

# 「준설·매립·인공섬」토론 요지

## 《편집자 주》

우리 학회에서는 '92년 10월 16일(금)~10월 17일(토) 이틀간 한국건설기술연구원 대강당에서 준설, 매립, 인공섬을 주제로 가을 학술발표회를 개최하였다.

본 학술발표회는 준설·매립·인공섬과 연약지반처리의 3개 분과로 진행되었으며, 김상규회장님의 “준설·매립 및 인공섬 축조에 관련된 토질공학적 문제점”이라는 회장사와 2편의 초청강연, 그리고 15편의 논문이 발표되었다.

초청 강연에서 일본 Toyo 대학의 Toshinobu Akagi 교수는 최근 일본의 오사카만에 건설된 로꼬, 코베항, 칸사이 국제공항 등 3개의 인공섬과 관련된 지반공학문제를 소개하였고, 미국의 Roger Foott Assoc. 사의 Roy Bell 박사는 홍콩의 Chek Lap Kok공항 건설과 관련된 지반 조사, 시험성토, 계측등에 관하여 소개하였다. 초청강연이 끝난 후 일본 칸사이 국제공항의 계획에서부터 건설에 관련된 비디오 상영이 있었다.

학술발표회와 동시에 쏘레 땅쉬-범양, 동아지질(주), 흥인상사, 상지텍솔, 신평계측산업(주), 아주지오시스템스(주), 코오롱 상사(주)의 준설·매립, 인공섬과 연약지반처리에 관련된 장비, 제품 및 소프트웨어 등에 대한 기술전시회가 개최되었다. 분과별로 진행된 토론내용을 정리하여 아래와 같이 게재하며 이는 각 분과별 서기가 토론자들의 협조를 얻어 정리한 것이다.

토론에서 새로이 제시된 그림이나 표의 번호는 분과 번호를 넣어 그림 2.3과 같이 표기하였으나 논문집에 제시된 표나 그림을 참고로 사용했을 때는 그림 3과 같이 그대로 쓰고 논문집의 페이지를 ( )안에 병기하였다.

끝으로 가을학술발표회를 성황리에 마칠 수 있도록 협조하여 주신 회원 여러분께 지면으로 감사의 말씀을 전하며, 특히 기술전시회에 참가하여 학술발표회를 더욱 빛내 주신 업체께 감사의 말씀을 전합니다.

## 1. 제1분과(준설·매립) 토론내용 요약

좌 장 : 김수삼\*1  
토론자 : 김호일\*2  
          : 이  송\*3  
          : 김형주\*4  
서 기 : 이원제\*5

### 1.1 좌장의 머리말

오늘 학술발표회의 준설·매립 분과에서는 세 가지 분야 즉,

- 1) 준설기법의 이론과 실제, 계측 등
- 2) hydraulic fill과 펌핑시스템, 그리고
- 3) 생활, 산업쓰레기 등의 매립재료의 활용 분야 등으로 요약되는

내용에 대하여 논문작성을 요구했었는데 제

\*1 정회원, 중앙대학교 공과대학토목공학과 교수

\*2 정회원, 농어촌진흥공사

\*3 정회원, 서울시립대학교 공과대학토목공학과 부교수

\*4 정회원, 군산대학교 해양공학과 전임강사

\*5 정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구실 연구원

출된 논문들을 살펴보면 총 6편중 준설관련 내용이 4편, 매립관련 내용이 2편으로 나타났다. 제출, 발표된 논문들의 내용을 기본 사항으로 세분화한다면 “굴착, 운반, 퇴적, 매립재 특성, 정적·동적안정성, 개량방법, 현장조사, 계측기술, 점토광물론 등의 관련학문으로 볼 수 있는데 이들 중에는 현재 국제적으로 활발한 연구가 진행중인 파쇄굴착·혼합·퇴적 등과 연관되는 준설장비 관련 내용이 누락되어 아쉬움이 있다.

준설·매립분야에 대한 학문적 접근방법에는 미시적 접근으로서 침강과 자중압밀, 거시적 접근으로서 압밀, 전단파괴 이론으로 구분할 수 있겠는데 이들과 관련되는 공학적 문제점(engineering problem)으로는 함수비에 따른 초기간극비의 산정, 간섭침강과 계면침강의 구분, surcharge 공법적용에 따른 강도증가는 예상대로 이루어지는가, 관련 메카니즘의 지역 특성(한국)과의 적합성 검토, 관련장비의 적절한 선정 문제 등이 대두될 수 있으므로 이들에 대한 연구 규명 노력이 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

한편, 현재 국내에서는 군장 공단건설, 각종 인공섬 건설, 영종도 신국제공항사업 등 관련 공사가 활발하게 진행되고 있음에도 기술자간의 모임은 아직 부족한 느낌이었는데 금번 발표회를 통한 정보교환기회가 마련되어 매우 기쁘게 생각하며 향후 이 연구개발분야에 대한 노력이 절실하다 하겠다.

## 1.2 토론내용

- **좌 잠** : 우선 여천지구, 군산지역 등의 준설토에 대한 논문을 많이 제출해주신 대우엔지니어링 관계인에게 사의를 표하며 향후에 현장계측 결과도 발표될 예정이라 하니 살아있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대가 된다.

발표논문중 ‘고농도 부유물의 침전’과 관련하여 한가지 의문사항은 실트나 점토는 전

하를 떠는 sheet 모양인데 간섭 침강 처리가 가능하다면 발표 내용외에 추가적으로 언급하고자 하는 사항이 있을 것으로 생각된다.

- **한무영(발표자)** : hydrodynamic에 관련되는 연구는 1984년 두 입자간의 거동식이 제안되면서 구형이 아닌 타원형 등에도 대칭축이 있을 경우 수학적으로 표현가능하게 되었다. 오늘 발표한 내용은 이들에 대한 초기단계로서 향후 관련 mechanism을 보다 깊게 연구하기 위한 시작이라고 사료된다. 이들에 대한 내용을 적용시킨 예로서 상하수도 분야를 들수 있겠는데 교반시키면서 통속의 작은 입자를 침전시키는 과정은 부동침전을 거쳐 최종침전이 이뤄지는데 “입자크기가 어느정도일때 가장 효과적인 것인가?” 또는 “온도의 영향은 어떠한 것인가?” 등의 의문점은 있으나 적용가능한 것으로 판단한다. 한편 점토의 퇴적 mechanism에 관해서는 압밀압력을 변화시키면서 간극수압, 입자간 간격, 약액반응 등 미시적 기구에 대한 규명이 요구되는 것으로 생각한다.

- **김호일(토론자)** : 여천 임해공업단지 조성 관련 발표내용(마지막 발표)에 대한 의견이다.

지반이 연약하여 시료채취 등이 잘되지 않아 필요시험이 어려운 것은 앞으로 원위치 시험으로 보완하는 것이 바람직하며 매립토가 #200체 통과율이 98% 또 함수비가 69~98%인 매우 연약한 흙이므로 매립토량 산정시 자연수축에 대해서 검토 되어야 하고 강도 증가를 식(3)의  $C=C_0+\Delta P \cdot U(C/P)$  (논문집 P.80)에서 얻은 결과는 적용에 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

실제 조사 시험한 예를 들면, 1924년에 준공된 전북 옥구 저수지(제당 높이 5m) 조사시 하중에 대한 영향권 밖에서 제당 기초지반에 대해 조사한 바 강도증가는 심도 3~4m(연약지반심도 10~15m)에서 50~100% 정도였으며 전남 해남 방조제는 1년 후 심도 3~4m(연약지반심도 16~19m)에서 20~30% 정

도의 강도가 증가되었던 경우가 있었다. 강제 치환 심도 14.4m는 어떤 방법으로 치환하는지 궁금한데 토론자의 판단으로는 시공 중에 자연적으로 치환되는 것으로 생각되며 또 치환 심도가 연약지반의 70%는 이해가 되나 이는 시공속도 및 성토차량 등 운반차량 (설계속도는 대개 20km/hr 전후이지만 과속하는 예가 많음)으로 인해 지반이 파괴되어 치환 심도가 더 깊어질 수 있으므로 이에 대해 적절한 속도 검토가 요구된다 하겠다.

• 이 승(토론자) : 여천지역 준설·매립토의 침강압밀특성(논문집 pp. 55~60)과 관련된 의견으로서,

1) 결론 ③에서 준설매립토의 실제현장 조건은 깊이에 따라 함수비와 간극비가 다른 것이 일반적이므로 침하해석시 다층토 해석이 필요할 것으로 생각되며, 2) 준설매립토는 자중압밀이 중요하므로 자중압밀실험에 의해서  $C_f$  값을 결정하여 준설토량과 침하해석이 되었으면 더 좋은 결과가 얻어졌을 것으로 판단한다. 또한 3) 준설토의 실험과정에서 저응력 상태의 자중압밀, 침강압밀, 침투압밀 등의 압밀 특성 시험은 좀더 large scale 상태에서의 modelling이 필요하고 실험기구 개발이 뒤따라야 될 것으로 사료된다.

여천 임해공업단지 매립계획 및 설계(논문집 pp.75~83)와 관련한 의견은 원지반토와 준설토의 압밀특성이 같다고 침하특성 해석을 수행한 것은 모순이라고 생각되며 자중압밀 실험을 행하여 해석함이 바람직하다고 판단한다.

• 김형주(토론자) : 준설매립에 의해 토지조성을 하는 경우 문제가 되는 것은 ①준설토량의 balance, ②자중압밀, ③강도변화 등으로 분류할 수 있는데 매립공사가 장기간에 걸쳐 이루어지는 경우는 자중압밀 종료시의 압밀특성을 이용하여 사전에 ①의 문제를 검토하고 있다.

그러나 최근에는 공사기간의 단축을 위해 대

량으로 펌프준설을 하는 경우 준설 점성토의 침강, 자중압밀 특성을 사전에 검토하여 압밀침하를 해석하고 있다. 발표논문 “여천지역 준설 매립토의 침강압밀특성”에 있어서는 침강시험 결과를 Terzaghi 압밀이론을 변형한 단계적 소변형률과 극소 변형률법에 의해 비교 검토하고 있다. 침강자중압밀시 점토의 특성을 무시하여 침하곡선에 curve fitting 함으로써 자중압밀 개시조건, 저응력 범위에서의 압밀정수 결정 등이 전혀 고려되지 않았기 때문에 여기에 대한 보충설명을 다음과 같이 하고자 한다.

아래 그림과 같이 slurry 상태의 액상점토의 압밀특성을 구하는데는 3가지 방법을 들 수 있다[Imai(1979), Monte and Krizek(1976), Umehara(1983)].

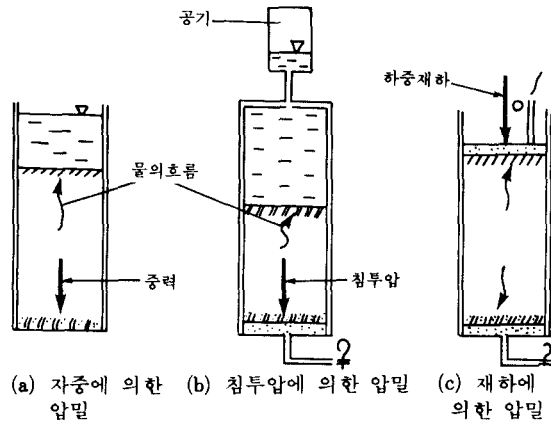


그림 1.1 슬러리상태 액상점토의 압밀특성을 구하는 세 방법

그림(a)와 같은 침강 및 자중압밀 실험은 현상상황에 따라 용기저부를 배수 혹은 비배수로 설정하지만 보통 배수시는 과잉간극수압의 복잡성 때문에 비배수 상태로 침강형태 및 침강현상에 미치는 여러영향, 자중압밀 개시조건 및 특성을 파악하는데 사용한다. 이 경우 균질한 초기상태의 표면침하속도에 의해 투수계수(k)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k = v(\gamma_w/\gamma_o')$$

또한 여기서 여러 초기상태의 함수비를 변화시켜 침하속도( $v$ )를 구해  $e \sim \log k$  혹은  $e \sim k$  관계를 구할 수 있다. 이 관계는 수치압밀 계산시 침하속도를 부여하고 있다.

