

未固結 堆積物의 地質工學的 特性에 대한 數值解析의 研究

趙 台 鎮

釜山水產大學校 應用地質學科

Numerical Analysis for the Geological Engineering Characteristics of Unconsolidated Sediment

Tae-Chin CHO

*Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea*

Finite element model capable of solving coupled deformation-fluid diffusion equations for the fully saturated porous medium was developed using Galerkin's residual method. This model was used to study the mechanical and hydraulic behaviors of unconsolidated sediment near South Harbor, Pusan. The vertical displacement of top surface clay sediment, when subjected to the external load, is significantly affected by the excessive pore pressure buildup and its decay due to the pore fluid diffusion. The sand deposit overlain by the much less permeable clay layer serves as a flow channel. Consequently, the fluid diffusion due to pore pressure difference is significantly facilitated, which also affects the diffusion-dependent sediment deformation.

서 론

해안 인근해역의 개발에 따라 미고결 퇴적물의 역학적, 수리학적 특성에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 해양 퇴적물에 대한 현장실험에는 기술적, 시간적 문제점의 극복에 한계가 있으며, 실험실 분석의 경우에도 시료채취 및 운반에 따른 시료의 교란에 의해 정확한 실험분석이 수행되지 못하고 있다(Richards, 1984). 세립질 퇴적물의 경우, 매우낮은 투수성에 의해 퇴적물의 역학적 특성과 수리학적 특성이 상호 연관되어 매우 복잡한 거동양상을 보여준다. Terzaghi(1925)에 의해 제안된 미고결 물질의 유효응력(effective stress)에 대한 법칙은 Biot(1941)에 의해 Consolidation Theory로 발달하였다. Biot에 의해 개발된 포화공극물질의 역학적, 수리학적 상호특성에 대한 관계식은 매우 간단한 일차원 경계조건에서만 이론적 분석해를 구할 수 있어 실제 복잡한 경계조건에서

는 수치해석적 분석이 주로 시도되고 있다. Ghaboussi and Wilson(1973)이 변형된 Biot의 관계식을 이용하여 유한요소법(Finite Element Method)에 의거한 수치해석 모델을 개발하였으며, 이때 사용된 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}\epsilon_{kl} + \alpha\delta_{ij}P \tag{1}$$

$$\xi = -\alpha\delta_{ij}\epsilon_{ij} + \frac{1}{M}P \tag{2}$$

여기서

- σ_{ij} =stress tensor
- ϵ_{ij} =strain tensor
- P =fluid pressure
- μ, λ =Lame's constants
- ξ =volumetric fluid strain
- α =Biot's coupling constant
- M =Biot's coupling constant
- δ_{ij} =Kronecker's delta

이때 ξ 의 시간적 변화는 투수율과 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{k}{\eta} \frac{\partial^2 P}{\partial i^2} \quad (3)$$

여기서

- k=투수계수(permeability)
- η =유체의 점성도(viscosity)
- i=공간상의 좌표축

Ghaboussi and Wilson(1973)의 관계식 1과 2에 사용된 α 와 M은 미고결물질의 역학적, 수리학적 상호관계를 나타내는 중요한 물성계수이나 현재까지 계수추정에 대한 완전한 실험분석방법이 제시되지 않고 있다. 이에 대하여 Rice and Cleary(1976)는 새로운 물성특성을 이용하고 변형(strain)이 응력(stress)의 종속함수로 표기되는 관계식을 다음과 같이 제기하였다.

$$2G\epsilon_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu)(1+\nu_u)} P \delta_{ij} \quad (4)$$

$$m - m_0 = \frac{3\rho_0(\nu_u - \nu)}{2GB(1+\nu)(1+\nu_u)} \left(\sigma_{kk} + \frac{3}{B} P \right) \quad (5)$$

여기서

- G: shear modulus
- ν : drained Poisson's ratio
- ν_u : undrained Poisson's ratio
- B: Skempton's coefficient
- ρ : fluid density
- ρ_0 : fluid density at a reference state
- m: fluid mass
- m_0 : fluid mass at a reference state

Roeloffs et al.(1986)은 동일경계조건하에서 관계식 1~2와 관계식 4~5에 대한 field equations을 비교하여 다음과 같은 물성계수간의 관계식을 유도하였다.

$$\alpha = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu_u)(1-2\nu)}$$

$$M = \frac{2GB^2(1+\nu_u)^2(1-2\nu)}{9(\nu_u - \nu)(1-2\nu_u)} \quad (7)$$

관계식 6과 7에 의해 포화물질의 상호관계적 물성특성을 비교적 용이하게 측정되는 계수를 이용하여 산정할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 완전포화된 물질의 역학적, 수리학적 상호특성을 분석할 수 있는 유한요소모형을 개발하였다. 모델대상지역으로 부산 남항 인근해역을 선정하여 세립질 퇴적물의 거동양상에 대한 분석을 시도하였다. 모델링에 필요한 퇴적물특성들은 부산직할시(1990)에서 분석 측정된 자료들과, 문헌조사에 의해 수집된 일반적인 기존자료들을 병용하였다.

