정한 값을 갖지 않고 비선형적인 특성을 갖는다. 이러한 점토지반의 간극비와 투수계수의 비선형적인 관계를 그림 1에서 잘 보여주고 있다.

그림 1에서는 재성형 점토에 있어 비선형적인 간극비와 투수계수의 관계를 나타내며, 흙의 투수성은 간극비

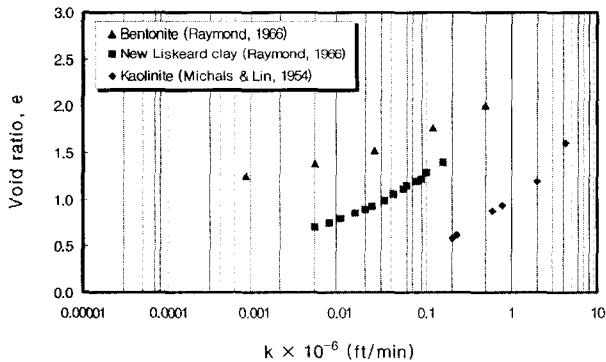


그림 1. 간극비와 투수계수의 비선형성(1ft/min=0.51cm/sec)

의 변화에 따라 일정한 상수를 갖는 것이 아니라 간극비 0.7~2.0 범위에서 변화함에 따라 지반의 투수성이 비선형적으로 변화하고 있는 것을 보여주고 있다. 즉, 이것은 지반의 비선형 투수성이 압밀특성에 영향을 미치고 있기 때문에 투수계수의 비선형을 고려하지 않고 지반 투수계수를 전체 응력수준의 단일 대표값으로 설정한다면 지반의 시간 의존적인 변형 및 응력상태에 대한 오차를 발생시킬 수 있음을 시사한다.

따라서, 많은 연구자들은 실내 및 현장시험을 근간으로 지반 투수계수의 비선형성을 연구해 왔으며, 대표적으로 Taylor(1948)는 지반의 투수성이 간극비와 다양한 관계를 이루고 있음을 제시하였다.

Taylor(1948)는 점토지반과 모래지반에서 간극비, e에 따른 투수계수, k를 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (1)$$

여기서, C와 n은 지반 투수계수의 특성을 나타내는 상수로서 표현된다.

또한, Mesri 등(1985)은 점토지반의 비선형적인 투수계수, k를 식 (2)와 같은 형식으로 제시하였다.

$$k = C_{coe} \exp(D_{coe}e) \quad (2)$$

여기서, 계수 C_{coe} 와 D_{coe} 는 실내투수시험을 통해 결정된 계수이다.

그림 2는 국내 준설 점토 지반의 비선형적인 투수계수 특성을 나타내며, 본 논문은 이러한 연약 점토의 특성을 묘사하기 위해 식 (2)를 사용하였다. 즉, 재료의 비선형 특성을 일반적인 표준압밀시험 자료를 통해 결정하고, 이러한 비선형 특성을 적용하여 상재하중 재하시 연약지반의 거동을 해석하고자 하였다.

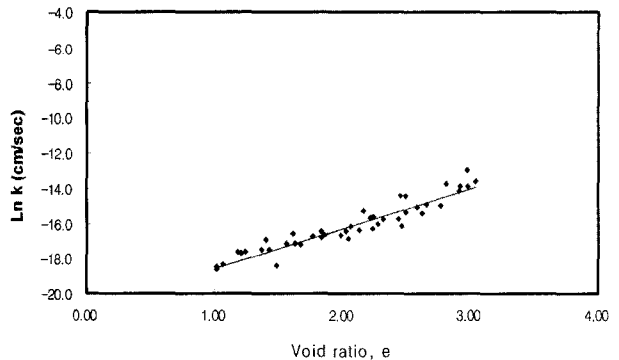


그림 2. 준설점토의 간극비와 투수계수의 비선형성(e - ln k)

일반적인 자연점토는 선형압밀하중, P_c 점을 경계로 하여 그림 3과 같은 투수계수의 변화를 보이게 된다. 이것은 점토에 가해지는 상부 하중이 증가함에 따라 점토 구조의 붕괴가 시작되는 정규압밀영역에서는 과압밀 영역 보다 투수계수가 보다 작으며, $e-\ln k$ 의 기울기도 P_c 를 경계로 급격히 감소하기 때문이다.

그림 5는 국내 남해안 지역에서 소성지수가 30~70에 들며, 통일분류상 CL, CH에 해당하는 연약점토지반에 대한 대표적인 실내 표준압밀시험 결과들이다. 여기서, 정규압밀 영역과 과압밀 영역을 구분으로 각 영역에 대한 간극비와 투수계수 관계들은 일정한 경향성, 즉 간극비에 따른 일정한 투수계수변화를 잘 나타내고 있음을 볼 수 있다.

따라서, 각각의 영역에서 식 (2)를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln k &= \ln C_1 + D_1 e \quad (\text{NC}) \\ \ln k &= \ln C_2 + D_2 e \quad (\text{OC}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 정규압밀 영역의 간극비에 따른 투수계수 변화율, D_1 에 대한 과압밀영역의 간극비에 대한 투수계수 변

화율, D_2 에 대하여 투수계수 변화비, S_k 는 식 (4)로서 나타낼 수 있다.

$$S_k = \frac{[\Delta(\ln k)/\Delta e]_{OC}}{[\Delta(\ln k)/\Delta e]_{NC}} \quad (4)$$

이 때 과압밀 영역에서의 D_2 는 정규압밀 영역에서의 D_1 에 비해 점토의 소성 지수가 증가함에 따라 그림 4와 같이 2~8배정도 크게 관찰되었다. 따라서, 이러한 투수계수 변화율과 소성지수 관계를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (5)에서 소성지수가 15~25%인 저소성 점토 또는 실트의 경우 투수계수 변화율이 1이하의 값이 산출되리라 판단할 수 있지만, 소성지수가 15%이하에서는 적용될 수 없다.

$$S_k = 0.11 \times I_p - 1.67 \quad (5)$$

3. 수치해석

3.1 지반의 압밀 해석을 위한 구성관계

본 연구에서는 실제 지반 투수계수의 비선형성이 제

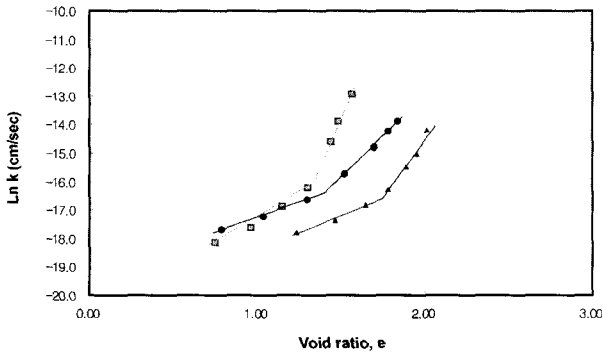


그림 3. 자연 점토의 투수 특성

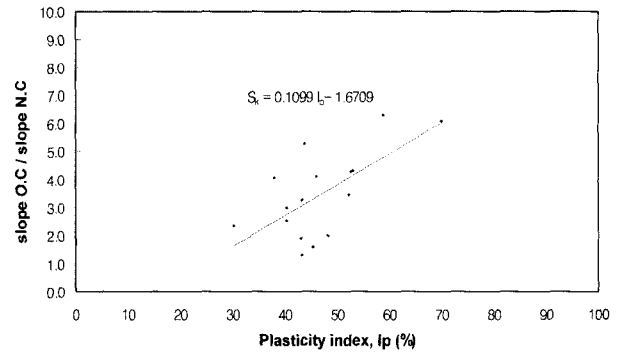
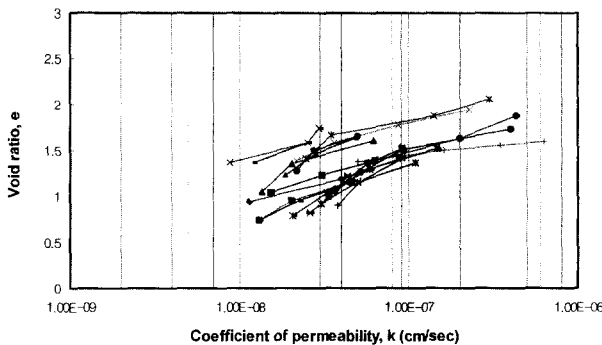
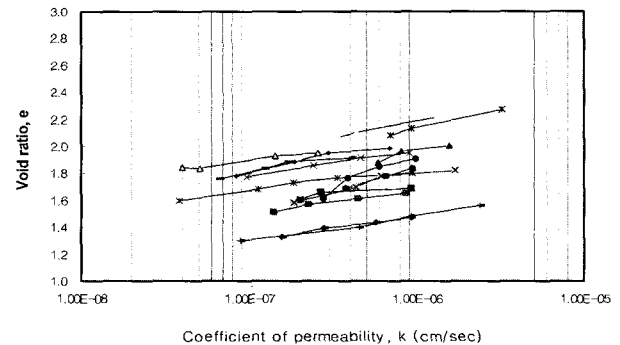