최종 침하량 산정시 필요한  $e \sim \log \sigma'$  관계는 자중압밀 종료 후 각 깊이마다 적당한 절편(slice)을 설정하여 각절편마다 함수비 측정 에 의해 간극비( $e$ )와 유효상재하중( $\sigma'$ )를 구한다. 여기서 압밀하중  $\sigma'$  체적압축계수( $m_v$ ), 압밀계수( $C_v$ )를 다음식에 의해 구한다.

$$\sigma'_i = \sum \gamma_{i-1} \Delta Z_{i-1} + \gamma'_i \Delta Z_i / 2$$

$$m_v = \frac{0.434 C_c}{(1+e) \sigma'}, C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

위 방법은 압밀하중이 매우 작은 저응력 범위의 압밀 하중에는 적당하지만 실제 심도가 깊은 준설매립지의 압밀 하중을 전부 나타내기에는 실내 실험상 제약이 있기 때문에 원심력 실험을 하게 되는데 이 또한 비용 문제 등으로(b)와 같은 침투압밀시험에 의해 그림 중(a)와 (c) 사이의 하중범위에 대한 압밀특성을 구하고 있다.

이 경우 공시체 내부의 간극수압을 측정하여 절편  $\Delta Z$ 에서 구한 함수비에 의해  $e_i, \gamma_{ti}$ 를 계산하고  $\sigma'_i$ 는  $\gamma_{ti}$ 를 적산하여 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$\sigma'_i = (h_i \gamma_w + \sum \gamma_{ti-1} \Delta Z_{i-1} + \gamma_{ti} \Delta Z_i / 2) - U_i$$

전술한 (a), (b) 방법은 통상 저응력 재하 즉 일반적인 준설 매립계획시 필요한 압밀정수를 구하는 방법이며 그림(c)는 압밀시험법과 변함없는 것으로서 slurry 상태를 대상으로 하기 때문에 재하 piston과 용기내면 사이에서 slurry의 유실과 piston 마찰 등에 대한 대책이 요구된다. 그러나 간극수압 분포를 직접 구하는 잇점이 있다. 경험적으로 액성한계의 3배정도의 함수비에서는 재하에 의한 압밀시험이 가능하다.

### 1.3 질의·응답

- 김상규(동국대) : 여천공업단지 관련 발표

내용 중 침하가 70~80% 발생하였다고 했는데 강제치환 방법은 침하가 발생하면서 지반 파괴, 유동 현상 등이 나타날 수 있고 역학적으로 침하량 추정이 거의 불가능하다고 생각된다. 즉, 그 메카니즘은 하중이 가해지면 먼저 지지력의 부족으로 침하가 발생하고, 외부로 용기하면서 지지력은 증가하여 어느한계 이상에서는 더 이상의 침하가 없게 되는 것이다(상부 하중 때문에 굳어지게 되고 지지력이 커져 침하는 감소함). 또한 하중을 재하하는 것은 제방활동, 방조제 수몰 등을 유발할 수 있고 침하, 활동예측이 어려워지는 경우가 많다. 따라서 강제치환은 역학적으로 불리하기 때문에 별로 적용되지 않는 방법이라 생각되므로 처리방법이 더 좋을 것으로 생각된다.

- 채영수(수원대) : '군산지역 준설토의 퇴적 특성' 논문내용에서 준설토의 토출거리, 토출기계 능력의 영향, #200 이하시료의 퇴적 상황을 설명 부탁한다.
- 송정락(답변자) : 준설시에는 유실률을 감안하고 있는데 세립분은 보통 400m 이상 흘러나가는 것으로 조사되었으며 한쪽을 터 놓으면 긴 경우 약 3km 정도까지도 흘러 나간다. 토출구 간격의 영향으로 조립토는 퇴적되고 그외 나머지 부분은 흘러나간다. 그리고 토출기계 능력의 영향에 관한 사항은 향후 연구계획에 있다.

### 참 고 문 헌

1. Imai, G., "Development of a New consolidation Test procedure using seepage force," Soils and Foundations, Vol. 19, No.3, 1979, pp.45-60.
2. Monte, J.L. and Krizek, R. J., "One dimensional mathematical model for Large-strain Consolidation," Geotechnique, Vol. 26, No.3, 1976, pp.495-510.
3. 梅原靖文, "土の 壓密特性とその 試験法に 關する 研究," 港灣技術資料, No. 469, 1983. pp.67-111.

## 1. 제2분과(인공섬)토론내용 요약

좌 장 : 강병희\*1  
토론자 : 박성재\*2  
          : 김명모\*3  
          : 김승렬\*4  
서 기 : 엄용섭\*5

### 2.1 좌장의 머릿말

본 인공섬분과에서는 인공섬의 건설과 관련된 해저 및 해안 연약지반의 특성, 부산 인공섬 건설과 관련사항, 그리고 인공섬 건설시에 문제시되는 지반공학특성에 대하여 발표하였다. 국토의 협소로 인하여 인공섬의 건설이 요망되는 시점에서 '인공섬'에 관련하여 학술발표회가 개최됨은 매우 바람직한 일이며, 우리나라의 경우 이제 기초연구의 단계라 볼 수 있어 오늘 발표된 3편의 논문은 인공섬 건설분야 연구에 향후 많은 기여를 할 것이라 생각되며, 아울러 기술자간의 상호의견교류 등의 기회가 더욱 필요하리라 생각된다.

### 2.2 토론내용

- 박성재(토론자) : 연약지반의 시료채취방법에 대한 문제점중 단가의 불합리성과 구태의연한 시료 채취방법들은 공무원, 용역회사 및 보링업자들의 상호 협조에 의하여 개선 가능한 사항이나 여러가지 행정상의 문제로 벽에 부딪혀 있다는 지적을 하고 싶고 현장 조사비의 적합한 투자는 결국 정확한 지반정보의 습득으로 전체 공사비의 상당부분을 절감할 수 있다는 사실을 염두에 두어야 한다

는 점을 강조하고 싶다. 즉, 실질적으로 시료의 교란 가능성이 작은 샘플링 기구가 사용되어야 하며, 이를 위한 정부 차원에서의 지원조사의 중요성을 인식하는 체질 개선이 이루어질 수 있도록 우리 지반공학자들은 노력하여야 할 것이다.

- 김명모(토론자) : '전문가 시스템을 이용한 토질공학적인 인공섬 설계의 기법'의 토론 내용으로 전문가 시스템의 개요, 인공섬 건설시에 대두되는 연약지반 처리공법에의 전문가 시스템의 적용성과 개발 가능성에 대하여 토론하겠다. 우선 일반적인 사항으로 전문가 시스템은 인공 지능의 한 분야로서 특정 분야의 전문지식을 프레임, 규칙, 의미 네트워크 등의 지식표현 기법을 이용하여 화일 형태의 지식 베이스를 구축한 후 지식베이스를 컴퓨터의 주 메모리에 적재하여 전문가 시스템 사용자의 질문을 입력받을 때 추론엔진에 의한 일련의 추론과정을 통하여 얻어 낸 추론 결과를 출력하여 전문가의 지식과 조언에 해당하는 기능을 제공하여 주는 시스템이라 하겠다. 이 시스템의 개발에 사용되는 도구로서 CLIPS(C Language Integrated Production System)를 사용하였으며, 이 도구는 절차적 언어인 동시에 목적 지향적 언어이다. 또한 C 언어 및 기타언어(Fortran, Pascal 등)와 쉽게 인터페이스할 수 있는 특징을 갖는 도구이다.

이 시스템의 개발절차는 그림 2.1과 같다.

전문가 시스템은 인간 전문가와 비교할 때 영구적이고, 의사전달 소통이 항상 가능하며, 새롭게 발생하는 지식의 추가가 용이하다. 또한 결정하여 출력하는 의견이 일관성이 있으며, 저렴하다는 장점이 있는 반면에

\*1 정희원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*3 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*4 정희원, (주)대우 ENG 토목사업본부

\*5 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

입력된 지식베이스에만 의존하므로 창조성이 없고, 그로 인하여 지식에 제한이 있으며, 상식적인 지식이 첨가되지만 주로 기술적인 지식에만 의존하는 단점이 있다.

이러한 장단점을 고려하여 토질공학적 설계 기법에 적용함에 있어 인공섬 건설시에 대두되는 선행재하공법에 적용하여 개발중이며, 추가적인 공법의 첨가는 향후 연구에서 별 어려움없이 진행될 것이라 생각하며, 우리나라의 경우 서남해안의 공유수면 매립사업과 관련하여 전문가 집단의 체계화, 전문화가 절실히 요구되는 차원에서 본 전문가 시스템의 개발은 매우 중요하고, 절실하다고 생각된다. 본 전문가 시스템에 대해서는 대한토목학회 학술발표회에서 소개할 예정이다.

- 김승렬(토론자) : 자연지반에서 교란시료와

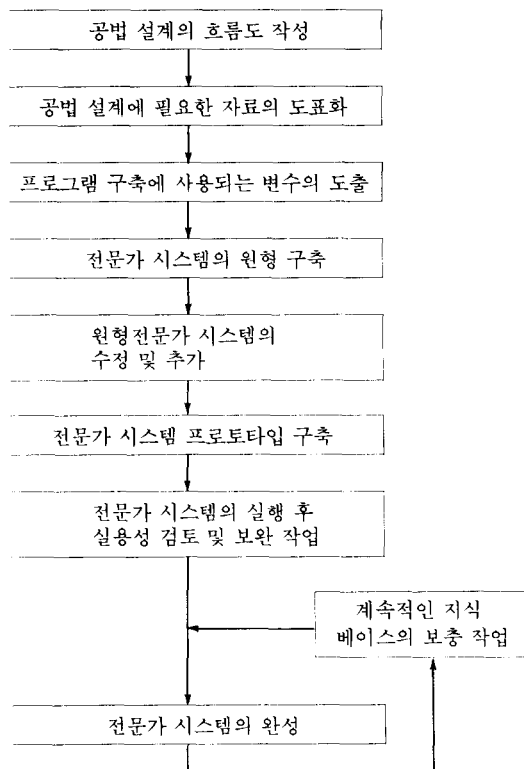


그림 2.1 전문가 시스템 개발 절차

불교란 시료의 공학적 특성과 저압밀 점토의 공학적 특성에 관하여 토론하겠다.

우선 해저 퇴적토는 강도가 낮고, 압축성이 높으며, 층상퇴적의 특성을 갖고 있다.

또한, 우리나라 해안의 토질특성이 점토성분을 많이 함유하고 있어 점착력을 갖게 되므로 액화기술을 성공적으로 수행하기 위해서는 특히 높은 점토함유율을 갖는 퇴적지반의 분산성, fluidizer 파이프 네트워크의 저하, 액화될 깊이 등이 면밀히 고려되어야 한다. 동시에 액화될 지역의 범위 및 체적, 압력의 크기, 콤프레서의 용량등이 문제가 될 것이며, 점토 퇴적층에 대하여 건설공정에 영향을 주지 않는 장기적인 환경오염 대책이 수립되어야 한다.

따라서 이러한 액화기술은 세립재의 퇴적을 방지하는 데에는 매우 유용한 방법이라 생각된다.

