

준설매립토의 침강/압밀과 천단강도 특성 및 예측



유 남 재
강원대학교 토목공학과 교수

1. 서론

협소한 국토면적을 지닌 국내 실정으로 해안매립에 의한 입해 단지개발이 실시되었고 국제적 무역 물동량의 급속한 증가와 육상운송수단의 지연과 관련하여 새로운 항만시설의 구축이 최근 심각하게 요구되고 있다. 또한 항로의 유지준설로 인한 준설토사의 투기를 위한 투기장의 필요성이 요구되고 있는 추세이다.

이와 같이 부지조성과 항만시설구축을 위한 성토와 관련한 매립사업의 수행시 소요되는 매립재는 적정의 흙을 육상 또는 해상에서 채취하여 포설·다짐하는 것이 일반적이나 제한된 양질의 매립재의 수급과 경제성을 고려하여 해상에서 펌프준설선을 사용하여 해상점토를 준설하여 매립하는 경향이 있다. 이러한 연약 해상점토를 사용하여 매립또는 투기할 때 매립장 또는 투기장의 설계가

요구되며 이와 관련하여 소요 준설 및 매립물량의 산정과 지반개량을 위한 소요 지지력 확보 여부 및 시기의 결정이 효율적인 설계 및 경제적인 시공관리상 매우 중요한 의미를 지닌다.

준설토를 매립지에 투기하였을 때 일반적으로 준설매립토의 퇴적과정은 응집/침강/압밀 세 단계로 구별할 수 있다. 초기 단계에서는 침강은 발생하지 않고 응집의 형성과정이며, 중간 단계는 응집물이 점차로 침강하여 퇴적물의 층을 형성하고, 함수비는 감소하여 압밀하에 놓이게 된다. 따라서 상부의 침강구역과 퇴적물 사이의 경계는 새로운 퇴적물이 형성된다. 퇴적물이 점진적으로 증가하면서 상부의 침강영역은 점점 좁아지게 되며 결국은 사라지게 된다. 최종 단계는 모든 퇴적물이 자중압밀하에 있게 되며 결국은 자중압밀이 완료된 평형상태에 도달하게 된다. 한편, 매립장 설계에서 중요한 사항은 준설지에서 채취한 흙

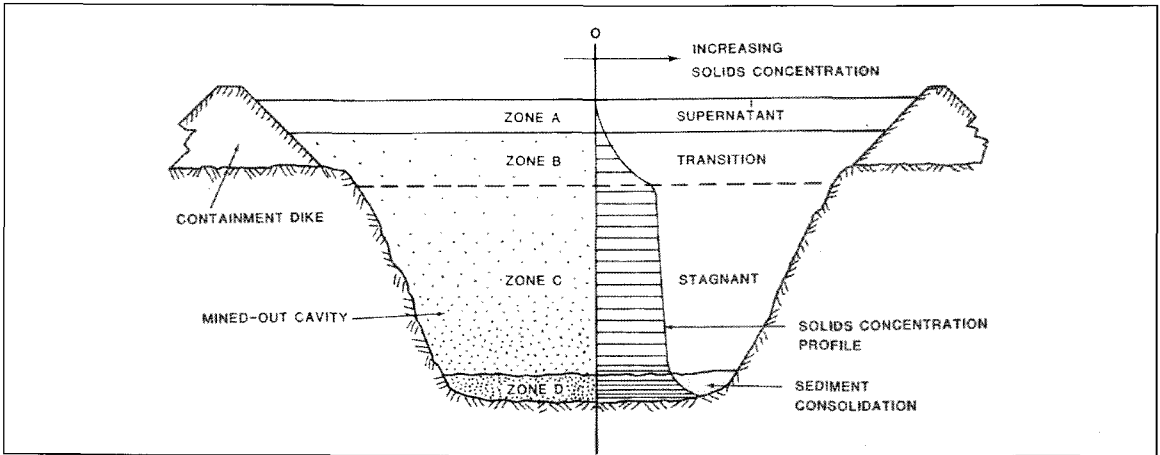


그림 1. 매립장 부유물의 밀도분포 단면도

을 매립지에 투기하였을 때 그의 체적변화를 고려한 제체의 높이와 투기장 면적의 결정이 요구되므로 투기시 준설토의 침강/압밀에 관련한 토질정수의 산정과 적합한 이론 적용이 필요하다. 또한 투기장 침강과 압밀과정을 거친 매립토의 안정화를 위한 지반개량공법의 실시가 요구되는바, 이와 관련하여 준설매립토의 진단거동에 대한 검토가 필요하다.