수치해석모델

하중재하에 의한 포화물질의 역학적, 수리학적 거동양상을 분석할 수 있는 수치해석모델을 Ghaboussi and Wilson(1973)에 의해 제기된 관계식 1~3과 물성계수관계식 6~7을 이용하여 유한요소법(finite element method)을 사용하여 개발하였다. 모델구성(finite element formulation)에는 이전에 주로 사용되던 Gurtin(1964)의 Variational method 대신에 Galerkin's residual method를 도입하여 모델개발의 용이성을 추구하였다. 하중재하에 의한 포화물질의 변형 및 과잉공극수압의 시간적 변화 산출에는 Backward Difference Method를 이용하여 Quasi-static상태에서 분석할 수 있게 다음과 같은 최종 관계식 형태의 유한요소모형을 개발하였다.

$$Kd^{t+\Delta t} + Cp^{t+\Delta t} = F^{t+\Delta t} \quad (8)$$

$$C^T d^{t+\Delta t} - [E + \frac{\Delta t}{2} H] p^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t} \quad (9)$$

여기서

$$R^{t+\Delta t} = -\frac{\Delta t}{2} (q^{t+\Delta t} + q^t) + Cd^t + [\frac{\Delta t}{2} H - E] p^t \quad (10)$$

관계식 8~10에 사용된 K는 포화물질의 stiffness에, C와 E는 각각 α 와 M에, H는 투수계수와 연관되어 있으며, q는 공극수의 유출량을 지시한다.

이상과 같이 개발된 수치해석모델을 이용하여 부산 남항인근해역(그림 1 참조)에 분포하는 퇴적물의 거동양상을 분석하였다. 본 지역에 대한 지반조사 및 물성특성에 대한 기초조사 자료는 부산직할시(1990)에서 분석된 자료를 인용하였다. 본 지역에서의 퇴적층의 양상은 상부에 세립점토층, 하부에 조립모래층, 최하부에 자갈층으로 형성되어 있다. 퇴적층의 두께는 지역적으로 변화하는 양상을 보여주나 심해쪽으로 두꺼운 점토층이 퇴적되어 있다. 본 모델에서는 그림 1의 중심지역(A지역)에서 시추하여 측정된 점토층과 모래층의 퇴적두께(점토층 13m, 모래층 4m)를 기본층서자료로 이용하였다. 최상부 점토에 대하여 측정된 선형압밀압력은 각 지점에서 최대수심에 의한 수압과 거의 동일하여 점토층의 역학적 특성은 정규압밀 상태로 규정하였다.

완전포화된 세립물질의 시간적 압밀변화율(Time Rate of Consolidation)은 일반적으로 압밀계수(Coefficient of Consolidation, C_v)를 측정하여 산정하나, 압밀계수(C_v)는 포화물질의 탄성계수 및 투수계수를 이용하여 다음과 같은 관계식으로 유도되어 진다(Rice and Cleary, 1976).

$$C_v = k \left[\frac{2G(1-\nu)}{(1-2\nu)} \right] \left[\frac{B^2(1+\nu_u)^2(1-2\nu)}{9(1-\nu_u)(\nu-\nu_u)} \right] \quad (11)$$

부산직할시(1990)에서 측정된 압밀계수는 $C_v = 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이며, 세립점토질의 투수계수 및 탄성계수는 일반적으로 제한된 범위내에서 유동적인 특성치를 나타내고 있다(Das, 1973). 측정된 압밀계수를 기준으로 수치해석 모델링에 필요한 세립물질의 특성계수들을 다음과 같은 방법으로 산정하였다. 먼저, 일차원적 경계조건에서 시간변화에 따른 압밀을 $C_v = 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 이용하여 이론적으로 산출하였다. Das(1973)에 의해 제시된 세립물질의 탄성계수들을 이용하여 관계식 11에 의거하여 투수계수(k)를 산출하였으며 관계식 6과 7에 의거하여 α 와 M을 각각 산출하였다. 이와같이 산출된 계수들을 이용하여 동일한 일차원적 경계조건에서 수치해석모델에 의한 압밀의 시간 변화를 산출하여 이론적 분석결과와 비교검토했다. 수치해석모델에 의한 압밀의 시간적 변화가 이론적 분석결과와 근사치를 이룰때까지 세립물질의 특성계수들을 도표 1에 수록하였다. 수치해석모델에 이용된 하부조립물질의 특성계수들을 도표 1에 함께 수록하였다.

그림 1에 도시된 부산남항 인근 해상지역에는

Table 1. Mechanical and Hydraulic Properties Used in Modeling for the Unconsolidated Sediment

	Clay	Sand
E	10(MPa)	50(MPa)
ν	0.35	0.30
ν_u	0.45	0.35
k	$0.94325 \times 10^{-15} (\text{m}/\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1.0 \times 10^{-12} (\text{m}/\text{Pa} \cdot \text{s})$
B	0.72	0.60
α	0.95785	0.46296
M	26.912(MPa)	74.772(MPa)

대규모의 인공구조물건설이 예상되고 있다. 인공구조물의 거대한 수평적 규모와 세립질 점토층 및 하부의 조립질 모래층의 상대적으로 미세한 수직적 퇴적두께를 고려할때 인공구조물설치 예정지역 전체에 대한 퇴적물 거동양상의 3차원모델 분석에는 컴퓨터 용량의 한계 및 수치해석 방법상의 문제점이 예상된다. 이러한 점을 고려하여 모델링 대상지역을 인공구조물건설에 의한 예상하중재하지역의 중앙부분과 측면부분으로 구분하여 2차원 모델분석을 시도하였다. 인공구조물은 해수면위 3m의 높이로, 해수면의 평균수심은 30m로 가정하여 전체 구조물 두께 33m에 대한 하부퇴적층의 예상