둘째로 중력다짐에 의한 자연 점토의 압밀 특성에 대하여 토론하겠다. 그림 2.2에 보인 바와 같이 현장 초기 간극비  $e_0$ 와 현재 유효 과재하중  $\sigma'_{vo}$ 는 어떤 특정의 점토에 대하여 선형의 관계를 나타내며, 주어진  $\sigma'_{vo}$  값에서 정규압밀 자연점토의  $e_0$ 는 점토 광물의 특성과 양에 의존한다. 즉, 액성한계가 클수록  $e_0$  값은 커진다. 여러가지 압축 곡선의 형태가 한곳으로 수렴되고, 액성한계의 향으로 도식화 할 때 결과는 좁은 범위내에 모인다. 이 범위의 상부는 높은 민감도를 갖는 점토로, 반면에 하부는 낮은 민감도를 갖는 점토로 구성된다.

Burland(1990)에 의하면 점토의 “고유(Intrinsic)” 특성은 재성형된 점토의 특성과 같으나, 자연점토와는 흙 구조(fabric, bonding)가 다르게 된다. “고유(Intrinsic)” 특성은 자연점토의 현장특성과 그 현장특성에 관한 구조의 영향을 평가하기 위한 참조사항을 제공하여 준다.

간극지수(void index),  $I_v$ 를 도입하여

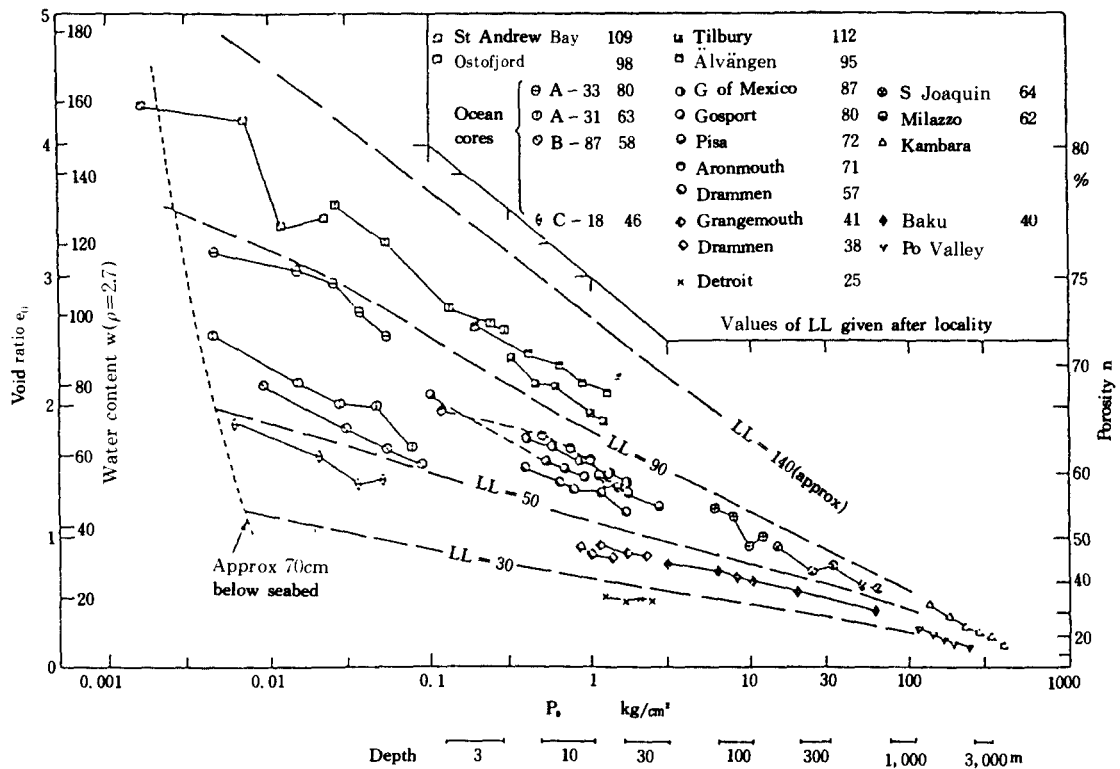
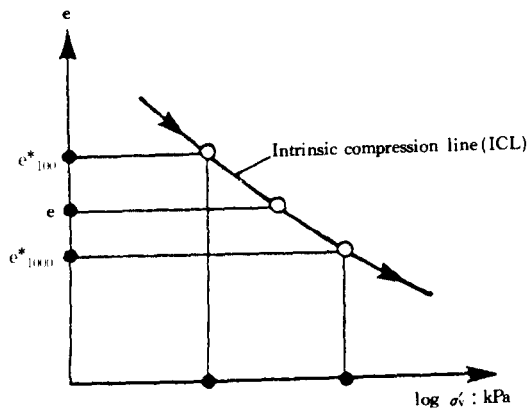


그림 2.2 정규압밀 점토 퇴적의 압축곡선

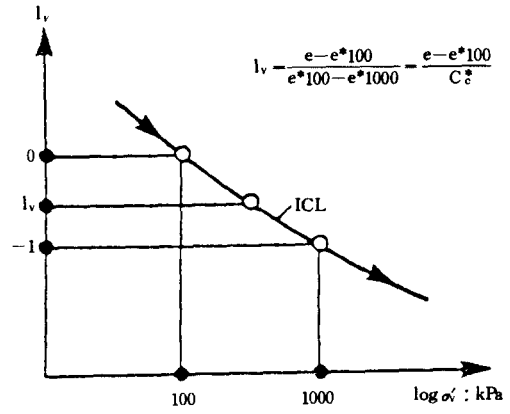
$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*}$$

다 오른쪽에 있다.

Sault Ste Marie 점토의 비교란 시료에 대



(a)



(b)

그림 2.3 고유압축 곡선(ICL)

로 정의하고 압축곡선에서 간극비 대신 사용하면 그림 2.3에 보인 바와 같이 고유압축곡선(ICL : Intrinsic Compression Line)을 정의할 수 있다.

셋째로 퇴적토의 퇴적구조는 퇴적조건에 따라 많은 영향을 받으나 유효 과재압력의 계속적인 증가에는 별로 영향을 받지 않는다. 즉, 퇴적을 좌우하는 중요 요인은 퇴적물과 물의 고요한 정도라고 볼 수 있다.

그림 2.4는 많은 정규압밀점토의 간극지수와 유효과재하중의 관계를 보인 것으로 퇴적압축곡선(SCL : Sedimentation Compression Line)으로 나타낼 수 있고 이 곡선은 ICL보

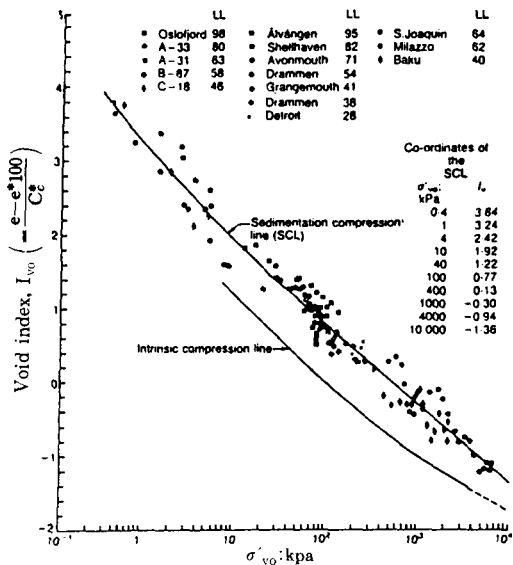


그림 2.4 여러 정규압밀 점토의 간극지수와 유효 과재 하중의 관계

한 압밀시험결과는 그림 2.5(a)에 보인 바와 같이 SCL 위에서 부터 압축곡선의 기울기가 SCL보다 가파르게 떨어져 ICL에 접근하고 있으나 Gosport 점토는 (그림 2.5(b)) 자연 상태에서 ICL 부근에 있다가 압밀시험시에

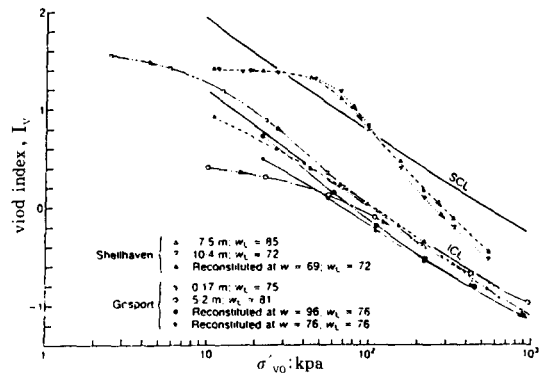
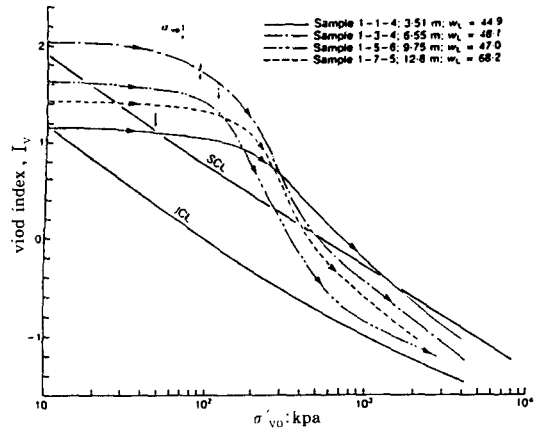


그림 2.5 (a) Sault Ste Marie 점토와 (b) Shellhaven 및 Gosport 점토의 압밀시험 압축곡선

도 ICL을 따라가게 되는데 전자의 경우는 압밀시험중 입자간 결합(interparticle bonding)과 조직(fabric)이 파괴되는 것이며 후자의 경우는 조직이 이미 방향성을 갖고 있어 압밀시험이 이를 변경시키지 못하게 된다.

넷째로 해저 활동의 7개 메카니즘으로 ①지진, ②강풍시의 파동, ③해저 천연가스의 발생, ④분출수압, ⑤빠른 퇴적물, ⑥침식과 작은 활동에 의한 과경사 및 ⑦건설공사중에 야기된 과하중등을 들 수 있다.

그림 2.6은 해저 지반의 기울기와 퇴적층의



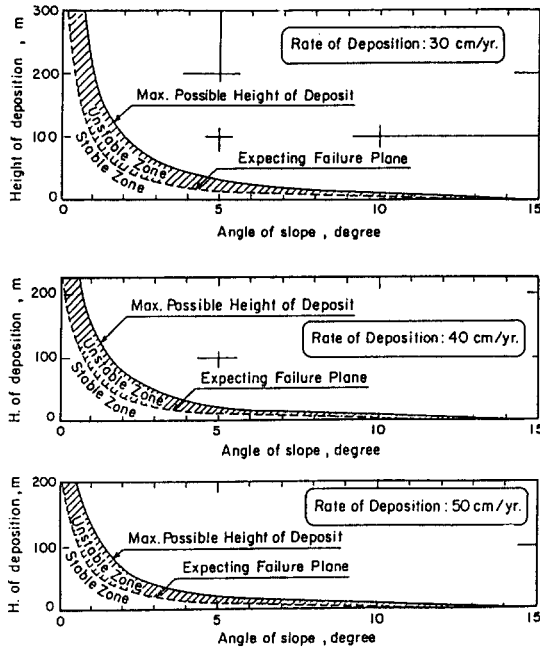


그림 2.6 퇴적속도와 불안정 영역

두께, 퇴적속도에 따른 불안정 영역을 보여 준다.

다섯째로 저압밀 점토의 비배수 거동은 저압밀 점토가 진행상태에 있는 점토를 의미하므로 간극수압이 커질 때 비배수강도가 커지고,  $c'$ ,  $\phi'$ 는 간극수압에 의존하지 않으며, 유효간극수압의 증가량은 정규압밀시보다 약간 더 큼을 알 수 있다.