준설매립과정의 흙의 특성은 자연상태에서 오랜동안 지질학적 시간 경과동안 형성된 일반 흙과는 다르게 준설과정에서 심하게 교란되어 함수비가 매우 높은 거의 액체 상태에서 투기되므로 교란된 재성형 정규압밀토의 거동속성을 지닌다. 준설토의 투기시 800~1500%의 매우 높은 초기 함수비로 투기되어 수시간 또는 수일내에 침강이 완료된 후 장기간의 자중압밀상태를 겪게된다. 따라서 준설토의 침강/압밀에 대한 지반공학특성과 그의 거동을 모사하는 이론에 대한 고찰이 필요하다. 특히, 매립토의 압밀침하 거동 분석의 자중압을 위한 압밀이론 적용에 있어서 기존의 Terzaghi 압밀이론을 사용하여 시간 경과에 따른 침하량을 중압하기에는 준설매립토의 압밀거동 특성상 그 한계를 갖는다. Terzaghi 압밀이론의 선형적인 유효응력-간극비 관계와 압밀 중 압축계수 및 투수계수

일정 등의 기본가정들이 준설매립토의 실제 거동과는 상이하기 때문에 대변형압밀을 고려한 유한변형률 압밀이론을 사용하여야 한다.

2. 준설토의 지반공학특성

준설토 투기시 대표적인 토립자의 침강은 <그림 1>에 보인바와 같다. 토립자의 함유율이 무게비로 1~3%정도인 경우 상부 Zone A는 슬러리의 침강 및 압밀에 따라 배출된 상등수로 형성되며, 그 직하부 Zone B에서는 토립자의 농도가 깊이에 따라 증가하면서 일정한 밀도에 도달하는 Zone C 상부로 이 영역을 천이영역(transition zone)으로 불리며, 일정한 밀도를 갖기 시작하는 Zone C 침강속도가 그 상부영역에 비하여 급격히 감소하기 때문에 지연영역(stagnant zone)으로 불린다. Zone C와 Zone D 영역의 구분은 명확하지 않으나 Zone C의 하부에서는 대변형 압밀 이론을 사용하여 침하속도를 성공적으로 추정할 것으로 보고되었다(Young, 1984).

한편, A와 B Zone에서 토립자 침강속도를 결정하기 위하여 투기농도에 따른 많은 경험식들이 제시되었다. 이러한 많은 경험식들은 Stoke의 개별 침강속도와 슬러리의



농도가 증가할수록 침강속도가 감소하는 방해침강의 개념을 도입한 것이나 적정의 실험 상수를 구하기 위한 많은 실험이 요구되며 실투 및 점토와 같은 세립토의 토립자간 상호작용에 대하여 고려되지 않은 문제점이 있다. 현탁액내의 점토광물, 유체내의 이온농도, 흙의 입도분포, 유기물 함유량, pH등에 의하여 흙의 구조가 결정되며 그에 따라 침강속도가 결정될 뿐 아니라 침강후 압밀 진행 시점에서 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계에 큰 영향을 미치며 시간 경과에 따른 압밀 침하량에 영향을 미치게 된다. 이러한 현장조건의 침강/압밀 현상을 재현할 수 있는 방법으로 실내에서 Column을 사용한 침강/압밀 실험이 제시되어 슬러리상의 준설토의 침강/압밀 거동 특성을 규명할 수 있다.