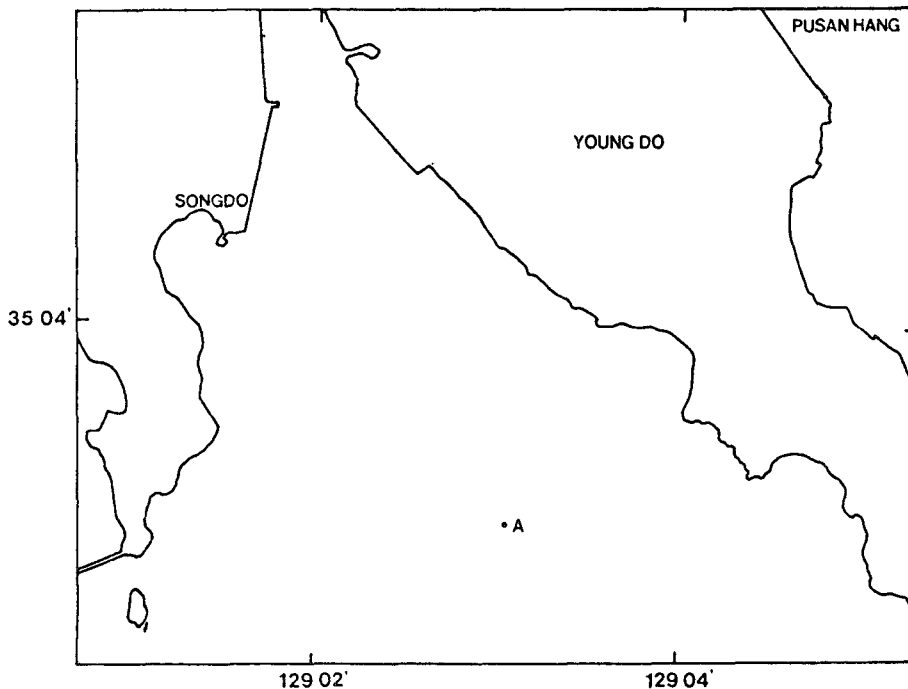


Fig. 1. Study Area Map.

하중을 매립암석의 평균비중($G=2.65$)에 의거하여 산출하고, 하중증가에 따른 세립질 점토층의 거동 양상을 분석하였다. 인공구조물의 중앙부분과 측면 부분의 분석에 사용된 유한요소법적 Mesh들을 그림 2와 그림 3에 각각 도시하였다. 각 부분에 대한 모델분석에는 수직압밀에 직접적인 영향을 끼치는 최상부의 세립질점토층과 하부의 모래층을 포함하였다. 최하부의 자갈층은 자갈, 모래 및 점토물질이 혼합되어 매우 치밀한 상대밀도를 나타내고 있어 (부산직할시, 1990) 상대적으로 극소한 압밀이 예상되어 모델분석에서 제외하였다.

결과 및 고찰

인공구조물에 의한 하중재하지역 중앙부분에서 (그림 2 참조) 수직하중에 의한 퇴적층의 수직변형을 깊이가 다른 3지점에서 산출하여 그림 4a와 4b에 도시하였다. 하중재하 초기에 각 지점에서의 수직침하하는 세립질 또는 조립물질의 역학적 탄성 작용에 기인하며, 시간경과에 따른 수직침하 변화는 내부 과잉공극수압의 감소에 따른 유효하중의 증가에 기인한다. 표층($Z=0m$)의 경우 하중재하에

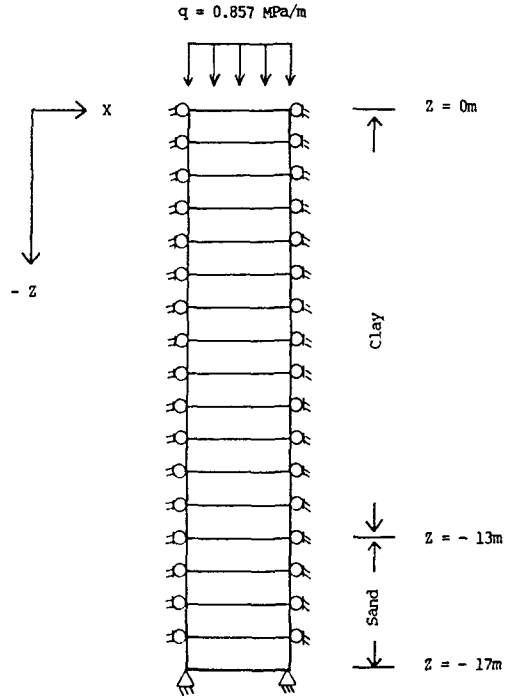


Fig. 2. Finite Element Mesh for Modeling Central Portion.