### 1.3 질의 응답

- 한석희(삼환엔지니어링)
  - Fluidizer 파이프 네트워크를 목표지반 깊이까지 어떤 방법으로 착저시키는가?
  - 연약층이 견고해도 가능한가?
  - 연약층 두께가 두꺼워도 가능한가?
  - 실제 적용된 사례소개요망
- 김학근(부산직할시 도시개발공사)
  - 강제 치환공법 적용시 투입되는 사석등 재

료를 해석하는 방법 및 그 정도는?

- 송병무(도우엔지니어즈, 답변)

- Desiccation에 대하여 :

우리가 해안 지역에서 여러가지 목적으로 실시하는 토목사업들은 일반적으로 해저 표면에서 10~30m 정도의 두께를 갖는 연약층에서 이루어진다. 이와같은 상부의 연약층은 약 8,000년전에 해수의 상승에 수반하여 퇴적된 것이 대부분이다.

지역에 따라 차이는 있으나 강이 운반한 물질이 해성토와 섞인 곳도 있을 것이다.

퇴적 연령이 8,000년 정도 밖에 안되므로 이와 같은 층은 Desiccation을 받을 수가 없다. (Blight : 1966, Mahar and O'Neill ; 1983).

따라서 시험이 과압밀비 값을 1이상 주더라도 이것은 Desiccation에 근거한 것이 아니고 다른 원인, 즉 노령화(aging)에 의한 것일 것이다. 그리고 Desiccate된 층의  $e-\log P$  곡선은 반드시 그림 2.7과 같은 특이한 부위가 있다.

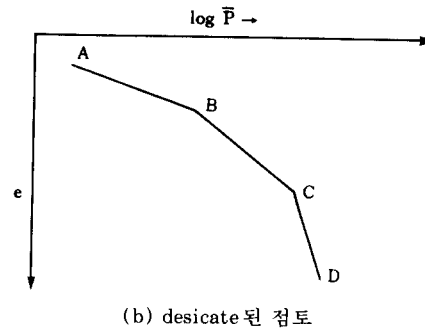
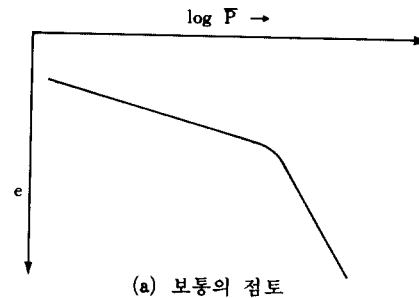


그림 2.7  $e-\log P$  곡선

그림 2.7(b)에서는 B점에서 Desiccation이 시작되었고, C점에서 완료되었다.

또한 desiccate된 층의 응력이력은 그림 2.8과 같다.

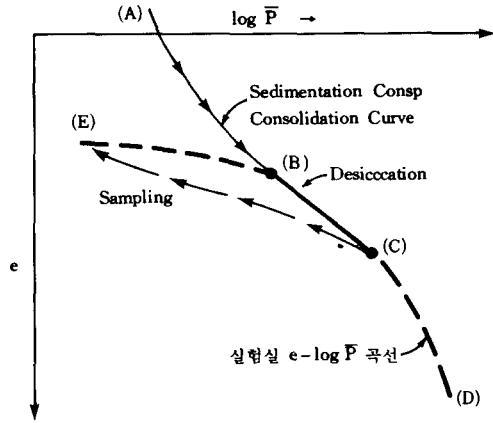


그림 2.8 Stress-history of a desiccated sediment.

여기서 BC는 거의 직선을 이루는데 어떤 경우에는 보통 압밀시험하중증가를 사용할때 3점 또는 4점으로 직선이 이루어진다. Blight의 실험은 곡선 ABC를 나타낸다. 따라서 대규모 공사에서는 퇴적 이력을 조사/분석하여 이해하는 것이 좋을 것이다.(Mahar and O'Neill : 1984, Song : 1984)

- 시료교란에 대하여 :

Swedish Foil Sampler(SFS)는 시료의 외부와 샘플러의 내면에서 발생하는 마찰을 제거하여 준다. X-Ray Radiograph로 SFS에 의한 채취시료와 Shelby tube에 의한 채취시료를 검사하면 그림 2.9와 같다.

따라서 시료의 교란 정도로 볼 때 SFS의 사용은 절실하다 하겠다.

- Fluidizer에 대하여 :

Fluidizer의 침강은 연약층의 분산성에 영향

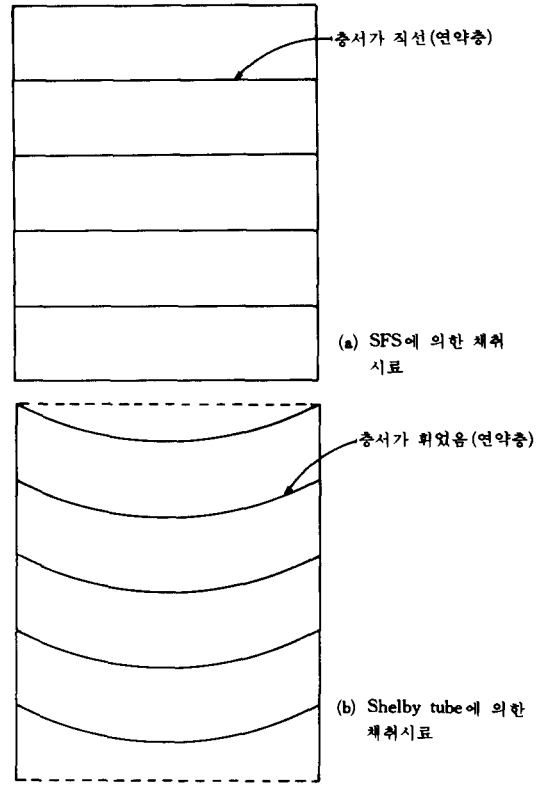


그림 2.9 시료 채취방법에 따른 시료교란

을 받는다.

예를 들어 연약층이 높은 분산성을 갖는다면 Fluidizer 파이프 하부에 그림 2.10과 같이 부착한 가는 공기 파이프를 사용할 수 있다.

이와 반대로 연약층의 상태가 비분산성이라면 그층을 기계적으로 교란시킨 후 네트워크를

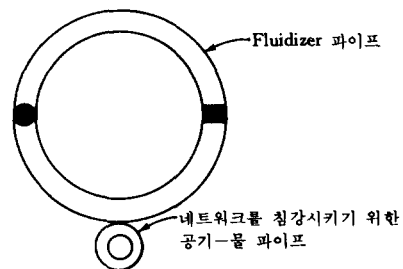


그림 2.10 Fluidizer 침강시스템

침강시킨다. Fluidizer법은 미국의 New Jersey와 Florida에서 세사층에 사용한 예가 있다. (Weisman et al., 1988)

## 참 고 문 헌

1. Burland, J.B., "On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clay", *Geotechnique*, 40, No.3 1990, pp.329-378.
2. Blight, G.E., "Strength Characteristics of Desiccated Clays," *J. Soil Mechanics and Foundations Div., Proc. ASCE*, Vol. 92, NoSM6, 1966, pp.19-37.
3. Mahar, L.J., and M.W. O'Neill, "Geotechnical Characterization of Desiccated Clay", *J.Geot. Engng., ASCE*, Vol. 109, No.1, 1983, pp.56-71.
4. Mahar, L.J. and M.W. O'Neill, Closure on Discussion on "Geotechnical Characterization of Desiccated Caly," *J.Geot. Engng., ASCE*, Vol. 110, No. 2, 1984, pp.304-305.
5. Song, B., Discussion on "Geotechnical Characterization of Desiccated Clay," *J. Geot. Engng, ASCE*, Vol, 110, No. 2, 1984, pp. 303.
6. Weisman, R.N., G.P. Lennon and E.W.Roberts, "Experiment on Fluidizatoin in Unbounded Domains," *J. Hydraulic Engng., ASCE*, Vol. 114, No5, 1988, pp.502-515.

### 1. 제3분과(연약지반처리) 토론내용 요약

좌 장 : 천병식\*1  
 토론자 : 김주범\*2  
           : 도덕현\*3  
           : 이문수\*4  
 서 기 : 문홍득\*5

\*1 정희원, 한양대학교 공과대학토목공학과 교수

\*2 정희원, 남원건설엔지니어링 부사장

\*3 정희원, 건국대학교 농과대학 농공학과 교수

\*4 정희원, 전남대학교 농과대학 농공학과 교수

\*5 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

### 1.1 좌장의 머릿말

오늘 발표된 논문 내용은 크게 4가지로 분류할 수 있는데 첫째, 접근 기법 및 내용에 따라 분류해 보면 vertical drain과 압성토 공법에 관한 내용, 현장계측, FEM 해석을 통한 압밀 특성 및 침하량 산정에 관한 내용. 그리고 발파, 동압밀 등 지반에 충격 및 진동을 주어 연약지반을 개량하는 공법, 그리고 현장시험 및 실내시험에 의한 전단강도의 비교 분석에 관한 내용 등 4가지로 분류할 수 있다. 둘째 적용된 연약지반처리 공법별로 구분해 보면 paper drain 공법 1편 preloading과 sand pile을 병용한 공법 1편, sand compaction pile을 적용한 공법 1편, 발파나 동압밀을 이용한 진동·충격에 의한 방법이 2편 등 총 6편이다. 발표논문의 특징이라면 대부분이 국내외 건설현장에서 집필자들이 직접 체험한 공법에 대해 현장계측 및 실험 그리고 FEM해석 등을 통하여 지반개량효과를 분석, 평가한 것으로서 집필자들의 성의 있는 원고 준비와 발표, 그리고 귀중한 자료제공에 좌장으로로서 심심한 감사를 드린다.

오늘 발표된 연약지반 처리공법 외에도 유효한 여러공법이 있는데 현재 국내에 적용되고 있는 공법중 일례로 양산-구포간 고속도로 건설 현장에 적용되고 있는 pack drain 공법은 sand drain공법을 개량한 공법으로서 gravel drain과 함께 일종의 vertical drain 공법이다. 이외에도 deep well, well point에 의한 배수공법, 생석회를 이용한 화학적 탈수공법, 심층혼합처리공법, 강제 고압분사 주입공법, 그리고 물유리, 우레탄 등 chemical grout에 의한 지반주입공법 등 여러가지 연약지반처리 공법이 있으나 이번 발표에서는 다루지 않았다.

최근 국내에서는 영종도 국제 신공항 건설, 군장 국가공단 사업지구 서해안 고속도로 건설 등 연약지반처리 문제를 안고 있는 대규모의 사업이 진행되고 있기 때문에 연약지반 처리에 관한 꾸준한 연구와 공법의 개발은 우리들이 해결해야 할 시급한 과제라 할 수 있다. 일본의 경우에는 칸사이(關西), 하네다(羽田), 나리타(成田) 국제공항 등이 소위 일본의 3대 국제공항 프로젝트로서 현재 확장 또는 새로이 건설 중에 있는데, 이들 대부분의 지역이 연약지반이다. 특히 하네다 국제공항의 경우는 일명 하네다 마요네즈층이라고 불리는 아주 연약한 지층으로 되어 있는데, 여기에는 수많은 공법이 적용되어 연약지반이 처리되고 있어서 연약지반처리 공법 박람회장이라 불리울 정도인데 큰 무리없이 진행되고 있는 것으로 알고 있다. 이와같이 연약지반처리는 건설공사에 있어서 빼놓을 수 없는 아주 중요한 분야이므로 회원 여러분들의 지속적인 관심과 노력을 부탁한다.

다음 세 토론자께 오늘 발표도중 또는 원고상의 의문·보완사항·제안사항이나 발표되지 않은 중요사항에 대한 토론을 해주시도록 부탁드린다.