준설패립토는 준설횘에서 준설풀기에 의하여 교란된 상태에서 준설횘의 원지반 흙을 채취, 운송하고 패립지에 투기하여 자중압밀과정을 거쳐서 압밀이 진행되기 때문에 자중압밀에 의한 함수비의 감소에 따라 비배수 전단강도의 증가가 예상된다. 따라서 준설횘전단강도의 비배수 전단강도는 정규압밀강도의 거동에 준하여 발휘된다.

흙의 전단강도는 일반적으로 Mohr의 파괴 포락선에 의하여 결정되며, 파괴포락선은 특정의 시험방법이나, 최대강도, 재생형강도 또는 잔류강도등의 정의에 따라 비뀔수 있다. Olson (1974)은 미결합 정규압밀토의 파괴 포락선은 원점을 지나며 비선형적이어서 그의 접선값은 원점이 아닌 소정의 전단응력값을 갖게 된다고 보고하였다. 이러한 비선형적 파괴포락선의 형상은 고소성의 점토에서 10 kN/m²이하의 매우 낮은 연직응력상태에서 현저하게 나타나고 있다. 한편 Skempton (1964)은 간극비 보다 흙의 구조가 중요한 역할을 하는 연약점토에서 파괴 포락선을 선형적으로 가정하는 것은 문제가 있는 접근방법이라고 제시하였다.

연약점토의 비배수전단강도를 관련있는 유효응력으로 정규화시켜서 표현하는 것은 매우 유용하여 파괴시 평균 유효응력으로 표현하는 것이 타당하나 현실적으로 그값을 알기는 쉽지 않기 때문에 일반적으로 초기 연직유효응력으로 표현하고 있다. 그러나 만일 파괴포락선이 비선형적이어서 내부마찰각이 변화하거나, 실험적요소에 따라 영향을 많이 받게 되면 정규화한값은 변화하게 된다. 따라서, 많은 연구자들은 연약점토의 비배수전단강도를 간극비(또는 함수비)로 표현하였다. 포화된 정규압밀점토의 전단특성은 Rutledge(1947)의 연직유효응력-간극비-파괴시 축차응력 간의 유일성 개념(Concept of Uniqueness of Water Content and Effective Stress) 준하여 거동하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 개념은 중간주응력, 응력이력, Fabric, 층상구조점토 등에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 정규압밀토나 약간 과압밀토 점토(OCR<5)에서는 유효한 것으로 보고되었다. 압밀특성곡선과 강도특성곡선이 경험적으로 평행한 값을 갖는 것은 강도 증가비 $\frac{\tau_f}{\sigma'_{vc}} = \frac{S_u}{\sigma'_{vc}} = \frac{c}{p} =$ 일정함을 의미한다.

3. 침강/압밀 해석

침강 현상은 현탁액 내 입자들의 유체에 대한 상대적인 운동을 의미하며 수중에 토립자가 넓은 간격으로 섞여있고 부력을 받아 부유하는 상태에 있으므로 토립자간의 유효응력은 0인 상태가 된다. 유체 내의 유일한 입자에 대한 침강 속도를 계산한 Stokes의 법칙은 정지된 수중에 구형의 토립자가 그 직경보다 넓은 간격으로 서로 떨어져 있는 상태에서 자유 침강하는 경우의 해석 방법으로 제시되었으며, 그 이후 현탁액의 농도를 고려한 계면 침강속도에 대한 많은 단립침강 이론식이 제안되었다. 그러나 준설투 투기와 같이 지반공학적 측면에서 침강 현상은 비

교적 고농도의 현탁액에서 발생하기 때문에 토립자 사이의 상호 작용에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 침강 형태는 Kynch(1952)에 의해 방해침강이론으로 고농도 현탁액의 침강현상을 해석할 수 있다.