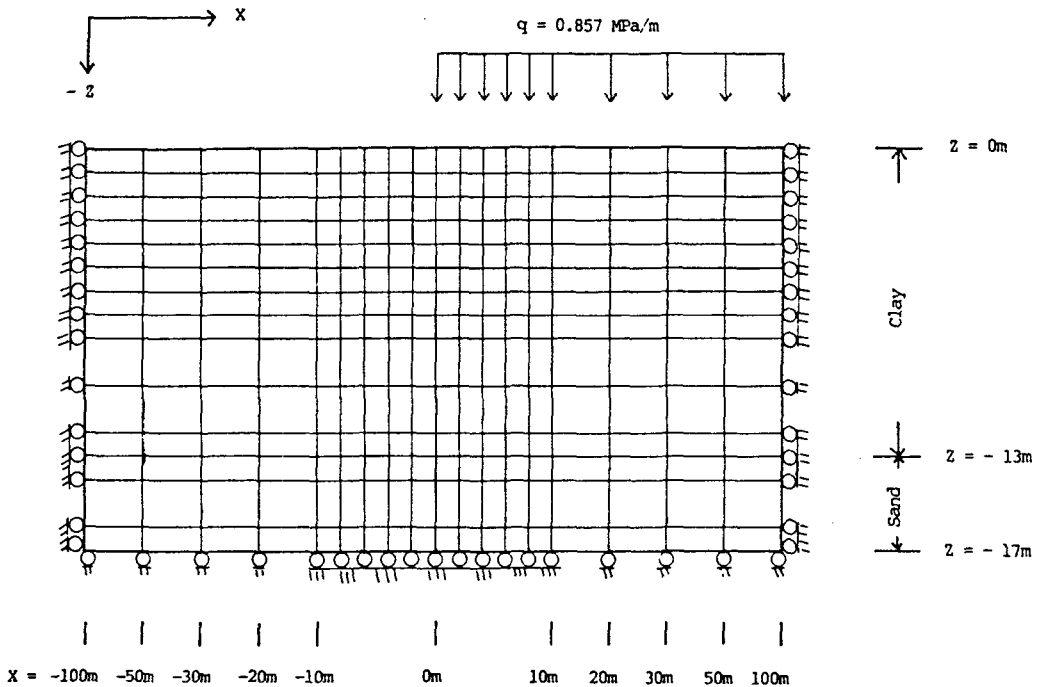


Fig. 3. Finite Element Mesh for Modeling Flank Portion(Not to Scale).

의해 형성된 과잉공극수압이 자유해수면으로 비교적 용이하게 발산되어 수직침하량이 하중재하 초기시점부터 점진적으로 증가한다. 깊이 5m에서의 세립점토질의 경우 낮은 투수계수에 의해 공극수의 유동이 장시간에 걸쳐 점진적으로 발생하며, 이에 따른 공극수압의 감소도 매우 완만하여 수직침하가 증가되는 시점도 표층에 비해 매우 늦다. 하부의 조립모래층의 경우에는 높은 탄성계수(도표 1 참조)에 의해 전체적인 변형이 세립점토층에 비해 매우 작다(그림 4b 참조). 한편, 상대적으로 높은 투수계수에 의해 시간적 수직변형의 증가가 점토층에 비해 빠른시간내에 진행될 것으로 기대되나, 조립모래층내 공극수의 확산이 상부 세립점토층에 의해 방해받아 수직변형이 더욱 느리게 진행되고 있다. 이와같은 현상은 과잉 공극수압의 시간적변화(그림 5)를 살펴보면 명확히 설명되어진다. 하중재하에 의해 점토층 5m 깊이에서 발생된

과잉공극수압은 공극수의 확산에 따라 $t=10^8$ sec. 이후부터 점진적으로 감소한다. 하부모래층 $Z=-13$ m 지점(점토층과 모래층의 경계부분)에서는 초기의 공극수 확산에 의해 과잉공극수압이 일단 감소하는 현상을 보이나 $t=10^6$ sec. 이후에 상부점토층에서의 공극수압차이에 의한 공극수 유입에 의해 공극수압이 증가하며, 이에따라 그림 4b에 보이는 것처럼 수직침하가 미세하게 반동하고 있다. 이러한 현상은 $t=10^8$ sec. 이후 상부 점토층으로부터 공극수압이 감소할때까지 계속된다. 결과적으로, 조립모래층의 높은 투수계수도 공극수의 확산에 절대적인 영향을 미치지 못하며 상부 세립점토층의 공극수압감소에 크게 영향을 받는다.

표층점토층의 수직침하량은 인공구조물설치에 의한 지반침하 및 구조물의 안전도와 직접적으로 연관되어 있으며, 하중재하초기의 침하보다는 그림 4a에 나타난 바와 같이 $t=10^7$ sec. 이후의 점진적인