그림 4. 소성지수에 따른 점토의 투수계수 변화율

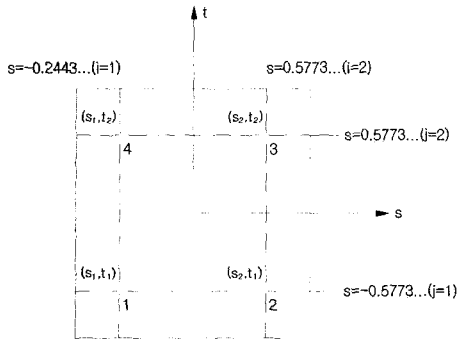


(a) 정규압밀 영역

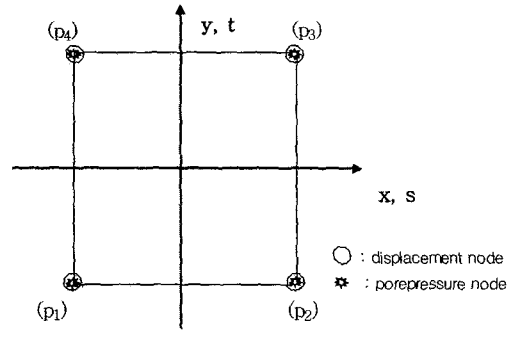


(b) 과압밀 영역

그림 5. 국내 남해안 연약점토의 간극비-투수계수 특성($PI=30 \sim 70$, CL 또는 CH)



(a) 2차원 4 노드 Gaussian quadrature



(b) 간극수압 요소

그림 6. Isoparametric 4 절점 사각형 요소(변위 및 간극수압)

방 거동에 미치는 영향성을 검토하기 위해 지반의 압밀 현상을 고려한 연립이론으로 프로그램을 구성하였다. 그림 6(a)과 같이 사각형 4 절점 요소를 이용하였으며, 간극수압과 변위 요소는 그림 6(b)과 같이 동일한 절점을 사용하여 각각의 매트릭스를 구성하였다. 이 때 전체 지배방정식은 탄·소성 구성관계와 Biot의 압밀이론을 적용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [K] & [L] \\ [L]^T & -[\Phi] \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \{d\} \\ \Delta \{p\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_S [N]^T \{\Delta f^s\} dS \\ [\Phi] \Delta t \cdot \{p\}_1 + \int_S [\bar{N}]^T \{v_{n2}\} \Delta t dS \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $[N]$, $[\bar{N}]$ 는 변위 및 간극수압의 shape function이며, $\{f^s\}$ 는 작용 표면하중, $[K]$ 는 지반의 강성 매트릭스, $[L]$ 은 지반 변위와 간극수압의 관계를 나타내는 링크 매트릭스, $[\Phi]$ 는 간극수압의 특성을 나타내는 매트릭스이다. 또한, Δt 는 시간 증분, $\Delta \{d\}$, $\Delta \{p\}$ 는 각 절점의 변위 및 간극수압을 나타낸다. 본 연구에서는 경계면상의 침투, $\{v_n\}$ 를 고려하지 않으므로 $\int_S [\bar{N}]^T \{v_{n2}\} \Delta t dS = 0$ 으로 설정하였다.

따라서, 식 (6)의 평형방정식을 이용하여 $t=0$ 에서 초기조건으로 $t + \Delta t$ 에서의 변위 및 간극수압을 결정하는 방식으로 기초 지반의 시간변화 특성을 해석하였고, 이러한 성토재하시 지반의 시간 의존적인 거동은 그림 7과 같은 절차를 통하여 분석되었다(김태훈, 2003).

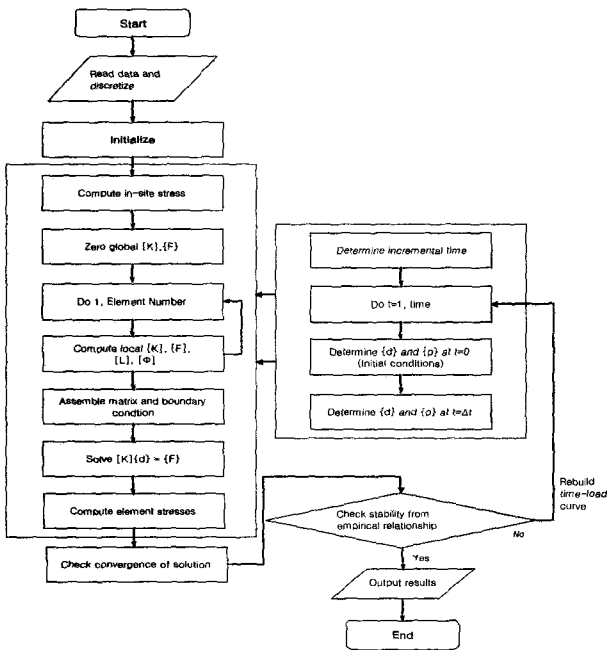


그림 7. 압밀 분석의 흐름도

3.2 지반의 비선형 투수성

본 연구에서는 지반의 비선형 투수성을 고려하기 위해서 실내 표준압밀시험 자료를 단계별로 입력시킬 수 있도록 하였으며, 또한 투수계수의 변화 기울기 값을 이용하여 보다 간편하게 입력시킬 수 있도록 하였다.

즉, 그림 8과 같이 표준압밀시험 결과를 그대로 입력시키거나, 또는 NC 및 OC 영역의 교차점과 각 영역에서의 투수계수 변화율로 지반의 비선형성을 고려하였다.

이 때 정규압밀 영역과 과압밀영역의 경계점인 선형 압밀하중, P_c 지점에서의 간극비 결정은 식 (7)과 같다.

$$e_{p_c} = e_0 - C_r \Delta \log p \quad (7)$$

본 해석상에서는 P_c 지점에서 간극비, e_{p_c} 에 대응하는 투수계수, 그리고 과압밀 영역과 정규압밀영역에서의 투수계수 기울기 값을 입력시키므로 점토의 간극비 또

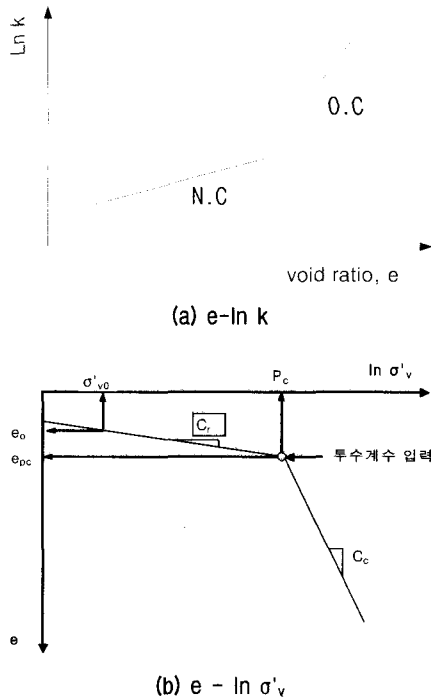


그림 8. 비선형 투수계수의 응력이력에 따른 특성

는 응력수준에 따른 각 지층의 투수성의 변화를 FEM 해석 절차에 도입시켰다.