현장에서 압밀해석을 위해 일반적으로 쓰여지고 있는 Terzaghi의 압밀이론식은 흙의 압밀현상을 이론적으로 표현하기 위하여 여러 가지 가정을 포함하고 있으며 그 중 간극비와 유효응력의 선형적 관계, 압밀이 진행되는 동안 일정한 투수계수, 그리고 미소변형(Infinitesimal Strain)이라는 세 가지 가정이 중심이 되고 있다. 이러한 가정하에 유도된 Terzaghi의 압밀이론식으로 커다란 침하량을 보이는 연약지반의 압밀거동을 해석하는 것은 현장조건과 기본가정의 불일치로 인해 적절하지 않다고 판단된다. 따라서, 커다란 압밀침하량이 예상되는 연약점토의 일차원 압밀거동을 해석하는데 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계의 비선형 거동과 압밀에 따른 변형률의 영향이 고려된 유한변형 압밀이론의 사용이 요구된다.

4. 준설토의 침강/압밀 특성실험

압밀실험은 기본적으로 점토의 압축성과 투수성을 구하고 그 이외의 압밀제상수(선형압밀하중, 팽창지수, 압밀계수, 2차압밀계수 등)을 얻기 위한 실험이다. 기존의 압밀실험방법은 실험장치 및 재하방법에 따라 매우 다양한 실험법이 있으나 초기 함수비가 매우 큰 준설매립토에서는 특별한 실험방법의 사용이 요구된다. 기존의 실험방법으로는 대부분 초기 간극비가 2.0~3.0이하의 시료에 대하여 수행되었으나 준설토 투기시 초기 간극비는 5.0이상을 유지하고 있다. 따라서 이와 같이 초기 함수비가 매우 큰 경우에는 특별한 실험방법과 병행하여 기존의 실험방법을 사용할 것이 추천된다.

압밀실험에 사용되는 압밀셀의 종류는 그 기능 및 형태에 따라서 오이도미터셀 형태(Oedometer Cell Type), 등방셀 형태(Isotropic Cell Type), Rowe셀 형태(Rowe Cell Type), 연결형셀 형태(Inter-Connected Cell Type or Separated Cell) 등으로 분류된다. 연약점토의 압밀실험방법은 실험방법에 따라서 단계재하실험, 침투압밀실험, 일정하중률실험, 일정변형률실험 등이 있다. 점토의 압밀특성을 구하기 위한 그외의 실험방법으로 일정하중률실험과 동수구배 제어 실험이 있다. 일정하중률실험은 하중재하시 발생하는 연직전응력의 증가율을 일정하게 유지하면서 비배수 경계면에서 유발되는 과잉간극수압 및 변위량을 측정하여 시료의 간극비-유효응력 구성관계 및 압밀정수를 산정하는 방법이다. 실험기법 및 실험결과에 대한 해석방법은 Aboshi(1970) 등에 의하여 제시되었다. 동수구배 제어실험(Controlled Gradient Test)은 시료에 가하는 하중과 비배수 경계면에서 발생하는 과잉간극수압의 크기가 일정하도록 조절하여 실험을 수행하는 방법이다.

초기 간극비가 큰 준설매립토의 자중압밀특성을 실내 실험으로 재현하기 위하여 임의 단면의 Column을 Plexiglas로 제작하여 초기 함수비와 배수조건을 변화시켜가며, 토립자 자중에 의한 압밀을 유도시켜 실험을 수행하며, 시간변화에 따른 압밀침하량 및 깊이에 따른 과잉간극수압분포를 측정한다. 보다 더 진전된 침강압밀 실험방법은 실험수행 동안 시료의 간극비 분포를 구하기 위하여 X-ray 또는 γ -ray를 투과하여 시간 경과에 따른 간극비(또는 함수비)의 깊이별 분포를 측정할 수 있다. 침강압밀이 완료된 시점에서는 시료의 자중에 의하여 평형상태에 도달하였기 때문에 간극비-유효응력을 구할 수 있으며 간극수압 분포와 침강 및 압밀속도 측정에 따라 간극비-투수계수의 구성관계를 구할 수 있다.