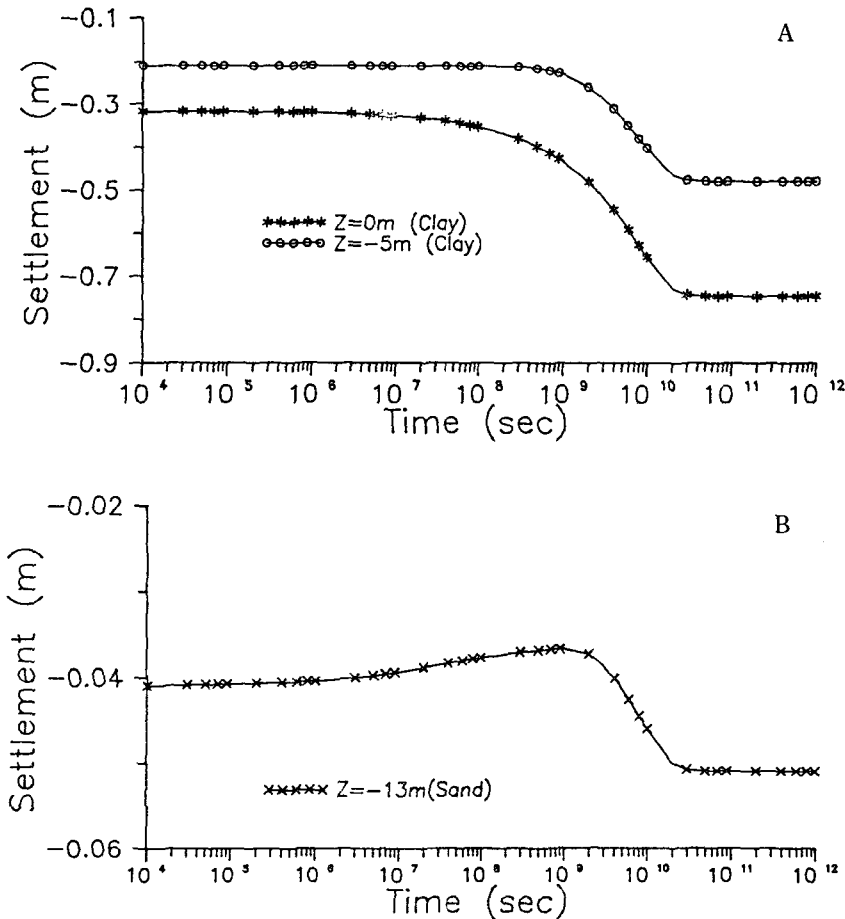


Fig. 4. Vertical Displacements at Three Different Depths.

수직침하 증가에 크게 영향을 받을것으로 사료된다. 하중재하에 의한 침하속도를 고찰하기 위하여 표층에서의 연차적인 침하율을 산출하여 그림 6에 도시하였다. 연간침하량 변화는 그림 6에 보이는 바와 같이 시간의 경과에 따라 초기의 높은 침하

율이 1년후에 약 1cm/yr, 10년후에는 약 0.3cm/yr 정도로 감소하며, 이후에 발생되는 대부분의 침하량이 극히 낮은 속도로 진행된다.

인공구조물의 측면부분에 대한 수치해석모델의 경계조건은 그림 3에 도시된 바와 같이 하중이 직

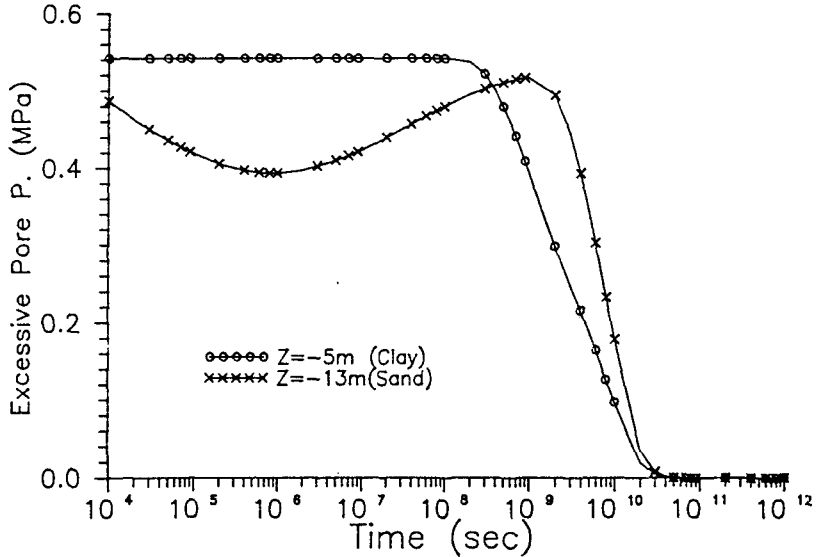


Fig. 5. Excessive Pore Pressure Variations in Clay and Sand Layers at the Central Portion.

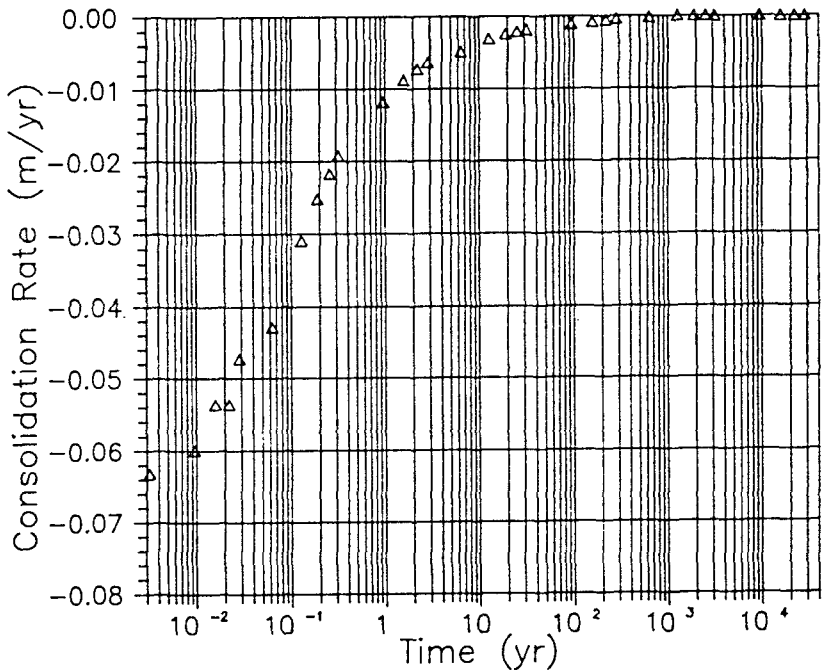


Fig. 6. Annual Consolidation Rate at the Central Portion.