3.3 모델링 및 경계조건

그림 7과 같은 절차에 의해 수치해석을 적용하고 각 요소의 변위 및 간극수압 경계조건을 그림 9와 같이 설정하였다. 이 때 지반의 최 상부와 최 하부로 배수가 이루어지므로 그림 9의 간극수압 경계조건은 양면 배수조

표 1. 말레이시아 Muar 지역의 수정 Cam-clay 모델에 사용된 지반물성치

심도 (m)	κ	λ	e_{cs}	M	ν	K_w ($\times 10^4$ kPa)	v_s (kN/m^3)	k_h (m/sec)	k_v (m/sec)
0~2.0	0.05	0.13	3.07	1.19	0.3	4.4	16.5	1.5×10^{-9}	0.8×10^{-9}
2.0~8.5	0.05	0.13	3.07	1.19	0.3	1.1	15.5	1.5×10^{-9}	0.8×10^{-9}
8.5~18.5	0.08	0.11	1.61	1.07	0.3	22.7	15.5	1.1×10^{-9}	0.6×10^{-9}
18.5~22.5	0.10	0.10	1.55	1.04	0.3	26.6	16.0	1.1×10^{-9}	0.6×10^{-9}

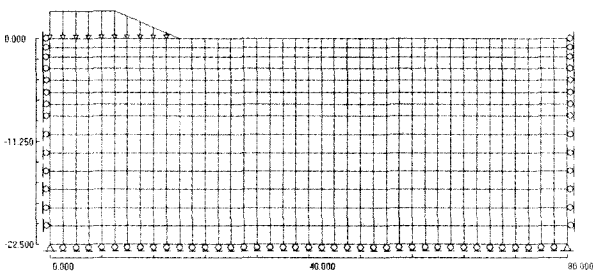


그림 9. 경계조건 및 하중조건

건을 갖는다.

4. 배수 조건에 따른 영향성

본 연구에서는 배수조건에 따른 제방거동 해석에 대한 영향성 및 비선형 투수계수의 영향성을 검토하기 위해 말레이시아의 Muar 지역에서 실시한 시험성토구간의 지반물성 및 계측자료를 이용하였다. 이 지역에서 실시한 시험성토는 제방이 파괴될 때까지 성토를 1주일당 0.4m의 속도로 5.5m까지 지속적으로 실시되었으며, 이 때 매설된 계측기기의 위치는 그림 10과 같다. 지반물성치는 표 1과 같이 Indrarata 등(1992)이 Muar 지역의 수정 Cam-clay 모델에 적용한 자료를 이용하였다.

먼저, 제방 거동 해석은 개발된 프로그램으로 비배수 및 압밀해석을, Crisp 상용프로그램으로 압밀분석을 실시하여 그림 11~14와 같이 비교하였다. 여기서, 현장의 지표침하 및 수평 변위, 위치별 과잉간극수압의 양상을 계측자료와 비교하여 배수조건에 따른 해석의 경향성을 파악하였다. 이 때 Crisp으로 해석시 단계별 성토하중을 성토 요소의 자중으로 지반의 응력 및 변위를 해석한 반면, 개발된 프로그램으로 수치해석시 Surface load의 단계별 증가로 지반의 거동을 해석한 차이점이 있다.

그림 11의 성토 단계별 지표침하 결과를 살펴보았을 때 성토 초기시 비배수 및 압밀해석 모두 실제보다 지표침하를 과대 평가하였지만, 그 이후 지표면과 하부 지층의 압밀현상을 고려한 압밀해석이 지표침하를 비배수 해석보다 우수한 결과를 보였다.

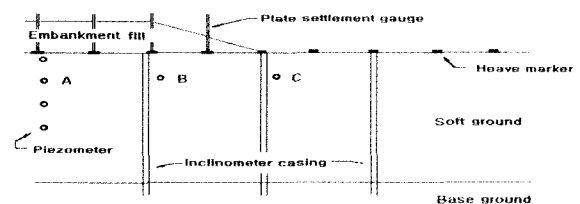


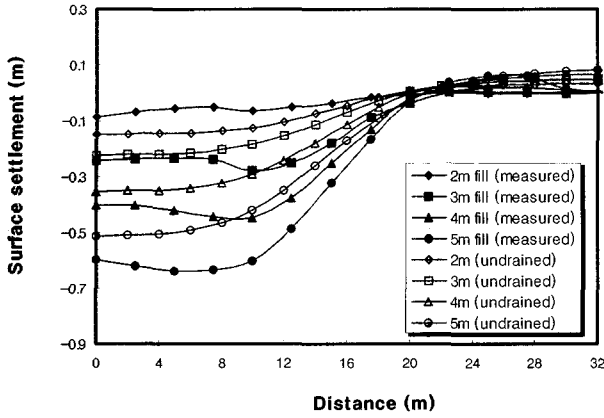
그림 10. 말레이시아 Muar 지역의 계측기기 위치도

그림 12는 성토 재하시 유발되는 과잉간극수압의 경향을 보여준다. 심도 5m 지점에서 제방 중심으로부터 각각 거리, 0m, 10m, 20m 지점의 과잉간극수압은 초기 재하 및 성토 2m일 때 과잉간극수압을 비배수 해석이 과대 평가하였다. 반면 압밀해석은 과소 평가하였지만, 계층자

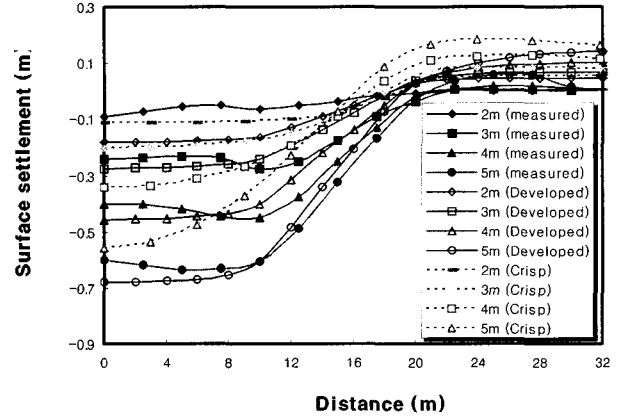
료와 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 압밀해석이 재하시 지반의 응력상태를 보다 잘 예측할 수 있음을 보여준다.

그림 13은 재하단계시 수평변위를 보여준다.