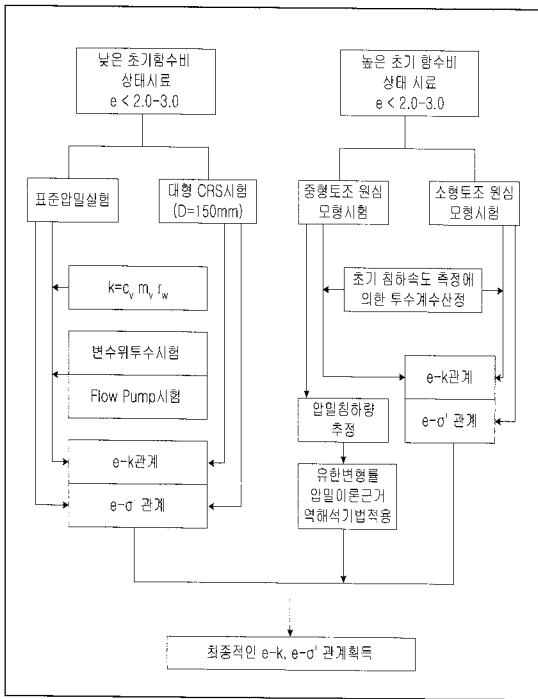


그림 2. 역해석기법 적용 흐름도

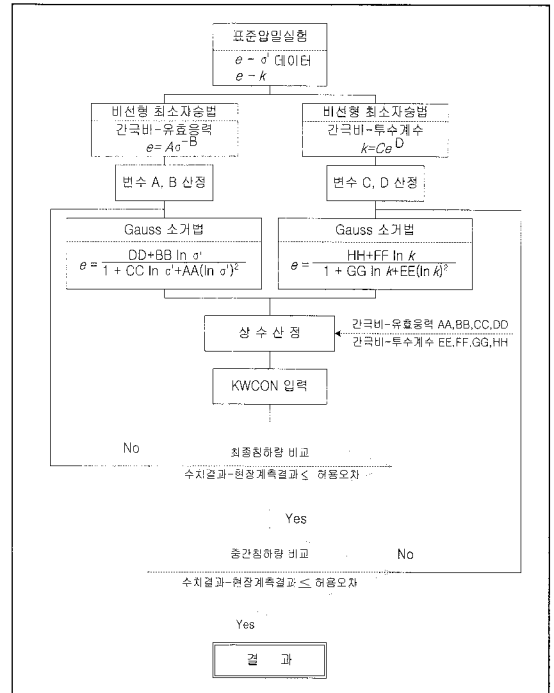


그림 3. 역해석 수치해석 흐름도

5. 준설패립토의 구성관계 획득 및 현장 예측

준설패립지반의 압밀거동을 예측하기 위하여 우선 그들의 구성관계식을 구하여야 한다. 그의 관계식을 구하기 위하여 전술의 방법과 같이 많은 방법이 있으나 특히 투기 직후 고함수비 상태에서의 패립토의 구성관계식을 구하는 것은 특수한 장비(예, X-ray 또는 Gamma-ray 밀도 측정기, 초연약지반의전단강도 측정장치등)가 필요하며 침강/압밀을 유도하기 위하여 최소한 3개월 이상의 장기간의 시간이 요구된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에 자중압밀 거동 구성관계식을 구하기 위하여 원심모형 실험 결과를 이용한 역해석 기법이 사용되고 있다. 사용한 역해석 기법은 <그림 2>의 흐름도와 같으며 구체적인 수치해석 내용은 <그림 3>의 흐름도와 같은 방법으로 실시할 수 있다.

기시공된 준설패립지를 대상으로 매립지반에 준설토를

투기할때의 함수율, 일일투기량 및 일일투기고의 현장조건을 고려하여 매립지반의 압밀침하량, 체적비 산출 및 향후 지반거동에 대하여 <그림 4>에 보인바와 같이 검증 및 예측을 실시할 수 있다.

6. 결론

해안 공간 개발을 위한 매립사업의 필요성은 양질의 매립토 수급 제한으로 해상점토의 사용은 필연적이며 그에 따라 해상토의 매립지 투기시 발생하는 지반 공학적 문제가 대두된다. 경제적이고 안전성 있는 준설패립지 조성을 위한 시공은 준설토의 매립과정에 따른 체적 변화에 대한 정확한 예측과 매립 완료후 전단강도의 변화를 현실적으로 정확히 예측할수 있는 방법에 근거한 적정의 설계 방법 사용에 달려있다.