접 재하되는 부분($X \geq 0m$)과 자유변형부분($X < 0m$)으로 분리되어 있다. 하중재하 경계지역에서 표층의 시간적 수직침하변화를 그림 7에 도시하였다. 표층 3지점에서의 수직침하는 절대침하량의 차이는 있으나 중앙부분에서의 침하율변화, 즉 초기의 탄성변형과 이후의 공극수압소멸에 의한 침하량변화와 동일한 양상을 나타낸다. 특이할 점은 직접하중을 받지않는 $X = -2m$ 지점에서 표층이 융기되어 있으며 이러한 융기상태가 $t = 10^8 \text{sec}$ 이후 과잉공극수압이 소멸되기전까지 지속된다. 표층의 융기정도는 하중경계지역에서 멀어질수록 증가하며(그림 8) $X = -10m$ 부근에서 최대 표층융기를 나타내고 있다. 표층융기에는 하중에 대한 포아송효과가 직

접적인 원인으로 작용하나, 완전포화상태에서 형성된 과잉공극수압도 상당한 영향을 미치고 있다. $t = 10^8 \text{sec}$ 시점에서의 과잉공극수압 분포(그림 9a)는 하중재하 지역에서 매우 높은 공극수압이 형성되어 있으며 자유변형지역과 하부퇴적층으로 갈수록 감소한다. 공극수압의 분포를 표층융기에 대한 원인적 영향에 대비하여 보면, 하중경계지역의 표층부근에서는 과잉공극수압의 효과가 우세하며 하중경계지역에서 멀어질수록 포아송효과가 표층융기에 지배적인 영향을 미친다. 이러한 2가지 효과의 지역적 영향은 점토층의 과잉공극수압이 소멸되는 $t = 10^{10} \text{sec}$ 시점에서의 공극수압분포(그림 9e)와 표층의 수직변형을 비교하면 더욱 확실하게 나타

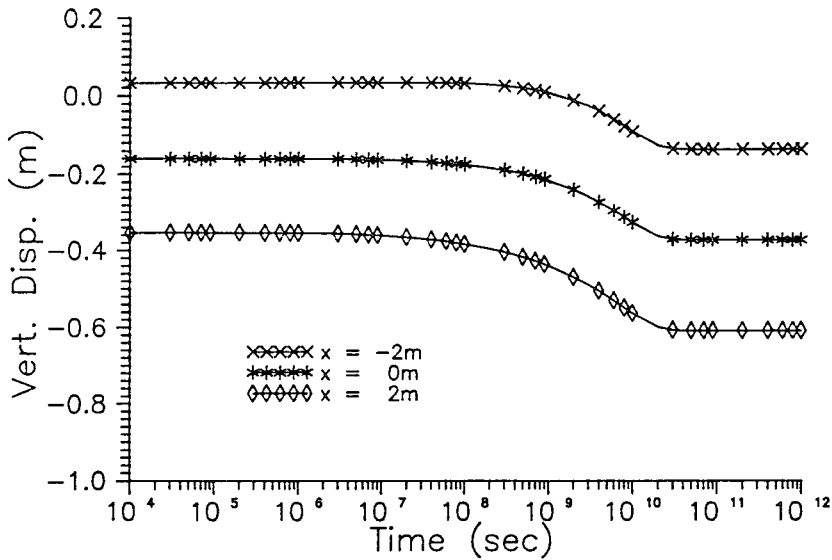


Fig. 7. Vertical Displacements at Three Different Locations on the Top Surface.

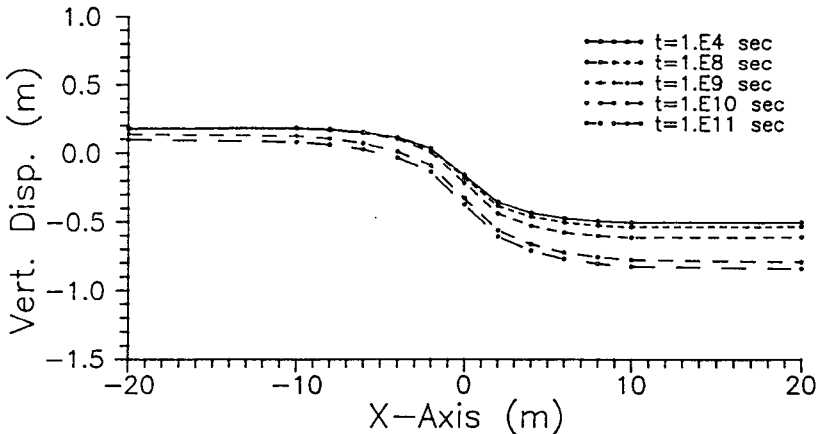
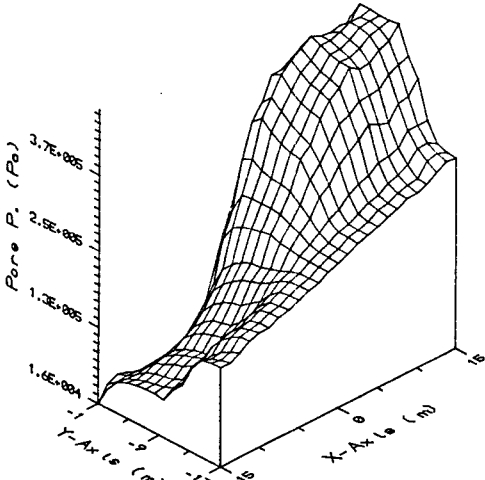


Fig. 8. Time-Dependent Surface Level Changes.