## 1.2 토론내용

### 가. 일반사항

• 도덕현(건국대) : 오늘 발표된 내용은 크게 두 가지로 나눌 수가 있는데 수중에 성토재를 투하하여 자중압밀 시키는 방법과 동압밀이나 폭파공법을 이용하는 방법이라 할 수 있다. 특히 동압밀이나 폭파공법을 이용한 경우에는 지반의 액상화 문제에 상당한 신경을 써야 한다. 이 두가지 방법은 별개의 것이 아니고 서로 불가분의 관계인데 이 문제에 대한 보충설명을 하면 다음과 같다.

자중압밀 문제는 국내뿐 아니라 외국에서도 많은 연구와 발표가 있었고 최근 국내의 경우

건설, 매립, 인공섬 개발 등에 따라 많은 관심을 가지게 된 방법이다. 자중압밀이란 해저의 점토를 준설하여 매립지에 투입할 때와 같이 고함수비의 액상에 가까운 점토가 자중으로 압밀하는 현상이라 할 수 있다. 함수비 100% 혹은 액성지수(liquidity index, 상대함수비)가 3 이상인 상태에서는 우선 입자 혹은 그것이 응집한 플록(flock) 혹은 페드(ped)가 하나하나 수중에 침강한다. 이 상태에서는 흙의 골조가 아직 형성되어 있지 않기 때문에 압밀은 안되고 침전(sedimentation)하는 것이며 따라서 입경에 의한 분리가 다소 일어난다. 어느 정도 압밀이 증가하여 연속적인 흙의 골조가 형성되면 자중압밀의 단계로 들어간다. 압밀단계 초기에는 점토구조가 일체로 되어 거의 밀도가 변화하지 않고 수중에 침강하며, 저부에서 조밀하게 되어가는 침강(precipitation, settlement)과정이 있으며, 그 때의 표면 침하속도는 점토의 골조가 수중에 이동할 때의 투수저항(seepage resistance, drag) 혹은 침투력(seepage force)과 부력을 고려한 점토의 단위 체적중량,  $\gamma$ 가 평형을 이루는 속도이며 점토층 두께에 관계없이 오랜기간 일정하게 된다. 이 관계를 이용하여 매우 연약한 점토의  $\gamma$ 와 표면침하속도를 측정하여 투수계수를 구할 수 있다. 이 같이 자중압밀의 초기에는 압밀속도에 관한, 소위  $H^2$ 법칙(Law of H squared)이 성립하여 종래의 계산에 비해 시간-침하 곡선의 모양도 변하며 압밀속도는 대개 빨라진다. 이 같은 자중압밀 과정을 추정하는 방법으로서 ① 자중의 영향과 층두께의 감소를 고려한 미카사(三笠)의 압밀 방정식을 수치계산하여 구하거나 ②실제와 같이 자중응력 상태를 재현하는 원심력 모형실험(centrifuge model test)을 하는 방법등이 있다. 후자에 의하면 모형의 침하량이나 점토의 상태는 실물과 매우 相似의으로 되며, 압밀시간에 관한  $H^2$  법칙이 성립한다. 또 포화한 모래지반이 액상화를 일으킨 직후에는 침하거동도 빠른 자중압밀을 보이는 경우가 있다.

동압밀 공법은 거의 모든 지반에 적용가능한 공법이며 지중의 미지의 연약지반에도 중량의 하중으로 타격함으로써 안정화 시킬 수 있어 매우 효과적이며 외국의 경우에도 많이 이용되고 있어 국내에 많이 권장하고 싶은 공법이다. 특히 일본의 경우 점성토 지반에는 많이 이용되지 않으나 철도 건설시 모래나 Silt 지반에는 많이 이용되고 있다. 이러한 공법은 장래 지진 발생시 동반될 수 있는 액상화 방지 대책에 유용하리라 생각된다.

액상화 문제는 최근에 많이 연구되고 있는 테마로써 자세히 설명할 필요는 없지만 간단히 소개하면 다음과 같다. 액상화란 포화된 모래 지반에 갑작스런 충격하중이 가해지면 과잉간극수압이 증대되며 그 결과로 유효응력이 급격히 감소하여 0에 가까울 때를 초기 액상화 상태라 한다. 이와 같은 액상화의 위력은 대단하여 지반속의 과잉간극수압이 지반의 가장 약한 지점을 통해 샘(well)처럼 솟구치는 경우도 있다.

지반에 진동을 주면 수중에서의 흡입자는 처음에는 침강하고 다시 압밀되는 자중압밀 과정을 겪게 된다. 이와 같이 진동에 따른 자중압밀 과정은 동시에 발생하기 때문에 자중압밀과 진동을 함께 결부시켜 연구를 수행해야 한다.

● 이문수(전남대) : 발표하신 분들의 성의 있는 준비로 현장에서 얻은 귀중한 자료를 회원 여러분과 같이 공유하게 된 것을 대단히 기쁘게 생각한다.

#### 4. 연약지반 처리와 개량효과 평가사례

##### ● 김주범(남원 건설엔지니어링)

논문의 그림 11, 12를 살펴보면 현장시험에서 지반개량후의 전단강도가 개량전에 비해 3~5배 가량 증가하는데, 이는 국내의 경우 보통 약 2배 정도 증가하는 경우와 비교해 볼 때 상당한 개량 효과라 할 수 있겠다. 그러나 그림 13의 원추관입도에서는 심도 21~27m 사이에

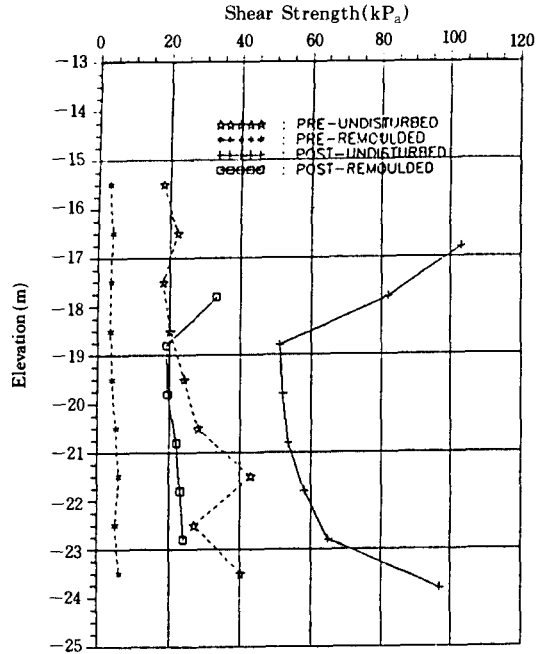


Fig. 11 Typical changes in vane strength profile due to soil improvement, SI-23(cf. 논문집 p.118)

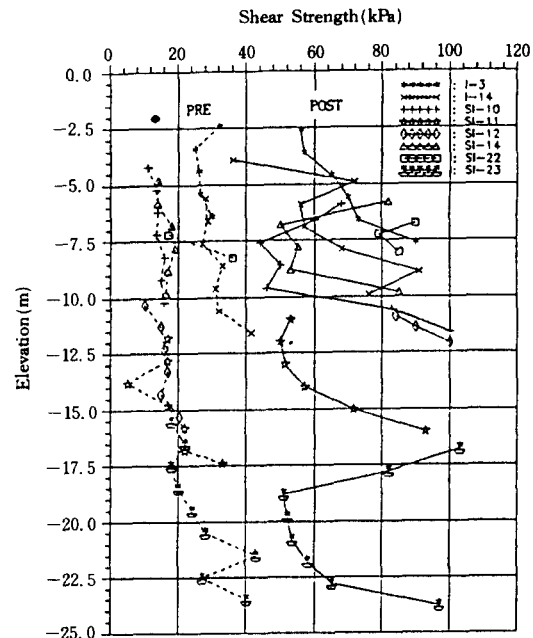


Fig. 12 Vane strength profiles before and after soil improvement(cf. 논문집 p.119)

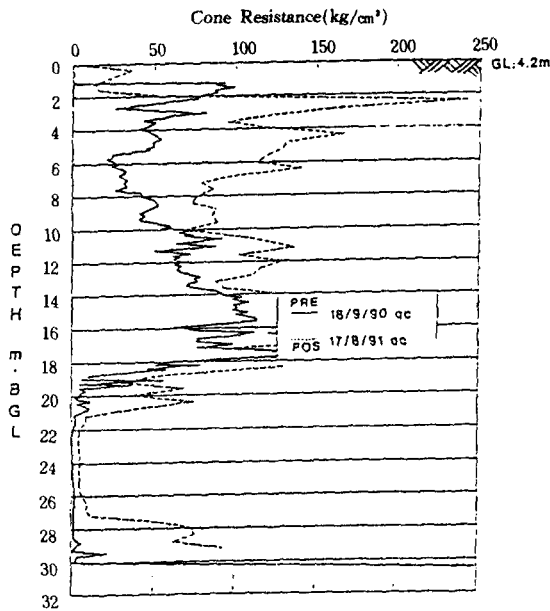


Fig. 13 Typical piezocone resistance profile showing the effect of soil improvement. SI-23. (cf. 논문집 p.119)

서 콘저항치의 증가량이 그림 11, 12와 비교 할 때 미미한 증가를 보이는 것으로 나타났다. 이는 의문시되는 사항인데 아마도 상부의 상재하중이 이 깊이까지는 미치지 않아 초래된 결과인 것으로 판단된다.

• 이영남(현대건설)답변 : dutch cone 시험 결과치에 관련된 내용으로 모래층의 cone저항치가 상당히 커서 상대적으로 연약층의 cone치가 아주 작게 보이는데 확대해서 보면 상당한 강도증가가 있음을 알 수 있다. 즉 pre dutch cone의 값은 거의 0에 가까운 값이고 past cone치는 거의  $5\text{kg/cm}^2$  이상으로 많은 강도 증가를 보였다.

• 도덕현(건국대) : 발표내용 중에서 한가지만 말씀드리면, 일반적으로 성토시공 후부터 어느 시점까지의 침하량 결정은 간극비나 시료 높이의 감소를 실내시험에서 구하여 장래 예상되는 침하량을 계산할 수가 있는데 발표시에는 쌍곡선법을 많이 이용 한다고 했다. 보통 평방근법, 아사오카법, 모덴법 등 여러가지 방법이

있는데 본 논문에서는 쌍곡선법만 고려했는지 아니면 다른 방법과 비교, 검토해서 가장 적절하다고 판단해서 사용한 것인지 의문이다.

• 이영남(현대건설)답변 : 쌍곡선법은 기존의 다른 방법과 비교해서 분석한 것은 아니고 여러 문헌에는 쌍곡선법이 결과를 가장 잘 예측해 준다고 보고되고 있기 때문에 적용한 것이다.

• 이문수(전남대) :

1) 그림 6의 깊이에 따른 선행압밀하중 변화 곡선에서 지하 12m 지점과 같이 타당성 없는 시험결과치는 재시험을 하여 타당성 있는 자료로 다시 나타내는 것이 좋겠다.

2) 본문 중 표2의 개량효과 평가에서 액성한계가 28% 감소 했는데 동일입도 상태에서 화학적 처리가 아닌 물리적인 처리에 의한 개량에서도 액성한계의 변화가 있을 수 있는지? 만약 있다면 소성한계의 변화는 왜 나타나지 않았는지? 강도의 평가에 있어서 20kPa에서 70kPa로 증대 되었는데 아주 바람직한 현상이라 할 수 있다. 이러한 현상은 preloading을 많이 재하하므로써 나올 수가 있겠는데 Skempton이 제시한  $Cu/\Delta p = 0.11 + 0.0037PI$ 라는 식과도 비교하여 타당성 있는 결과를 얻었는지?