이때 비배수 및 압밀해석 모두 재하로 인한 지반의 측방유동 현상을 과대 평가하는 경향을 보이지만, 성토

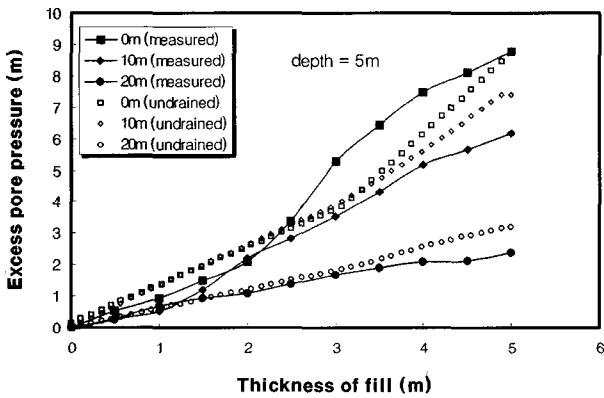


(a) 비배수 해석

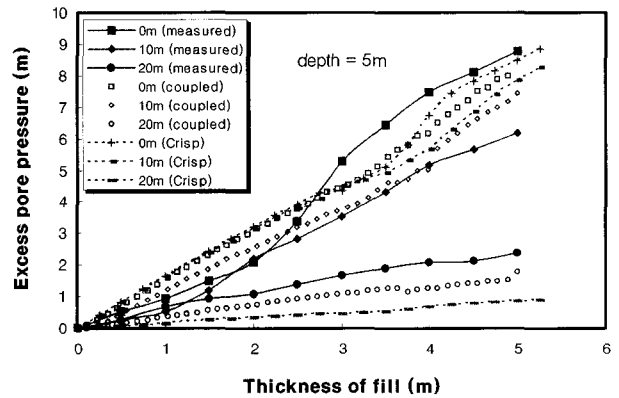


(b) 압밀해석

그림 11. 성토단계별 지표침하 비교

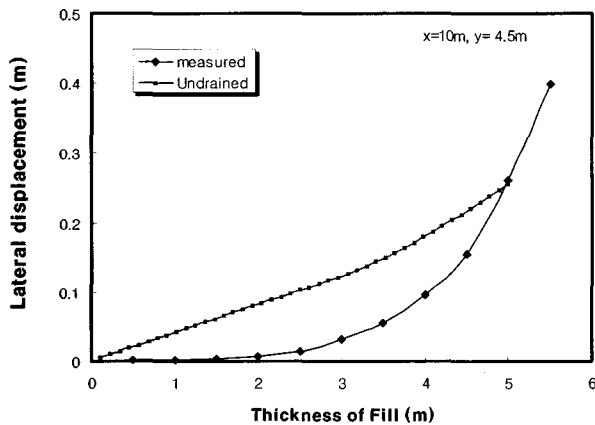


(a) 비배수 해석

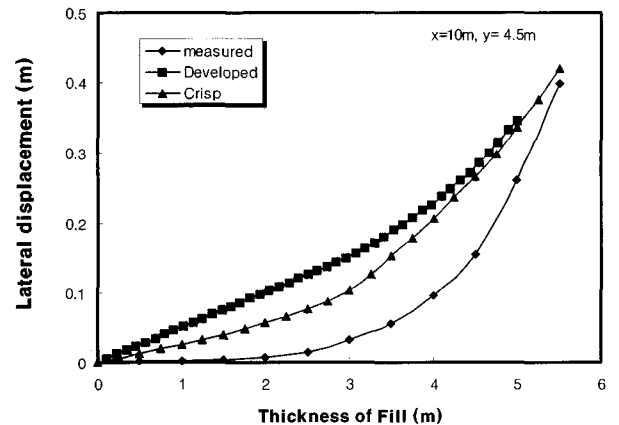


(b) 압밀해석

그림 12. 성토중심에서 수평거리별 간극수압 비교(z=10m)



(a) 비배수 해석



(b) 압밀해석

그림 13. 성토단계별 수평변위 비교

3~4m를 경계로 측방유동에 있어 급격한 증가를 보이는 경향성을 볼 때 압밀해석이 현장의 제방 거동을 보다 잘 나타내주고 있음을 시사한다.

또한, 본 연구에서 개발된 프로그램과 Crisp로 실시된 압밀해석은 성토시 지반거동에 있어 유사한 결과를 보였지만, 본 개발된 프로그램이 Crisp 보다 실제 계측값과 유사한 결과를 보여 주었다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때 부분배수가 발생하는 점토지반의 성토재하에 따른 지반거동 해석시 수정 Cam-clay 모델을 이용한 압밀해석이 우수하게 적용될 수 있음을 시사한다. 결국, 성토 재하시 제방의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 제방성토 단계시 진행되는 지반의 배수효과를 고려할 수 있는 압밀분석이 가장 정확한 결과를 도출하고 있음을 확인하였다.

5. 비선형 투수계수의 영향성

연약 점성토 지반에 성토재하시 성토고가 높아짐에 따라 지반의 지중응력은 증가하게 되며, 지중응력에 대

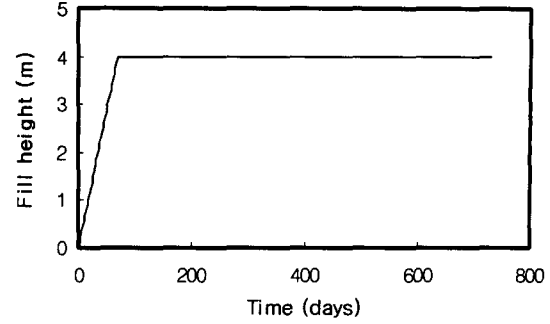
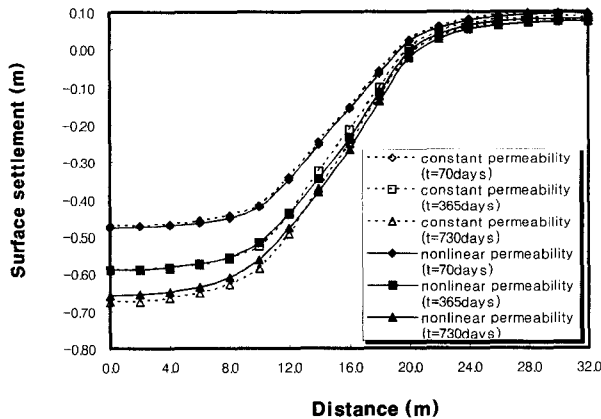


그림 14. 해석에 적용한 시간-하중 곡선

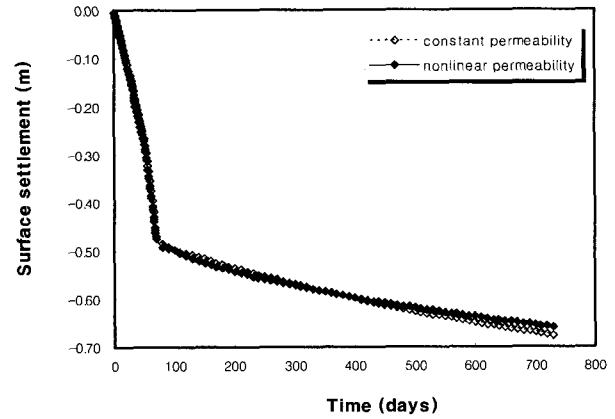
응하는 간극비는 감소하게 된다. 따라서, 그림 1과 같이 지반 투수계수의 비선형성으로 지반의 투수성은 감소하게 된다.

본 논문에서는 지반 투수계수의 비선형성을 고려하기 위해 투수계수의 비선형성을 수치해석 절차에 도입시켜 기초 지반의 거동을 분석하였다. 이 때 그림 4에서와 같이 투수계수 변화비, S_k 를 2~8의 범위에서 변화시키며 지반거동을 살펴보았다.

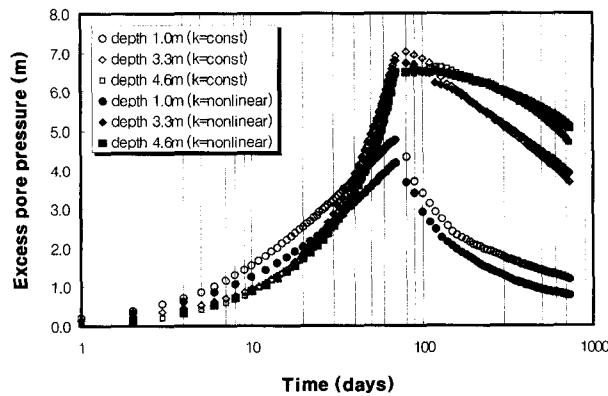
재하 하중은 그림 14와 같이 성토고 4m까지 기준 압



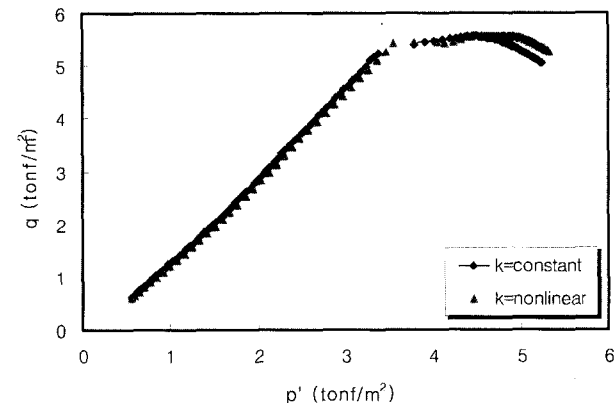
(a) 제방중심선에서 거리별 지표침하



(b) 제방 중심 아래 지표침하



(c) 심도별 과잉간극수압



(d) 제방 중심아래 지점의 응력경로

그림 15. 비선형 투수계수의 영향성(성토고=4m, 투수계수 변화비=4)

밀해석과 같이 0.4m/week의 속도로 재하조건을 설정하였고, 2년까지 압밀과정을 모델링하였다.