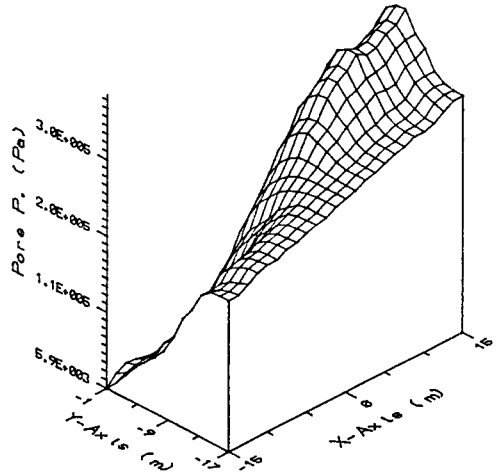
난다. 그림 9e에 나타난 표층지역에서의 공극수압은 $t=10^8$ sec. 시점에서와 비교할때 매우 감소되어 있으며, 표층용기에 대한 과잉공극수압의 영향은 무시될 정도로 미세하다. 같은 시점 $t=10^8$ sec.에서의 표층변형상태를 그림 8에서 살펴보면 $X \leq -5$ m에서는 과잉공극수압이 소멸된 후에도 표층이 상승되어 있다. 한편 $-5m < X \leq -2m$ 지점의 표층에서는 과잉공극수압의 소멸정도에 따라 초기의 표층용기가 점진적으로 감소하여 최종적으로 표층의 하강을 나타낸다. 즉, 하중경계지역 부근에서는 과잉공극수압에 의한 일시적인 표층의 용기가 나타나며, 하중경계에서 멀어질수록 포아송효과에 의한 영구적인 표층의 용기 상태가 지속된다.

하중재하에 의한 과잉공극수압의 발생과 시간적으로 점진적인 소멸은 상기한 바와 같이 포화상태의 퇴적물 거동에 직접적인 영향을 끼친다. 과잉공

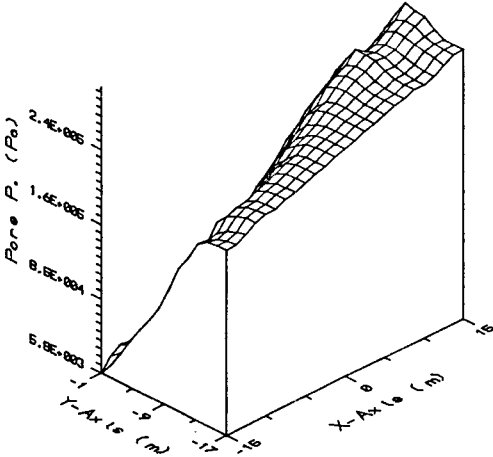
극수압은 내부공극수가 공극수압의 차이에 의해 확산됨에 따라 소멸된다. 그림 9a에 도시된 하중재하지역 상부의 높은 초기 공극수압은 공극수가 표층의 자유대수면, 자유변형지역 및 하부의 모래층으로 확산됨에 따라 공극수압이 감소할 것으로 추측될 수 있다. $t=10^8$ sec. 시점에서의 과잉공극수압 분포(그림 9b)는 $t=10^8$ sec. 시점에 비해 전반적으로 공극수압의 감소를 나타내나 하부 모래층의 경우에는 공극수압이 증가되어 있다. 이는 모래층과 인접된 점토층의 높은 공극수압에 의해 점토층의 공극수가 모래층으로 유입됨에 기인한다. 모래층내에서는 높은 투수계수에 의해 빠른속도로 공극수가 확산되어 전체 모래층에서의 공극수압이 점토층에 비해 균등하게 분포되어 있다. 이와 같은 현상은 모래층과 점토층에서의 공극수압변화를 고찰하여 확인할 수 있다. 그림 10에 점토층 1개 지점



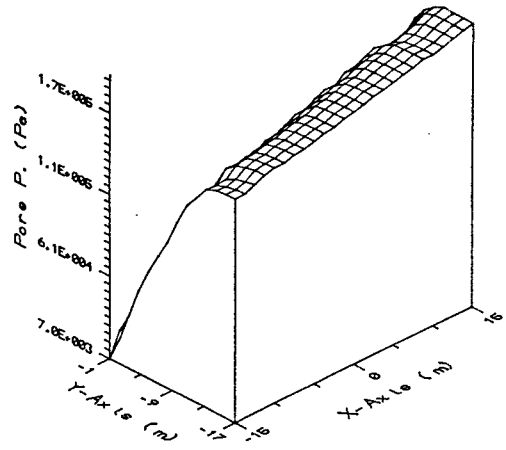
a. $t=1.0 \times 10^8$ seconds



b. $t=1.0 \times 10^9$ seconds



c. $t=2.0 \times 10^9$ seconds



d. $t=5.0 \times 10^9$ seconds

(A지점), 모래층 2개 지점(B, C지점)에서의 공극수압변화를 도시하였다. 점토층 A지점에서의 공극수압은 $t=10^8$ sec. 이전까지 모래층에서보다 높게 나타나며, 이 시점까지의 모래층 공극수압의 증가는 점토층 공극수의 유입에 기인된다. 모래층내에서는 그림 10에 나타난 바와 같이 B와 C지점의 수평적 거리에 따른 공극수압의 차이가 매우 적으며, 이는 전술한 바와 같이 공극수의 활발한 확산작용에 기인한다. 모래층에서의 과잉공극수압은 $t=2. \times 10^8$ sec.까지 계속증가되며(그림 9c 참조) 이후 $t=5. \times 10^8$ sec. 시점에 전체적인 공극수압의 감소(그림 9d 참조)를 나타내나, 이 경우에 모래층의 공극수압이 상부점토층의 공극수압보다 크게 나타난다. 이러한 공극수압의 역전현상은 점토층의 낮은 투수계수 및 모래층과의 작은 공극수압차이(그림 10 참조)에 기인한 미세한 공극수확산에 의해 $t=10^{10}$ sec. 시점에 공극수압이 소멸될때까지 계속된다.