준설패립토의 체적변화와 전단강도에 관한 지반 공학

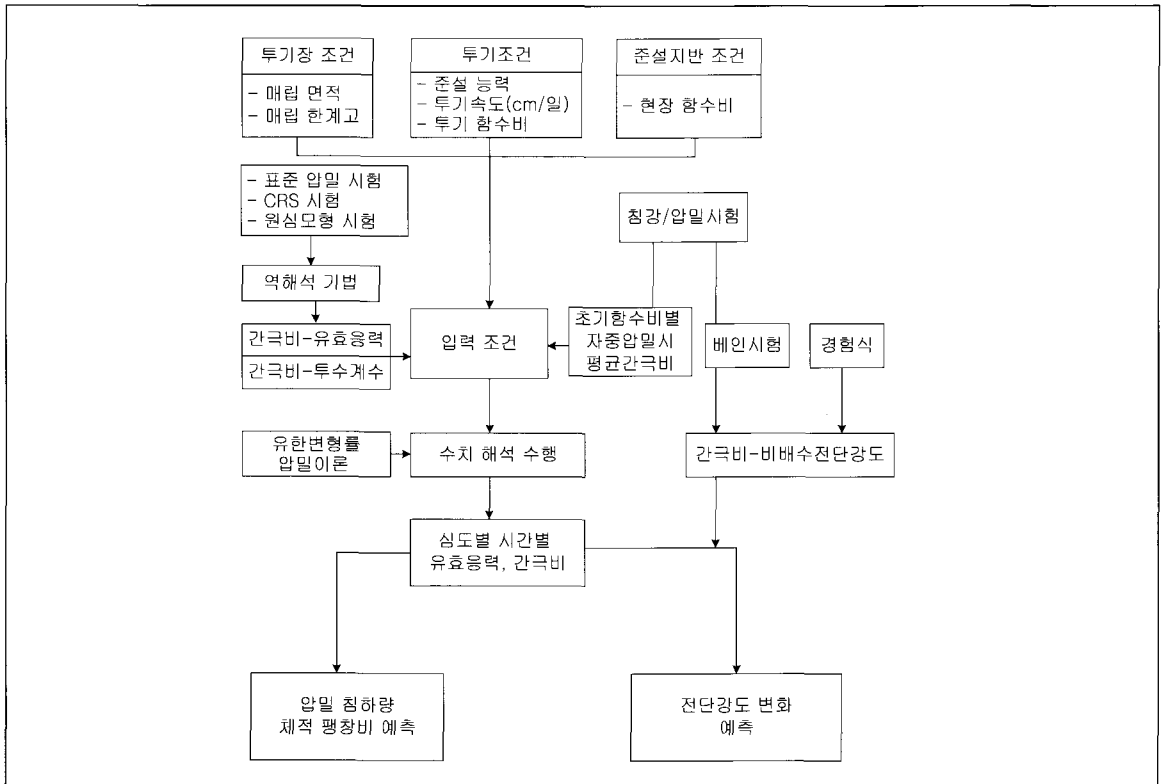


그림 4. 현장 예측 방법 흐름도

적인 특성은 투기시 높은 함수비 상태의 해성 점토입자간 상호작용에서 출발하여 형성된 흙의 구조는 자중압밀 과정에서 투수성, 압축성, 전단강도에 영향을 미치어 그의 자중압밀에 의한 침하와 전단강도의 경시적 변화를 일으킨다. 따라서 해성토의 침강, 압밀 특성과 그의 메카니즘에 대한 정확한 규명과 이에 바탕을 둔 이론적 정립이 요구된다.