그림 15는 $S_k=4$ 를 적용했을 때, 그리고 그림 16은 $S_k=8$ 를 적용했을 때 지반 투수계수의 비선형성으로 나타나는 지표침하, 심도별 과잉간극수압, 응력경로의 결과를 보여준다.

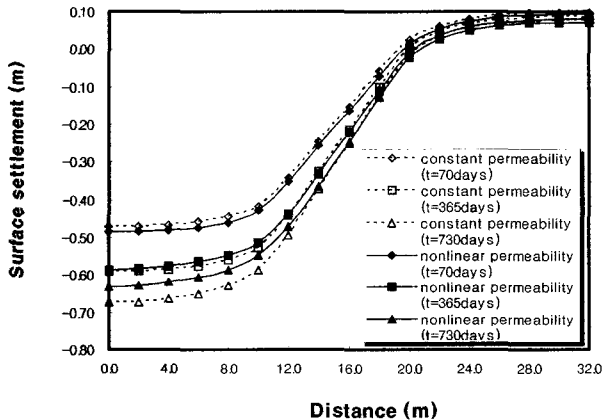
먼저, 제방중심선에서 거리별 지표침하 결과인 그림 15(a) 및 그림 16(a)를 살펴보면 성토재하시 지반의 유효응력은 증가되며, 항복응력 이전에 지표 침하는 단일 투수계수를 사용했을 때보다 크게 산출되는 경향이 있다. 그 이후 항복응력을 지나면서 단일 투수계수를 사용했을 때 보다 지표침하가 작게 산출되었다.

즉, 과압밀 지반에서 초기 항복하중보다 작은 하중이 적용되었을 때는 지반의 투수계수가 단일 투수계수보다 큰 조건이므로 압밀침하량이 증가되며, 성토하중이 지반의 항복하중보다 크게 적용될 때는 지반의 투수계수는 단일 투수계수보다 작은 조건이므로 압밀침하량이 감소하게 된다. 그림 15(b) 및 그림 16(b)는 상기의 결

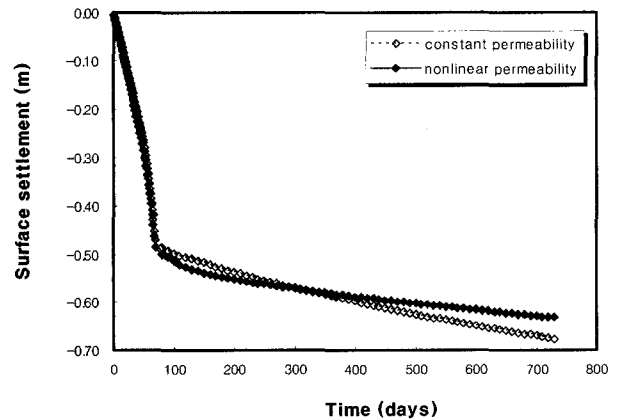
과를 유사하게 보여주고 있다.

그림 15(c) 및 그림 16(c)는 제방 중심아래 심도 1m, 3.3m, 4.6m 지점에서 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화를 보여주고 있다. 심도 3.3m 및 4.6m 지점의 정규 압밀 조건에서는 투수계수의 비선형성이 과잉간극수압 변화에 큰 영향을 주지 않지만, 심도 1m 지점의 과압밀 조건에서는 비선형 투수계수의 영향이 크게 발견되고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 과압밀 조건에서는 단일 투수계수보다 투수계수가 보다 크게 적용되므로 배수가 보다 원활히 이루어지고 발견되는 과잉간극수압이 보다 적게 평가되고 있다.

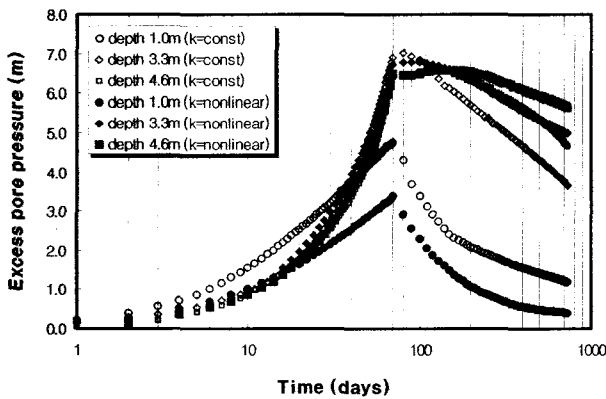
그림 15(d) 및 그림 16(d)은 성토 중심 바로 아래 지점의 응력경로를 보여주고 있다. 여기에서, 투수계수의 비선형성 영향으로 과압밀 조건의 제방 중심아래 지점의 응력경로는 보다 많은 과잉간극수압의 소산으로 단일 투수계수를 적용했을 때보다 안전한 응력경로를 보여주고 있다.



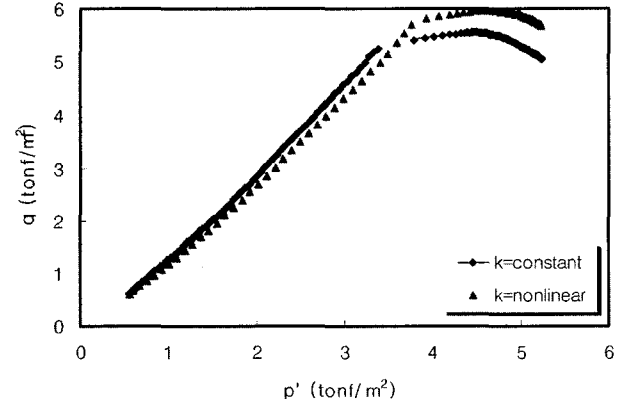
(a) 제방중심선에서 거리별 지표침하



(b) 제방중심 아래지점의 지표침하



(c) 제방 중심선에서 심도별 과잉간극수압



(d) 제방 중심아래 지점의 응력경로

그림 16. 비선형 투수계수의 영향성(성토고=4m, 투수계수 변화비=8)

5.1 투수계수 변화비의 영향성

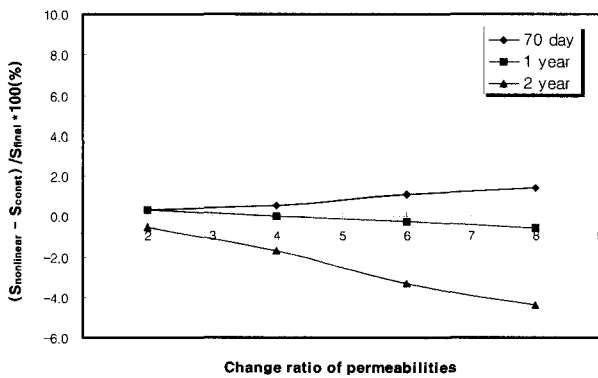
다음으로 비선형 투수계수의 영향을 고려시 투수계수 변화비가 침하량과 과잉간극수압에 미치는 영향을 살펴보았다. 그림 17은 단일투수계수를 사용했을 때를 기준으로 침하량 및 과잉간극수압의 변화비를 보여준다. 여기서, 침하량의 차는 압밀종료 후 최종 침하량으로 정규화시켰으며, 과잉간극수압의 차는 성토재하시 초기 과잉간극수압으로 정규화시켰다.