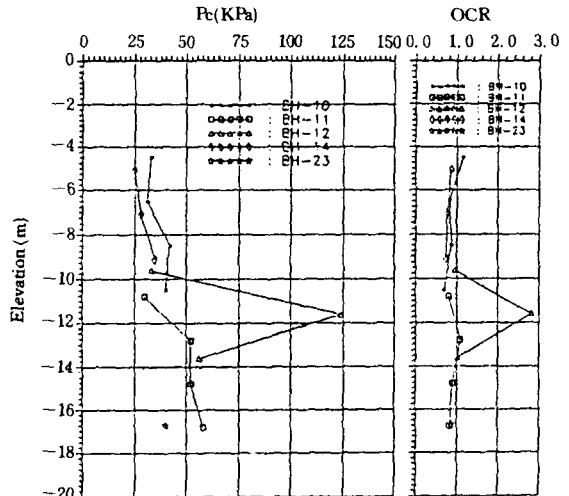


Fig. 6 Variation in pre-consolidation pressure and OCR with depth(cf. 논문집 p.115)

Table 2 Changes in Atterberg Limits due to Soil Improvement(cf. 논문집, p.119)

	Average Liquid Limit(%)	Average Plastic Limit(%)	Plasticity Index
Pre-Improvement	90.4	21.8	68.6
Post-Improvement	62.0	21.5	40.5

• 이영남(현대건설)답변 : 액성한계와 소성지수의 감소에 따른 소성한계의 불변에 관한 사항인데 본인의 판단으로는 결과 자체에는 문제가 없는 것으로 판단되며 다만 제시된 그림에서는 평균 값의 변화를 보여주고 있다. Skempton이 제시한 Cc 값과 액성한계와의 관계에서 Cc값이 감소했다고 하는 것은 액성한계 값도 감소할 수 있다는 것을 말해 주고 있다. 또한 PI 값도 감소한 것으로 나타나고 있는데 PI값은 강도와 관계가 있으므로 변화가 있어야 하지 않나 생각된다. 또한 Skempton이 제시한  $Cu/\Delta p = 0.11 + 0.0037 PI$  관계의 적용여부에 관한 질의이었는데 그림 12를 보면 지반개량후의 강도 profile 들이 중간층에는 낮게 나타나고 상·하부층에서는 크게 나타나고 있는데 상·하부층에는 어떠한 배수층이 존재하는 것으로 보이며 중간층의 경우는 압밀이 아직 덜 된 것으로 판단된다. 일관성 있는 결과를 도출하지 못할 것으로 판단되어 시도하지 않았다.

• 청중질문 :

1) 상부 silt나 sand 그리고 mat의 즉시침하(Ss)를 clay의 압밀침하(Sv)와 구별하여 압밀도를 평가함이 어떠한가?

2) 재하토 철거후 rebound에 대한 관측내용은? 그리고 이의 고려는 필요하지 않을까?

• 이영남(현대건설)답변 : 모래의 즉시침하와 연약지반의 압밀침하를 구분해서 계산하는 것이 적절하지 않을까의 질의이었는데 표에 제시된 것은 단지 지표면 침하의 경우만 제시한 것이고 실지분석시에는 deep settlement gage를 이용하여 시기를 결정하였고 분석시에는 두 개의 결과를 combine 시켜 고려하였기 때문에 문제

가 없는 것으로 생각된다. rebound량 측정에 관한 내용은 현장측정 결과가 있으나 본 논문에는 수록하지 않았으며 추후 원한다면 알려드릴 수 있다.

다. 현장계측 사례를 통한 압밀특성 평가

• 김주범(남원건설엔지니어링) : 인천 남동 지구는 지층이 상당히 복잡하게 퇴적되어 있다는 사실을 그림 2로 부터 알 수 있다. 압밀침하 특성분석시 퇴적된 연약지반층내의 모래층을 어떻게 적절히 처리해 줄 것인지의 여부가 중요하며 이러한 경우 효과적인 방법은 전체 압밀침하층 두께에서 모래층의 전 두께를 빼주는 것이 효과적이라 생각한다.

일반적으로 콘 관입 저항치가  $7\text{kg/cm}^2$  이상인 지역에서는 연약지반처리 효과가 별로 크지 않다고 보고 되고 있는 바, 콘 관입 시험치를 나타낸 그림 11에서  $qc = 10\text{kg/cm}^2$  이상되는 구간은 비록 연약층을 처리한다고 하더라도 침하량에는 그다지 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 따라서  $10\text{kg/cm}^2$  이상되는 지역은 처리 고려 대상에서 제외시키는 것이 좋을 것이라 생각된다.

• 이문수(전남대) :

1) 그림 7에서 응력 분포선과 간극 수압계의 위치를 고려한 과잉간극수압 분포를 살펴보면 1단계 하중재하가 끝난후 2단계 하중 재하시의

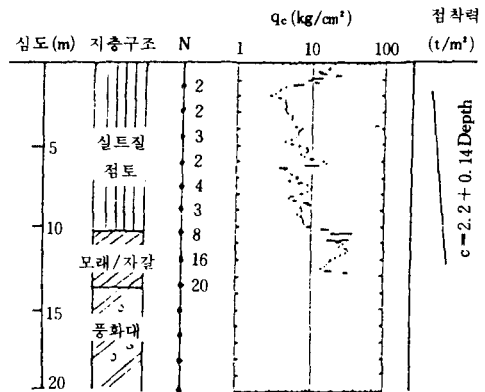
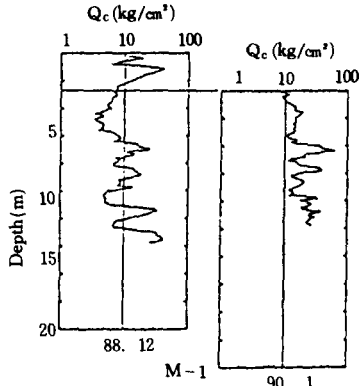
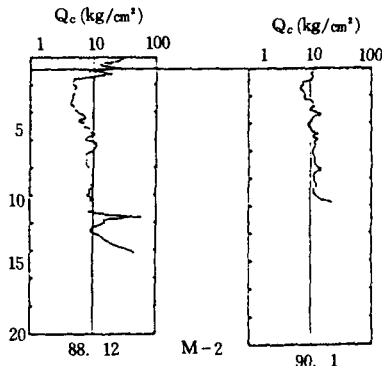


그림 2. 연약지반의 특성(cf. 논문집 p. 122)



(a) Sand pile 시공 지역

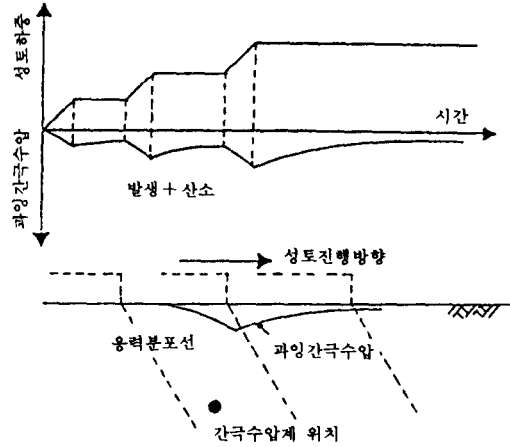


(b) Sand pile 미시공 지역

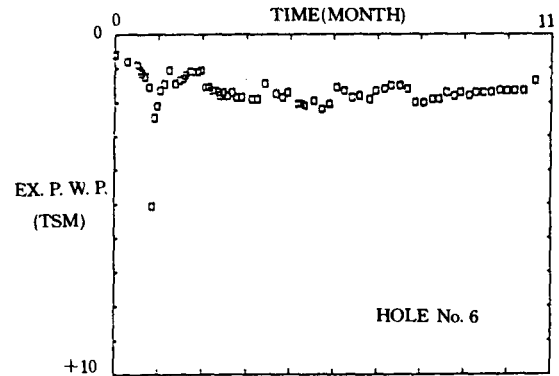
그림 11. 심도별 강도증가 현상 (cf. 논문집 p.127)

과잉간극수압의 분포는 점차증가하다가 다시 감소하는 형태를 보여주고 있는데 그림에서 3 단계 하중재하시의 간극수압 변화는 명확히 나타나지 않고 있다.

2) 표 4에서 실내시험의 압밀계수(0.01cm<sup>2</sup>/sec)와 현장계측에 의한 Cv값 사이에는 큰 차이가 있는데 이와같이 큰 차이가 날 때에는 두 시험방법 중 하나는 채택하지 못할 것이므로 이 때에는 다시 검증시험을 통하여 그 원인을 규명해야 할 것이다. 또한 침하에 의한 평가와 간극수압에 의한 평가는 후자가 전자보다 10~20배에 달하며 현장이 실험실보다 10~20배에 이르고 있다. 따라서 이에 대한 기준설정이 모호하며 method의 타당성에 의심이 간다.



(a) 현장과잉 간극수압의 발생양상



(b) 현장과잉 간극수압의 실제 측정에

그림 7. 현장시공상황을 고려한 과잉간극수압 (cf. 논문집 p. 125)

3) 일반적으로  $C_h = (5 \sim 10) C_v$ 는 인정된 사항인데 표 4에서는  $C_h = (2 \sim 3) C_v$ 로 나타나고 있어  $C_h$ 가 과소평가되고 있다.

표 4 여러가지 방법에 의한 압밀계수 비교

구 분	압밀계수(cm <sup>2</sup> /sec)		방향	비고
실내시험	침하자료	0.01	수직	Cv,lab
현장계측	침하자료	0.1-0.2	수직	Cv,fs
	간극수압자료	1.2(1.5-3)	수직	Cv,fp
현장계측	침하자료	0.2-0.3	수평	Ch,fs
	간극수압자료	2.4(3.5)	수평	Ch,fp

\*( )속의 숫자는  $\Delta u_0 = \Delta P$ 로 취한 경우임.



라. 발파공법에 의한 지반 개량의 작용원리

• 이문수(전남대) :

1) 우리 모두에게 아주 유익한 내용이라고 생각되며 수중발파의 mechanism에 대한 보충설명이 있었으면 하는 바램이다.

2) 본문의 내용중 발파는 폭약 설치지점에서 윗방향이나 수평방향으로 진행되는 경향이라고 하였던 바, 그림 1의 (b), (c)에서와 같이 폭약을 지표부근이나 수중에 장착 하는 것 보다 도(a) (d)와 같이 지중속에 깊이 장착하는 것이 유리할 것으로 판단되는데이에 대한 의견은?

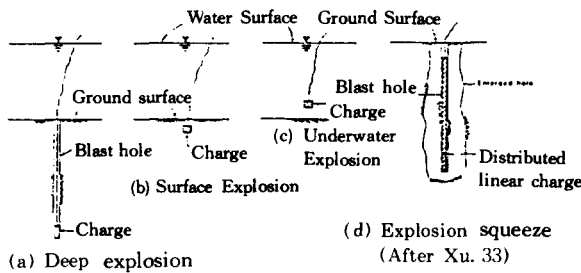


Fig.1 Methods of blast application for soil compaction(cf. 논문집 p.132)

3) 본문의 식 중에서(cf. 논문집 p. 132)

$$\tau + \Delta \tau \leq (\sigma + \Delta u + \Delta \sigma) \tan \phi \dots (1)$$

$$p = \Delta \sigma + \Delta u \dots (2)$$

위 두 식이 어떻게 지배방정식과 연결되는지?

그리고 layer-by-layer destruction of structure와의 관련성은?

4) 논문에서 그림 3의 수평거리 2.5m초과하면 연속발파에 의한 침하가 크지 않다고 하였는데 그림 2.5m 지점이 변곡점(inflexion point)은 될지라도 침하는 이점을 넘어서도 계속 크게 일어나고 있으므로 반대 현상이라고 생각된다.