그동안 관련 과제에 대하여 많은 연구가 국내외적으로 실시되어 왔으나, 특히 침강에서 압밀로 천이되는 과정, 즉 침강과 압밀의 경계에 해당하는 함수비 상태에서의 흙의 거동에 대하여 보다 명확한 규명이 요구된다. 이점은 지반 공학자의 영리한 과제인 Terzaghi의 유효응력 법칙 적용성에 대한 근본적인 문제로 지반 공학자뿐 아니라 항만공학, 환경공학, 화학공학 등 관련 공학은 물론 물리 화

학의 기초 과학자들과 공동연구를 통하여 이루어야 될 것이며 그결과를 바탕으로 일반적인 침강압밀 통합이론이 개발될 것으로 예상된다. 만족스럽게 침강압밀 거동을 설명할 수 있는 통합이론의 개발은 수치해석기법의 적용을 통하여 사용자들이 필요한 설계 인자를 간편하고 정확하게 산정할 수 있는 소프트웨어를 개발하는 것으로 그의 궁극적인 목적달성이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 준설토의 침강압밀 과정에서 겪는 복잡한 거동을 분석하기 위하여 특수 장비(X-ray, Gamma-ray, 초 연약지반 전단강도 측정 장비)의 사용 또는 개발은 필수적이거나 복잡한 국내의 방사능 물질 관리체계는 그와같은 장비취급에 많은 제약을 가져오게 되어 그에 대한 보완이 필요하다.

한편, 준설토의 복잡한 침강 압밀 거동으로 인하여 정



확한 과학적 규명을 위하여 많은 시간과 경제적 지출이 요구되는 바, 경험적 방법에 의한 매립지 설계 인자의 산정도 매우 현실적인 방법이 될 수 있다. 모든 토질 정수는 서로 상관성이 있으므로 그동안 국내에서 축적된 침강 압밀 실험결과 자료 또는 현장 계측 결과 자료의 종합적이며 체계적인 통계 분석을 통하여 매립토의 기본 물성값(LL, PL, PI, 세립분 함유율, 활성도등), 초기함수비, 침강시 침강속도, 압밀단계의 간극비, 압밀 발생 시점, 비배수 전단강도 등 관련 토질정수의 상관성에 대한 경험식의 제시는 예비 설계단계에서 유용하게 사용될 수 있는 접근 방법으로 판단된다.

투기함수비, 투기속도 등의 투기조건은 투기시 토립자 간 구조형성에 따른 침강거동, 압밀 거동 및 전단강도 거동에 영향을 미칠 뿐 아니라 매립지 지반 보강을 위한 적

정의 표면처리 공법 선정 및 수행에도 영향을 미칠 것으로 예상되므로 투기, 방치, 건조, 지반 보강의 시공과정을 겪는 매립지의 관리 측면에서 효율적인 준설토 투기 방법 및 조건을 제시하여 경제적인 시공을 수행할 수 있도록 하여야 한다. 또한 항만시설물 구축과 같이 매립 후 단기간내 매립부지 활용이 요구되는 경우에는 조속한 압밀 완료 및 지반의 강도 발현이 필수적이어서 적정의 표면처리공 또는 건조층 형성시기 및 전단 강도의 예측이 필요하며 지반 보강을 위한 장비 투입시 그의 주행시 안정성 평가 여부가 매우 중요한 사안이며 현실적으로 당면한 문제이므로 그와 관련하여 지속적인 연구와 공법개발이 요구된다.

* 본 내용은 CPD교육용 자료를 편집위원회에서 축소 편집한 것이며, 전체내용은 CPD 교육자료를 참조하시기 바랍니다.

[참고문헌]

1. Kynch, G. J.(1952), " A Theory of Sedimentation ", Transaction Faraday Society, Vol. 48, pp. 166-176.
2. Olson, R.E., (1974) " Shearing Strengths of Kaolinite, Illite & Montmorillonite ", ASCE 100, GT11, 1, 215.
3. Skempton, A.W., (1964) , " Long Term Stability of Clay Slopes ", Geotech, 11, 2.
4. Yong, R. N.(1984), " Particle Interaction and Stability of Suspended Solids ", ASCE, Special Publication on Sedimentation/Consolidation Models, pp. 35-38.