먼저, 그림 17(a)에서 성토재하 종료 시(70일)에는 투수계수 변화비가 증가할수록 즉, 선형압밀하중을 기준으로 정규압밀영역과 과압밀 영역에서의 투수계수 변화가 클수록 지표침하량은 비교적 선형적인 증가를 보여 1.4%의 침하량을 과대 평가하였다. 하지만, 재하 종료시간을 포함한 1년 및 2년 경과시 투수계수 변화가 클수록 지표침하량은 비교적 선형적인 감소를 보여 2년 경과시 4.4%의 침하량 감소를 보였다. 그림 16(b)에서 볼 수 있듯 시간이 경과할수록 침하량은 더욱 크게 감소하다 최종 압밀시점에서는 동일한 침하를 발생시킬 것

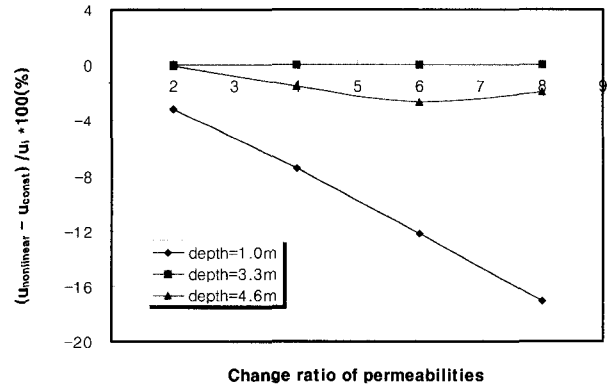
으로 판단된다.

이러한 원인은 단일 투수계수를 적용했을 때 과압밀 조건에서는 비선형성을 고려하지 않은 경우 보다 작은 투수계수가 적용되고, 정규압밀조건에서는 보다 큰 투수계수가 적용되기 때문이다. 따라서, 지반 투수계수의 비선형성을 고려하지 않은 경우 과압밀 영역에서는 침하량을 과소평가하고, 정규압밀 영역에서는 침하량을 과대 평가함을 의미한다.

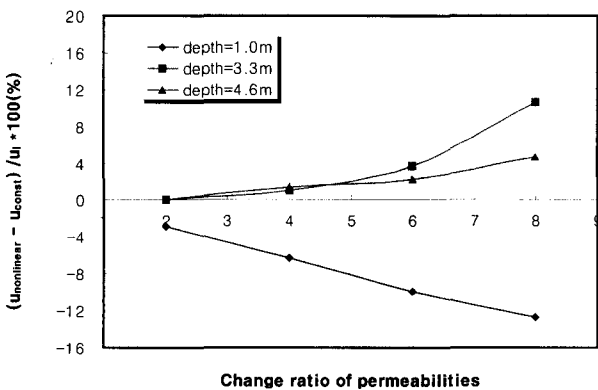
그림 17(b)~(d)는 투수계 변화비에 따른 성토 중심에서 발생하는 과잉간극수압의 영향을 보여준다. 여기에서도 마찬가지로 비선형 투수계수의 영향으로 성토재하시 유발되는 과잉간극수압은 과압밀 조건을 갖는 심도 1m 지점에서는 투수계수 변화비가 클수록 선형적인 감소를 보이며, 압밀시간이 증가할수록 과잉간극수압의 차는 점점 작아진다. 하지만, 심도 3.3m 및 4.6m의 정규압밀 영역에서는 투수계수비 및 압밀시간이 길수록 과잉간극수압의 증가는 더욱 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 지표 침하량에 대한 경향과 마찬가지로 최종 압밀시점에서는 과잉간극수압이 완전히 소산되므



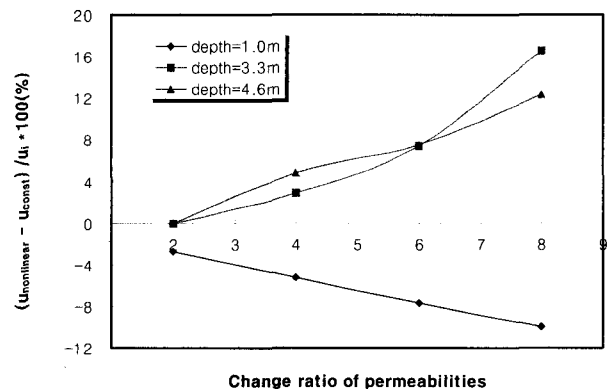
(a) 투수계수 변화비에 따른 침하비



(b) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(70일)



(c) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(1년 후)



(d) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(2년 후)

그림 17. 비선형 투수계수의 영향성(성토고=4m, 투수계수 변화비=8)

로 선형 및 비선형 과잉간극수압의 차는 완전히 사라지게 될 것이다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때 정규압밀 영역과 과압밀 영역의 투수계수 변화가 매우 큰 점토의 경우 단일 투수계수를 사용하여 침하량을 예측한다면 단일 투수계수를 적용한 연립 압밀해석시 지표침하량을 최종침하량을 기준으로 약 4.4% 이상 과대 평가할 수 있으며, 또한 임의 심도의 과잉간극수압을 초기 과잉간극수압을 기준으로 약 16% 이상 과대 및 과소 평가할 수 있음을 시사한다.

5.2 평균 투수계수의 영향성

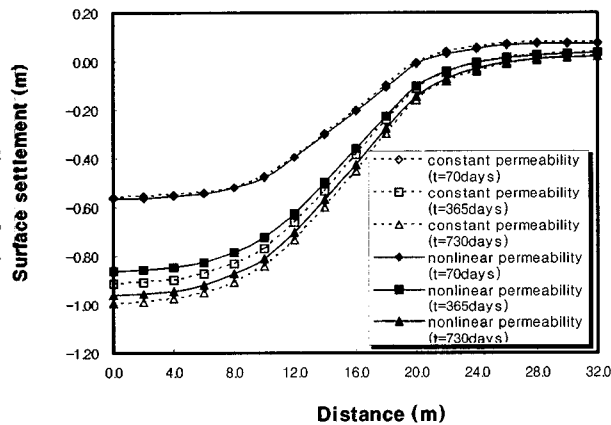
지반을 구성하는 여러 지층의 평균 투수계수가 Muar 지역과 같이 $8 \times 10^{-8} \sim 1.5 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 보다 전체적으로 크게 될 경우 기초지반에 대한 비선형 투수계수의 영향성을 살펴보았다. 이를 위해 Muar 지역의 각 지층별 평균 투수계수를 5배, 10배 증가시켜 해석을 실시하였다.

그림 18 및 그림 19는 평균 투수계수를 10배 증가시킨 후 S_k 가 각각 4와 8일 경우의 지표침하, 과잉간극수압, 응력경로를 보여준다. 그림 18과 그림 19에서 평균 투수계수의 증가로 침하속도 및 과잉간극수압의 소산이 원지반 투수계수를 적용했을 때보다 급속히 증가한 것을 볼 수 있다.

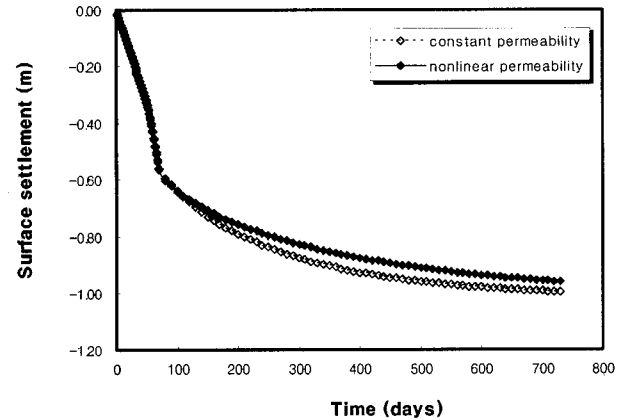
그림 20은 이러한 평균투수계수의 증가에 대한 비선형 투수계수의 영향성을 보여준다. 식 (8)의 지표 침하비, S_r 및 식 (9)의 과잉간극수압 비, u_r 을 이용하여 평균 투수계수의 영향성을 분석하였다.

$$S_r = \left[\left(\frac{S_{\text{nonlinear}} - S_{\text{const}}}{S_{\text{final}}} \right) \times 100(\%) \right]_{nk} - \left[\left(\frac{S_{\text{nonlinear}} - S_{\text{const}}}{S_{\text{final}}} \right) \times 100(\%) \right]_{\text{origin } k} \quad (8)$$