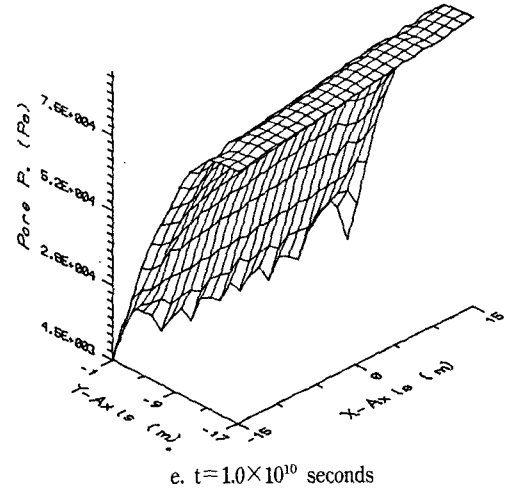


Fig. 9. Excessive Pore Pressure Distributions at Different Time Stages.

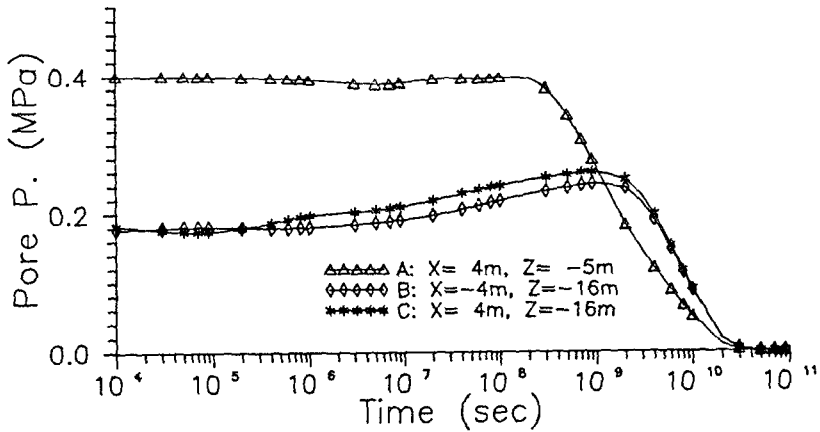


Fig. 10. Excessive Pore Pressure Variations in Clay and Sand Layers at the Flank Portion.

요 약

포화상태인 물질의 역학적, 수리학적 거동을 연구할 수 있는 유한요소법적 수치해석모델을 개발하여 부산남항 인근해역의 미고결 퇴적물의 거동을 분석하였다. 하중재하에 의한 상부세립 퇴적물의 역학적 변형은 공극수의 확산에 따른 공극수압의 수리학적 변화에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 하중이 일정지역에 편재되어 있을 경우 포아송효과 및 과잉공극수압의 영향에 의해 하중을 직접받지 않는 표층부분이 융기되며, 하중경계지역에서 멀어질수록 접근적으로 증가한다. 세립점토층에 비해 높은 투수성을 갖는 하부모래층은 공극수

확산의 통로역할을 하여 과잉공극수압의 소멸을 촉진시키며, 결과적으로 상부점토층 변형의 시간적 변화에도 영향을 끼친다.

사 사

본 연구에 깊은 관심과 도움을 주신 부산수산대학교 수산해양대학 장선덕 학장님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 부산직할시. 1990. 해상신도시건설 기본계획연구용역 종합보고서.
- Biot, M. A. 1941. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *J. Appl. Phys.*, 12, pp. 155~165.
- Das, B. M. 1983. *Advanced Soil Mechanics*. McGraw-Hill, New York.
- Ghaboussi, J., Wilson, E. L. 1973. Flow of Compressible Fluid in Porous Elastic Media. *Int. J. Num. Method Engng*, 5, pp. 419~442.
- Gurtin, M. 1964. Variational Principles for Linear Electrodynamics. *Archs. Ration. Mech. Analysis*, 16, pp. 34~50.
- Rice, J. R., Cleary, M. P. 1976. Some Basic Stress Diffusion Solutions for Fluid-Saturated Elastic Porous Media with Compressible Constituents. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 14 (2), pp. 227~241.
- Richards, A. F. 1984. Modelling and the Consolidation of Marine Soils In *Seabed Mechanics*. Ed. by B. Denness. Graham & Trotman Limited, pp. 3~8.
- Roeloffs, E. A., Cho, T. and Haimson, B. C. 1986. Stress and Pore Pressure Changes due to Annual Water Level Cycles in Seismic Reservoirs. Final Report, U.S.G.S. Contract No. 14-08-00 01-22022.
- Terzaghi, K. 1925. *Principles of Soil Mechanics*. Eng. News Record.

1990년 6월 25일 접수

1990년 7월 20일 수리