5) Blasting 공법에 의한 검증사례 문제인데 상대밀도와 건조밀도, 관입저항치 또는 내부마찰각 등과의 관련성에 관한 외국의 사례나 연구실적, 실험성과 등이 있으면 소개해 주셨으면 한다.

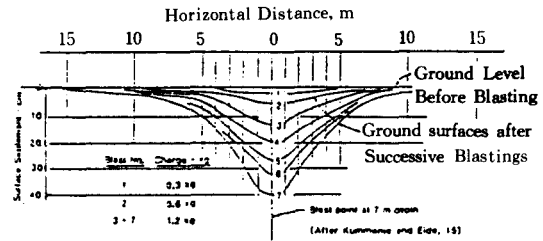


Fig.3 Surface settlement after successive blasts(cf. 논문집 p.134)

• 손근중(쓰일·파운데이션 시스템)답변 :  
The writer wishes to extend his appreciation to the members of the Discussion Panel and participants of the symposium for their keen interest in the subject matter. The writer extends special thanks to Prof. Moon-soo Lee who has done a thorough review of the paper and presented several worthy comments which are responded herein.

1), 2). Prof. Lee requested a supplemental treatise on the mechanism relating to surface explosion(Fig. 1-b) and underwater explosion (Fig. 1-c), Prof. Lee further indicated that Fig. 1-(a) and (d) would be more effective than Fig. 1-(b) and (c).

Mechanism effecting the ground improvement is the interaction between the impact and vibration generated by the blast action and the ground. The blast loading (impact and vibration) exerted to the ground depends on the source mechanism which in turn depends on the location of the charge with respect to the ground surface. The paper dealt primarily with deep explosion, Fig. 1-a, as noted in the paper. The source mechanism associated with deep explosion is more complex and the mechanism in both surface explosion and underwater explosion may be deduced from that of deep explosion.

The blast load application to the ground

in both surface explosion and underwater explosion may be conceived analogous to the impact and vibration caused by pounding in dynamic compaction in the sense that the loads are applied to the ground surface. In surface explosion, much smaller liquefaction zone would develop around the source compared to deep explosion, and dynamic flotation would be a more dominant factor than hydraulic fluidization leading to liquefaction because the gases formed by the blast escape instantly into the space outside the ground. As in the case of crater blast, the ground surface in the vicinity of the blast would be loosened in surface explosion.

It is possible to avoid liquefaction in underwater explosion by locating the charge at an appropriate height above the ground surface, while liquefaction is inevitable in surface explosion. Effective scaled distance and depth of the compaction zone will depend on the water depth available above the ground surface in both surface explosion and underwater explosion. Outside the liquefaction zone or in the absence of liquefaction, the compaction is attributable to elastic compression and relative displacement of particles described in the paper.

No reported cases of either surface explosion or underwater explosion are available outside Russia. Russian experiences (Ivanov, 1967) indicate that underwater explosion is more effective than surface explosion. This finding is in support of the point raised in the paper that liquefaction is not a benefit to soil densification.

The obvious advantage of both surface explosion and underwater explosion over deep explosion is in the insignificant cost and

simplicity of installation of explosive charges. As indicated by Prof. Lee, also in the paper, surface explosion and underwater explosion result in a significant waste of the energy, thus are much less effective than the other methods on the unit charge weight basis.

3) Prof. Lee requested clarification of Eqs. (1) and (2) and the relationship of the "layer-by-layer destruction of structure" with these equations.

These equations are the backbone of the concept of layer-by-layer destruction of structure put forth by Ivanov(10). His basis was that the intergranular normal stress at particle contacts,  $\sigma$ , increases with the effective vertical pressure and the prevailing shearing resistance to overcome in milliseconds delay blasts for initiation of liquefaction is reduced when the effective vertical pressure is reduced successively in layers from the top down. The pressure generated by blast,  $p$  in Eq. 2, is exponentially proportional to cubic root of the charge weight, and he demonstrated that its major portion is taken up by pore pressure. When  $\sigma$  is reduced, correspondingly smaller pore pressure is required to overcome the shearing resistance or to lead into liquefaction. It can be mathematically shown that a fraction of a concentrated blast charge weight is required in layer-by-layer blasts with milliseconds delays to accomplish liquefaction to the same extent. However, as cited in the paper, many of the case histories reported outside Russia did not confirm the validity of the concept of "layer-by-layer destruction of structure", and this is one of the main reasons which prompted the writer to pursue the mechan-

ism from a differing perspective in the paper.

4) In reference to Fig. 3, Prof. Lee indicated that ground settlement is still large beyond the 2.5m inflection point, although the paper indicates the settlement to be not large beyond the 2.5m limit in successive blasts.

Fig. 3 was taken from Kummeneje and Eide (15), and was interpreted by the writer as discussed in the paper. Other interpretations could be possible. The paper states in page 134 "b) The ground settlement beyond the beginning of convexity . . . is not significantly increased . . .". This is different from saying that the settlement is not large.

Regardless the difference in the literary expression, an important observation that can be made in Fig. 3 is that the settlement increment per blast is much larger within the concave portion (loosened zone) as compared to the area beyond the inflection point. The paper attributes the larger settlement increment within the concave portion to enlargement of the liquefied zone, but not to corresponding increase in compression of the soil mass.

5) Prof. Lee asked for examples of blast densification verification in terms of :

- a) relative density and dry density, and
- b) penetration resistance or angle of internal friction.

Any ground improvement work must be verified by suitable methods. Literature dealing with the verification techniques and results of blast-induced ground improvement is fairly extensive today.

a) In the beginning of blast application in the U.S.A., before the age of penetration

tests, in-place density was measured in excavated test pits and the results were expressed in terms of relative density (Lyman (19)). In recent years, the advances made in penetration testing, especially in cone penetration testing area, enable us to empirically determine the in-place relative density (Ref. Bridaud, J. and Miran, J-1991).

b) Again, penetration tests are commonly used for verification of ground improvement, and it is possible to empirically determine the angle of internal friction. The invention and improvement being made of flat dilatometer, combined with the capabilities of the new generation cone penetrometers, improve our ability to more reliably estimate the angle of internal friction in verification of blast-induced ground improvement.

The writer would like to take this opportunity to mention that the paper was regrettably narrowed in scope than originally contemplated due to the time constraint and space limitation. Many of important factors that appear to critically affect blast densification of ground, such as the initial void ratio, overburden pressure, and water depth, among others, could not be treated. However, the writer is comforted in a hope that paper may serve as a frame for attracting interest of others in this important area of deep in-place ground improvement technology, and generate more knowledge into filling the frame with essential details.

#### Reference

- Briaud, J., and Miran, J.(1991) "The Cone Penetrometer Test", The Federal Highway Administration Washington, D.C.

마. 동압밀 공법을 이용한 지반 개량사례 연구

• 김주범(남원건설엔지니어링) : piezometer 검측 결과 계측된 과잉간극수압은 그림 8에서와 같이 2단계에서 가장 크게 기록된 것으로 나타났는데 이는 중량(12 ton 이상)의 추로 타격한 경우 충격에너지가 상당한 거리 및 깊이까지 전달될 것이며 따라서 간극수압계를 매설한 위치는 누적되는 에너지로 인하여 다짐이 일어날 것이고 결과로 투수계수가 저하되어 과잉간극수압이 증가된 것으로 판단된다. 동압밀 공법은 개량심도가 크지 않은(10m 정도)지역에서는 좋은 공법이라 볼 수 없다.

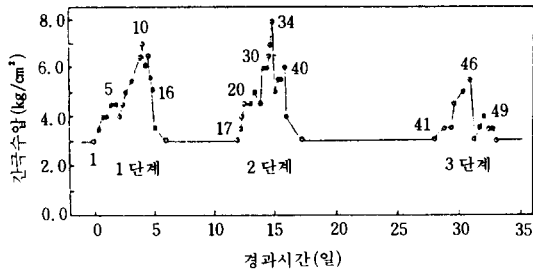


그림 8 간극수압 변화 예(P-2)(cf. 논문집 p.141)

• 도덕현(건국대) : 본인의 13년 경험으로 볼 때 토압계의 매설위치가 아주 중요하다고 생각된다. 즉 매설각도를 얼마나 적절하게 조정하는가에 따라 얼마나 정확한 값을 도출하느냐가 결정된다. 따라서 본 발표과제의 경우에서도 간극수압의 매설위치가 얼마나 적절한가에 대한 현실적인 검토가 필요하다고 생각된다. 또한 모든 현장에서 많은 계측기의 매설도 중요하지만 얼마나 적절하게 매설위치를 결정하느냐가 더욱 중요하다고 생각한다.

• 양정수(현대엔지니어링)답변 : 간극수압 변화 측정을 위해 piezometer를 8곳에 설치 했는데 어떠한 기준으로 설치해야 하는가의 문제인데 piezometer의 끝이 1개 위치(깊이)에만 설치되었기 때문에 깊이 변화에 따른 간극수압

변화를 알 수가 없었다. 압밀은 과잉간극수압과 깊은 관계가 있기 때문에 깊이에 따른 간극수압 변화를 알면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있겠지만 현장 여건상 측정이 어려웠다.

• 이문수(전남대) :

1) 그림 7의 타격순서와 관련하여 제2단계의 타격순서 36번은 34번의 타격지점과 비교하여 Piezometer 설치 위치에서 더 가깝기 때문에 간극수압이 보다 큰 값을 보일 것으로 판단된다. 그러나 그림 8에서는 더 작게 나타나고 있는데 이에 대한 의견은?

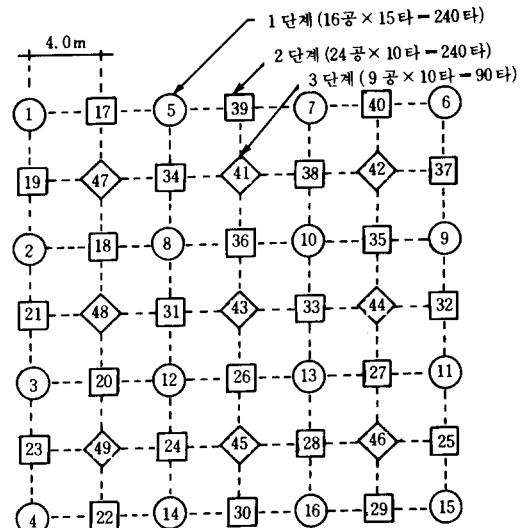


그림 7 Piezometer 설치 평면도 및 타격순서(cf. 논문집 p.141)

2) 향후의 연구과제로 타격당 에너지에 의한 개량심도, 단위면적당 에너지에 대한 개량정도(강도증가)등 타격당 에너지를 변경하여 개량심도의 변화과정을 분석하는 연구도 수행되었으면 한다.

3) Dynamic consolidation의 mechanism에 대한 설명이 여러 회원들을 위해 자세히 제시 되었으면 한다. 특히 간극수압의 소산에 의한 압밀변화와 관점에서 포화토나 불포화토, 점성토나 사질토 등으로 나누어 자세한 설명이 있

있으면 한다.

• 양정수(현대엔지니어링)답변 : 타격순서 34번 위치보다 36번 위치가 더 크게 나타나야 할 것으로 생각되는데 그림에서는 단지 현장계측 결과를 그대로 제시한 것으로 추후 세밀한 검토가 필요하다고 생각된다.

• 청중질문 : 발표내용중 제 4주제와 관련된 사항으로 모래와 점토가 상·하 토층을 이룬 지역의 동압밀 적용에 참고하고자 질의합니다. 그림 9에서 동압밀 적용이후 중간퇴적토층인 ML 층의 N치가 감소된 것으로 관측되었는데, 이것은 타격 에너지에 의한 교란 때문인지? 만약 교란에 의한 강도 저하일 경우 장기적으로 관측한 결과가 있는지와 점토층에 과잉간축수압이 도입되어 압밀침하가 발생할 경우에 장기적으로 문제가 될 소지는 없는지 궁금합니다.