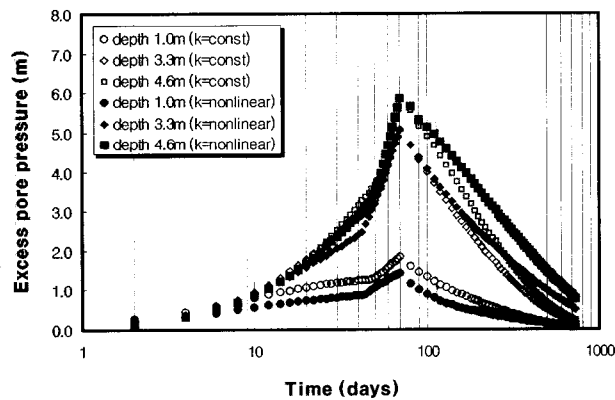
$$u_r = \left[\left(\frac{u_{\text{nonlinear}} - u_{\text{const}}}{u_{\text{initial}}} \right) \times 100(\%) \right]_{nk} - \left[\left(\frac{u_{\text{nonlinear}} - u_{\text{const}}}{u_{\text{initial}}} \right) \times 100(\%) \right]_{\text{origin } k} \quad (9)$$



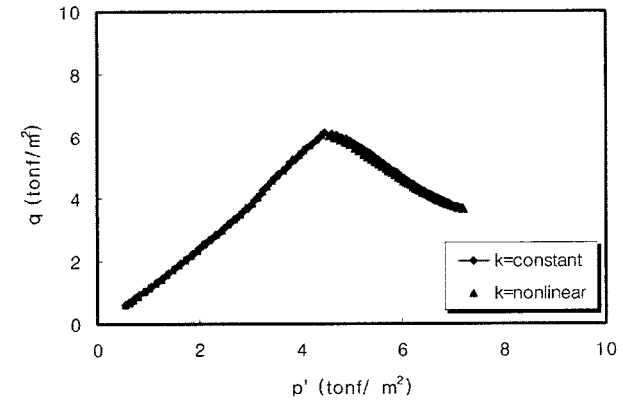
(a) 제방중심선에서 거리별 지표침하



(b) 제방 중심 아래 지표침하

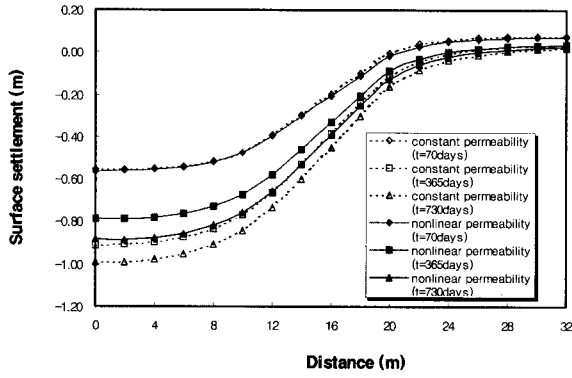


(c) 심도별 과잉간극수압

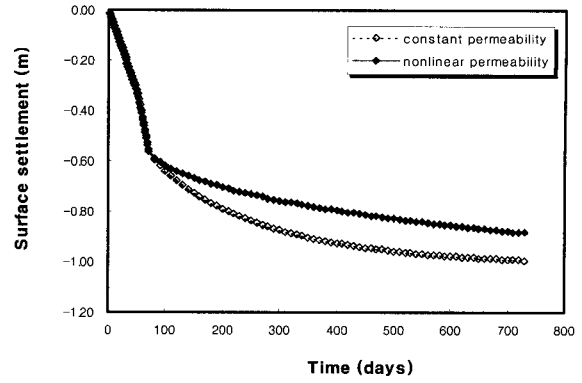


(d) 제방 중심아래 지점의 응력경로

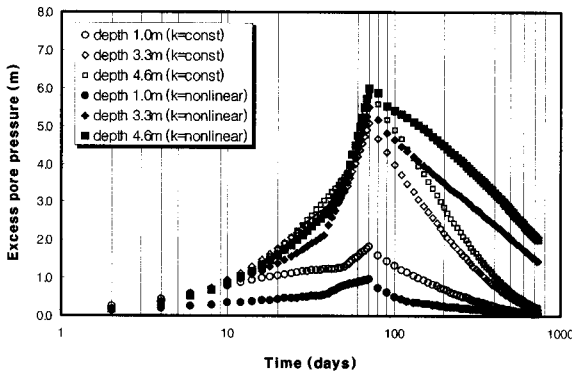
그림 18. 평균 투수계수의 영향성(성토고=4m, K=10배, 투수계수 변화비=4)



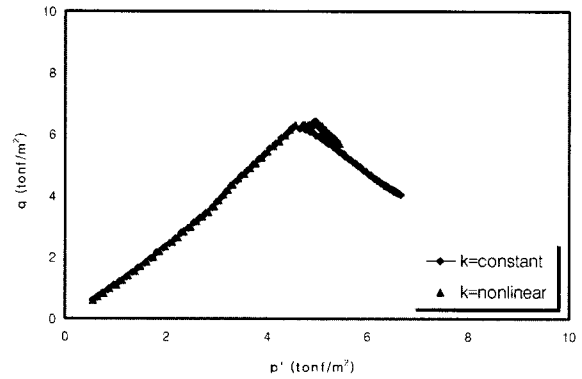
(a) 제방중심선에서 거리별 지표침하



(b) 제방중심 아래지점의 지표침하

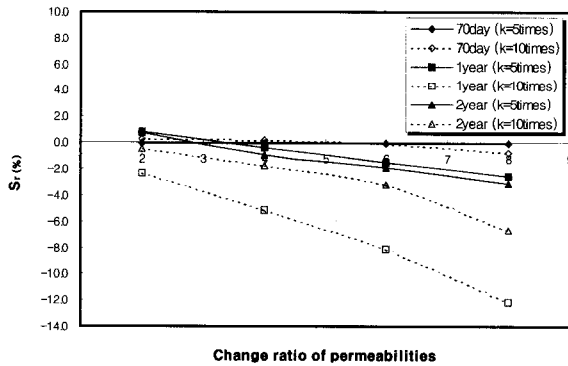


(c) 제방 중심선에서 심도별 과잉간극수압

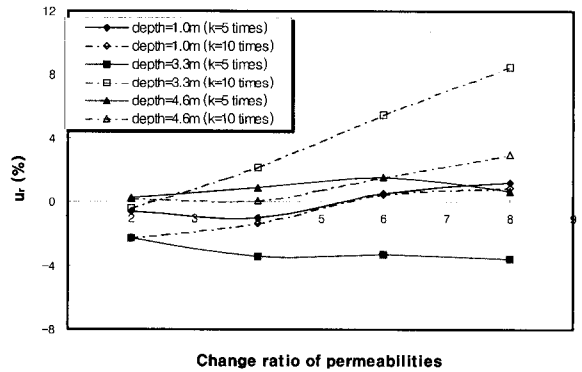


(d) 제방 중심아래 지점의 응력경로

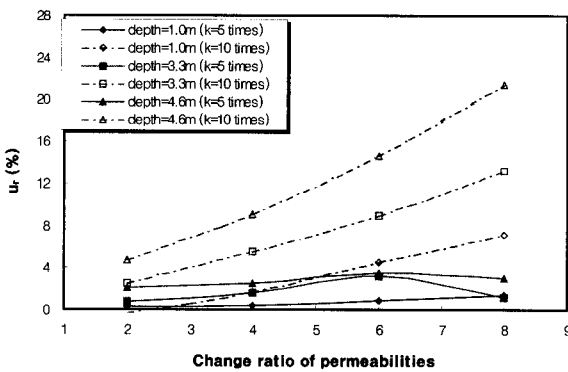
그림 19. 평균 투수계수의 영향성(성토고=4m, K=10배, 투수계수 변화비=8)