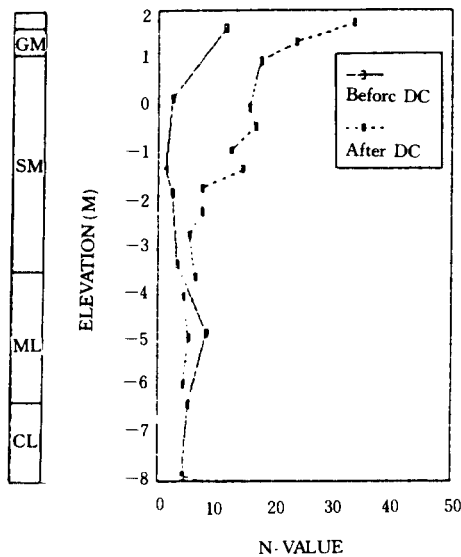


그림 9 개량 전후의 N치(시추공 No.3-3)(cf. 논문집 p.142)

• 양정수(현대엔지니어링)답변 : 그림 9에서는 개량점의 N치와 개량후의 N치를 비교해서 제시하였는데 아래부분에는 개량후의 N치가 더 작게 나타나고 있다. 여기에는 개량효과를

분석하기 위해 SPT 시험에 의한 N치로써 비교하였는데 잘 맞지 않은 것 같으며 아래부분의 교란된 부분의 N치값 차이는 1~2정도로 같다고 볼 수 있으며 윗부분은 개량효과가 뚜렷이 나타나고 있다.

바. 연약 지반에 대한 현장시험 적용에 관한 연구

• 김주범(남원건설엔지니어링) : 논문의 5개 조사지역중 오산과 일산의 경우 N치 및 qc값을 살펴보면 일반적으로 알고 있는 연약지반의 범위를 벗어나고 있다. 즉 N치 및 qc의 값이 각각 20, 2.5 kg/cm<sup>2</sup> 까지 나타나고 있는데, 이러한 지반을 연약지반으로 보기는 어렵다. 경험으로 볼 때 일반적으로 N치는 4, qc의 값은 0.3 kg/cm<sup>2</sup> 이하일 때 연약지반으로 분류되었으며 평균치는 0.2 kg/cm<sup>2</sup> 정도이다. 특이한 것은 최근에 알게된 사실로 0.6 kg/cm<sup>2</sup> (인천 새만금지구)까지 나타난 경우도 있었다.

• 도덕현(건국대) : 많은 경우 발표 논문에서는 실내시험 결과와 현장시험 결과를 서로 match시키려는 노력을 하고 있는데, 여기에는 실내시험 결과가 현장의 시험결과보다 크던지 아니면 그 반대인 경우이다. 이와 같이 두 시험 결과사이에 차이가 날 경우에는 그 원인 규명과 함께 결과를 보완하여 현장에 적용을 해야 한다. 그러나 본 논문에서의 대부분의 결과는 현장시험치가 실내시험치보다 큰 것으로 발표되었는데 바람직한 것인지?

• 이문수(전남대) : 일반적으로 시료채취, 추출, 시험기에 정치할 때의 시료의 교란으로 인하여 강도가 저하되기 때문에 실험실의 강도는 현장의 강도보다 훨씬 작게 나타난다. 심지어 현장의 상태를 아주 잘 재현한다고 하는 삼축 압축시험에서도 현장강도의 50~60%밖에 도출되지 않는다는 결과들과 비교할 때 본문의 그림 2에서 CPT, FVT, DMT 결과와 현장시험치는 45°선을 기준으로 실내 및 현장시험 결과치들이 모아지고 있는데 이것은 실내시험 결과를 과대평가하고 있다고 보며 이 값들을

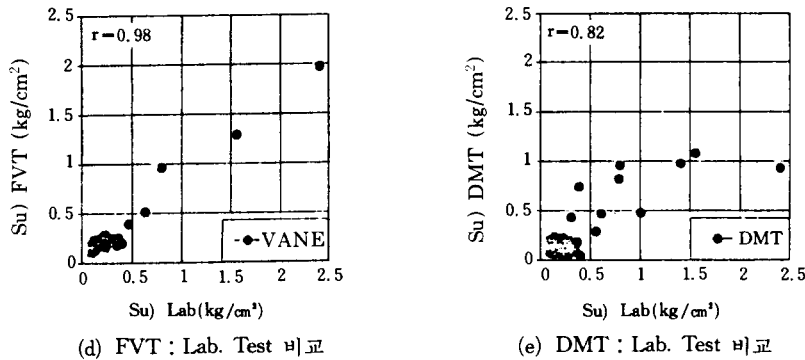
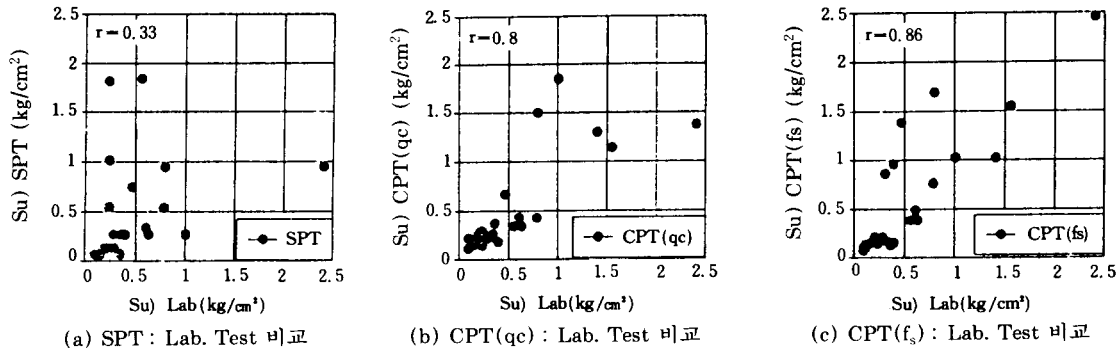


그림 2 현장시험과 실내시험의 전단강도 비교(cf. 논문집 p.147)

현장에 직접 쓰기 위해서는 보다 더 검증이 필요하다고 판단된다.

사. 현장 계측을 이용한 호안의 침하 및 안정성의 평가

• 김주범(남원건설엔지니어링) : 그림 3에서 지반 개량률이 70%인 호안의 외측 A, B점의 침하량(80cm 정도)은 개량률 27%인 호안의 내측 D, E, F점의 침하량(1.7m 정도)의 약 절반 정도인데 비해 측방변위는 양측에서 크게 차이가 없는 것으로 계측되었다. 이러한 경우 경제적인 면에서 27%의 개량으로 80cm 정도의 침하량을 유발시킨 후 다시 상재하중으로 토량을 재하한 후 잔류침하량을 기대하는 경우와 처음부터 70%의 개량률을 목표로 하는 경우의 경제성을 비교, 분석해야 할 것이다.

참고로 연약지반 조사시 고려해야 할 중요한

점 한가지를 말씀드리면 조사지반의 지형, 지세를 반드시 확인한 후 퇴적상태를 판단해야 한다는 것이다. 예를 들면 김해고속도로 건설 지역에는 넓은 지역에 걸쳐 연약층이 분포하고 있는데 이 중에서 낙동강 분류-불암교-김해를 잇는 지역의 지층은 서로 완전히 다른 퇴적상태를 보여주고 있다. 이것은 지형이 퇴적상태에 중요한 영향을 미쳤기 때문이다. 따라서 지반조사는 성급한 판단보다는 주변의 지형, 지물, 지세, 하천연장, 구배 등을 종합적으로 조사하여 판단하여야 한다.

• 도덕현(건국대) : 실내 시험시 시료의 교란 문제를 어떻게 처리해 줄 것인가에 대한 사항이다. 예를 들어 지하 10m의 지중에서 불교란 시료를 채취하여 지상으로 꺼냈을 때 시료는 팽창을 하게 된다. 실험실에서는 이와 같이 팽창된 시료를 현장의 원래 상태로 만든후 실험

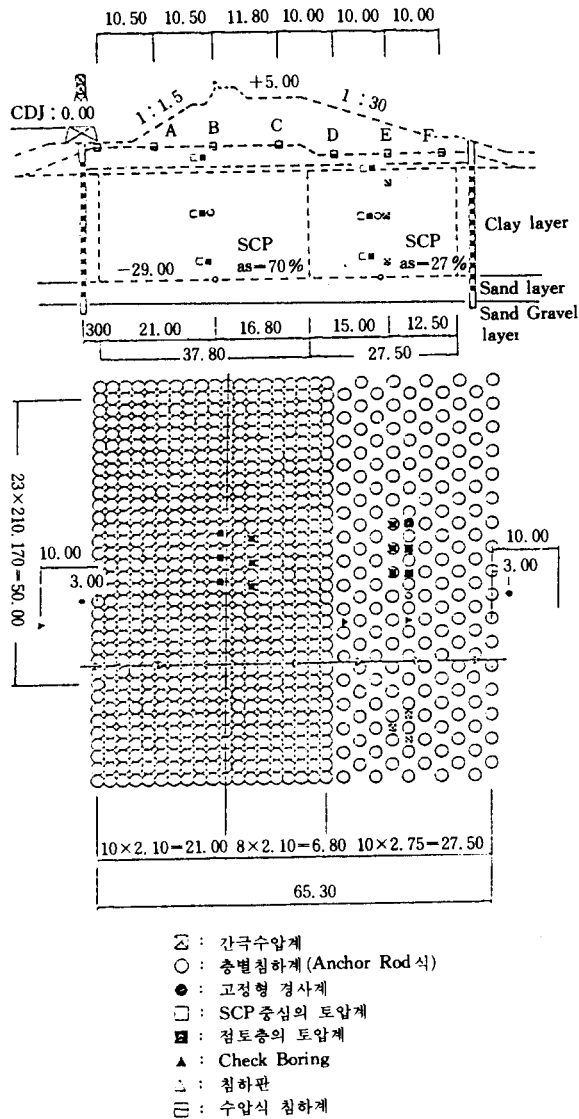


그림 3 계측기 설치단면도 및 평면도(cf. 논문집 151)

을 실시하여야 한다. 외국의 경우 이것을 seating 하중이라고 하는데 경험적으로 0.05~0.15kg/cm<sup>2</sup>의 하중을 24시간 재하하여 재압밀시켜 지중에서와 같은 조건을 만들어 준후 시험을 하게 된다.

• 이문수(전남대) :

1)대상현장을 70% 치환한다고 하면 더 이상 연약지반이 아니라고 생각되므로 압밀이론을 적용하는 것은 무리가 있다고 생각된다. 따라서 70% 치환 부분은 sand drain(sand compaction pile)보다는 이 지반을 비등방 재료로 보아 Joint Element Method를 적용하여 FEM 해석을 실시하면 실측치와 해석치 사이에 좋은 일치된 결과를 얻을 것으로 생각된다.

2)표 2의 Modified Cam-Clay model에 필요한 입력 데이터(매개변수)를 보면 수정을 요하는 부분이 있으므로 수정을 요함.

3)27% 치환 부분의 sand compaction pile에서는 응력비  $n = \sigma_s / \sigma_c$ 도 고려의 대상이 되지만 오히려 smear effect에 의한 응력 지연현상이 더 큰 인자라고 판단되며 이 영향을 무시하고 FEM 해석을 하는 것은 다소 무리가 있다고 판단되는데 이에 대한 의견은?

### 참 고 문 헌

1. 한국지반공학회 "92년도 가을 학술발표회 논문집, 준설·매립·인공섬," 1992. 10.
2. Briand, J., and J. Miran, "The Cone Penetrometer Test," The Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1991.