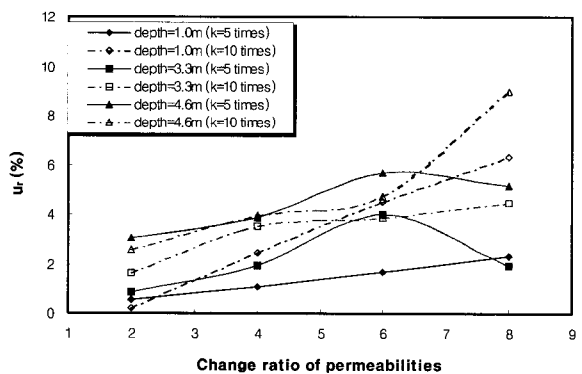
(a) 투수계수 변화비에 따른 침하비



(b) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(70일)



(c) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(1년후)



(d) 투수계수 변화비에 따른 과잉간극수압(2년후)

그림 20. 평균 투수계수의 영향성

먼저 그림 20(a)에서 지반의 평균 투수계수가 증가할수록 그림 18(b) 및 그림 19(b)와 같이 투수계수의 비선형성이 고려된 경우 지표면 침하량은 단일 투수계수를 적용했을 때 보다 작아진다. 침하량 격차를 가장 크게 보인 재하기간 1년시 $S_k=8$ 이고 원지반의 투수계수보다 10배 증가된 경우가 원지반의 투수계수를 적용시킨 경우보다 약 12%정도 침하량이 더 적게 산출되었다. 즉, 지반 투수계수의 비선형성이 크고, 평균 투수계수가 증가할수록 지표 침하량에 있어 영향을 더 크게 미친다고 판단할 수 있다.

그림 20(b), (c), (d)는 시간 경과별 과잉간극수압의 변화를 보여준다. 지표 침하량과 마찬가지로 투수계수가 증가할수록 과잉간극수압의 소산속도가 빨라지므로, 원지반의 비선형 투수계수에 의한 과잉간극수압의 차이보다는 투수계수가 증가되었을 때 비선형 투수계수에 의한 과잉간극수압의 차이가 재하시간이 1년 경과시 가장 크게 발생하였다. 즉, $S_k=8$ 이고 원지반의 투수계수보다 10배 증가된 경우가 원지반의 투수계수를 적용시킨 경우보다 약 20%정도 과잉간극수압이 증가되었다.

따라서, 지표침하 및 기초지반의 과잉간극수압은 재하 초기에는 비선형 투수계수의 영향을 보다 적게 받지만, 재하시간이 일정 시점에 도달할 때 가장 크게 받은 이후 최종 압밀시점에서 그 차이가 없게 된다. 이 때 침하속도 및 과잉간극수압의 소산속도와 관련된 최종 압밀시점은 투수계수의 비선형성이 클수록 길어지게 된다.

6. 결론

본 논문은 연립이론을 이용한 FEM 수치해석 프로그램을 개발하여 지반 비선형 투수성의 영향을 살펴보고, 말레이시아 Muar 지역의 연약지반상 건설된 성토 현장의 계측자료로부터 일반 비배수 해석 및 단일 투수계수를 사용한 압밀해석의 유효성을 비교·검토하였다.

(1) 말레이시아 Muar 지역의 시험성토 구간의 계측자료와 분석자료를 수치해석상 비배수 및 압밀해석으로 각각 실시한 결과, 본 연구에서 수행한 압밀해석이 1992년 Indrarata 등이 Crisp 프로그램으로 분석한 제방 거동 해석결과들과 매우 유사한 결과를 보였다. 즉, 성토 재하시 제방의 거동을 보다 정확한 해석을 위해서는 제방성토 단계시 진행되는 지반의 배수효과를 고려할 수 있는 압밀분석이 가장 정확

한 결과를 도출하고 있음을 재확인하였다.

(2) 지반 비선형 투수계수의 영향성을 지표침하 및 기초지반의 과잉간극수압에 대하여 분석한 결과 비선형 투수계수의 영향으로 초기 재하시 침하량은 투수계수를 단일 값으로 사용한 결과보다 더 크게 산출되지만, 시간이 경과함에 따라 침하량은 더 작게 산출된다. 하지만, 투수계수의 비선형성이 작은 지반, 즉 S_k 가 4~5이하의 경우 단일 투수계수 적용시의 침하량 차이가 5% 이하로 산출되었다.

이것은 하중증가에 따른 간극비 변화가 작은 지반에서는 지반 투수계수의 변화가 지반 침하속도에 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 재하 하중의 증가에 따른 간극비 변화가 크게 변화되지 않는다.

따라서, S_k 가 4~5이하인 일반점토에서는 선형압밀 영역에서 산정한 단일 지반 투수계수를 사용하여도 지반의 압밀특성 및 거동 분석에 합리적으로 이용될 수 있음을 시사한다. 하지만, S_k 가 5이상 되고, 간극비 변화가 비교적 큰 점토의 경우 비선형 투수계수의 영향으로 침하량 차이가 5% 이상, 과잉간극수압이 약 16% 이상 과대 및 과소 평가될 수 있으므로 지반 투수계수의 비선형성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

(3) 기초지반의 평균 투수성에 대한 영향을 살펴본 결과 지표 침하량 및 지반의 과잉간극수압은 원지반의 평균 투수계수가 커질수록 투수계수의 비선형성이 영향을 더 크게 미치게 된다. 따라서, 침하속도 및 과잉간극수압의 소산속도와 관련된 최종 압밀시점은 투수계수의 비선형성이 클수록 길어지게 된다.

추후 연구과제로 다양한 현장의 비선형 투수성을 파악하고 그 결과들을 계측자료와 비교 및 평가함이 더 필요하리라 판단된다.

참고 문헌

1. 김태훈 (2003), 연약점토지반상 제방 성토의 안정성 분석, 서울시립대학교, 박사학위 논문.
2. 이송, 김태훈 (2003), "저소성 점토의 수정 Cam-clay 모델 적용성에 관한 연구", 한국지반공학회, 제19권, 제4호, pp.247-256.
3. 전제성 (2000), 연약지반의 압밀특성 예측을 위한 비선형 압밀 해석, 서울시립대학교, 박사학위 논문.
4. Booker, J. R. (1973), "A Numerical Method of Solution of Biot's Consolidation", *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 26, pp.445-470.
5. Britto, A. M., and Gunn, M. J. (1987), *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*, Ellis Horwood Limited.

6. Christian, J. T., and Watt, J. B. (1972), "Undrained Visco-elastic Analysis of Soil Deformation, Application of the FEM in Geotechnical Engineering", *Proc. Ysmp., Vickburk, Mississippi*, May, 2. pp.533-574.
7. Indraratna et al. (1992), "Performance of Test Embankment Constructed to Failure on Soft Marine Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.118, No.1, pp.12-33.
8. Loaganathan, N., and Balasubramaniam, Bergado, D. T. (1993), "Deformation Analysis of Embankment", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.1, pp.1185-1206.
9. Mahinda, S., Yang, and H. H, Vincent, P. D. (1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", *J. of the Geotech. Eng. Div., ASCE, GT6*, pp.835-850.
10. Mesri, G., and Choi, Y. K. (1985), "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Divinsion*, Vol.111, No.4, April, pp.441-464.
11. Lee, S., Jeon, S. J., and Kim, T. H. (2003), "The Applicability of Modified Cam-clay Model for Low Plastic Clays under Anisotropic Loading Conditions", *KJCE*, Vol.7, No.4, pp.371-379.
12. Tavenas, F., Blanchet, R., Garneau, R., and Leroueil, S. (1978), "The Stability of Stage-constructed Embankments on Soft Clays", *Can., Geotech., J.*, No.15, pp.283-305.
13. Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.
14. Watso, G. H., Grooks, J. H. A., and Yam, C. C. (1984), "Performance of preloaded and stage-loaded structures on soft soils in Trinland", *Geotech.*, Vol.34, No.2, pp.449-489.

(접수일자 2004. 3. 5, 심사완료일 2004. 7. 23)