

고결된 Engineered Soils의 탄성과 특성

Elastic Wave Characteristics in Cemented Engineered Soils

이 창 호¹ Lee, Changho

윤 형 구² Yoon, Hyung-Koo

이 우 진³ Lee, Woojin

이 중 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

Behaviors of cemented engineered soils, composed of rigid sand particle and soft rubber particle, are investigated under K_0 condition. The uncemented and cemented specimens are prepared with various sand volume fractions to estimate the effect of the cementation in mixtures. The vertical deformation and elastic wave velocities with vertical stress are measured. The bender elements and PZT sensors are used to measure elastic wave velocities. After cementation, the slope of vertical strain shows bilinear and is similar to that of uncemented specimen after decementation. Normalized vertical strains can be divided into capillary force, cementation, and decementation region. The first deflection of the shear wave in near field matches the first arrival of the primary wave. The elastic wave velocities dramatically increase due to cementation hardening under the fixed vertical stress, and are almost identical with additional stress. After decementation, the elastic wave velocities increase with increase in the vertical stress. The effect of cementation hinders the typical rubber-like, sand-like, and transition behaviors observed in uncemented specimens. Different mechanism can be expected in decementation of the rigid-soft particle mixtures due to the sand fraction: a shape change of individual particles in low sand fraction specimens; a fabric change between particles in high sand fraction specimens. This study suggests that behaviors of cemented engineered soils, composed of rigid-soft particles, are distinguished due to the cementation and decementation from those of uncemented specimens.

요 지

단단한 모래 입자와 연약한 고무 입자로 이루어진 Engineered soils을 고결화 시킨 후 K_0 상태에서의 거동 특성을 분석하였다. 고결화 효과에 따른 영향 및 모래부피비에 따른 영향을 파악하기 위하여 다양한 모래부피비를 가지는 비고결화 및 고결화 시료를 준비하여, 수직 응력에 따른 변형 및 탄성과 속도를 측정하였다. 탄성과 속도 측정은 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트를 이용하였다. 고결화 이 후 응력에 따른 수직 변형율의 기울기는 이중 선형 관계를 보이며 고결화 결합 파괴 이후에는 비고결화 시료와 비슷한 기울기를 가진다. 정규화된 수직 변형량은 응력에 따라 capillary force, cementation, decementation 구간으로 나눌 수 있다. 근접장 내에서 측정된 전단파 신호의 첫 번째 움직임은 압축파의 도달과 일치하였다. 고결화에 의해 탄성과 속도는 수직 응력의 증가 없이 급격한 증가를 보였으며, 고결화 이후 추가적인 응력 증가에도 일정한 값을 보였다. 고결화 파괴 후 지속적인 수직 응력의 증가에 따라 탄성과 속도는 증가하였다. 고결화는 비고결화 시료에서 나타나는 유사고무, 유사모래, 전이 3가지의 거동을 방해한다. 고무-모래 혼합재의 고결화 결합의 파괴 메커니즘은 모래부피비에 따라 다르며 낮은 모래부피비의 시료는 입자 모양의

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사 후 연구원 (Members, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Members, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수 (Members, Assistant Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

변화가, 높은 모래부피비 시료에서는 입자 구조의 변화가 고결화 결합의 파괴가 주요한 원인이다. 본 연구를 통해 연약한 고무 입자와 단단한 모래 입자의 혼합체인 Engineered soils의 거동은 고결화 및 고결화 파괴에 따라 비고결화 시료와 구분됨을 알 수 있었다.

Keywords : Cementation, Decementation, P-wave, Rigid-soft particle mixtures, S-wave

1. 서론

고결화는 입자와 입자 사이의 접촉 면적을 증가시키며 개별 입자들을 하나로 결합시켜, 강도 및 강성, 물리적 특성, 그리고 미소 변형을 거동 등을 포함한 흙의 특성에 상당한 영향을 미친다. 따라서, 기초의 설계, 사면의 안정성 평가, 그리고 액상화 예측 등을 수행할 때 이러한 고결화 효과를 고려해야 한다.

일반적으로 자연 상태에서 고결화는 아열대 및 열대 지방에서 주로 발생하며, 고결화에 의하여 부분적으로 증가한 흙의 강도 및 강성은 풍화 및 침식에 의해 경이로운 자연 경관을 만들기도 한다. 자연 상태의 고결화된 흙에 대한 실험은 시료 채취 과정 및 현장 실험 장비의 관입에 의한 고결화 효과의 파괴로 인하여 매우 어려워, 고결화에 관한 많은 연구는 인공적으로 시료를 고결화를 시킨 후 다양한 실내 실험을 통하여 고결화된 흙의 거동 특성을 파악하는 것이 일반적인 방법이다(Airey 1993; Baig et al. 1997; Coop and Atkinson 1993; Fernandez and Santamarina 2001; Ismail et al. 2002; Yun and Santamarina 2005).

일반적으로 건설 및 토목 분야에 사용되는 고품 폐기물로는 파쇄 유리, 고로 슬래그, 그리고 페타이어 등이 있으며, 그 중 페타이어가 가장 대표적이라 할 수 있다. 이러한 페타이어의 활용 분야로는 경량 뒷채움재(Ahmed and Lovell 1993), 고속도로 교대(Bosscher et al. 1997), 보강토 옹벽(Garga and O'Shaughnessy 2000), 그리고 아스팔트 포장 재료(Eliazar and Barlaz 1992), 그리고 도로 건설(Tweedie et al. 1998; Lee et al. 1999; Feng and Sutter 2001; Zornberg et al. 2004) 등이 있다.

흙과 재료의 물리적 특성이 매우 다른 연약한 고무 입자의 추가는 혼합체의 전단 강도 및 강성, 투수성, 밀도, 비중을 감소시키는 반면에 감쇄 및 압축성을 증가시켜 흙 고유의 특성을 변화시킨다. 따라서 혼합체 내의 강성과 힘 전달 체계 역시 다르며 상대적으로 단단한 모래 입자는 하중 전달을, 연약한 고무 입자는 비틀

어짐 방지 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(Lee et al. 2006). 고결화는 입자들 사이의 접촉점에 미세한 결합을 발생시켜 이러한 고무-모래 혼합체인 Engineered Soil의 거동 특성에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되나, 현재까지 연구는 비고결화(uncemented) 상태의 고무-모래의 혼합체에 관한 연구가 주류를 이루었으며, 고무-모래 혼합재료의 고결화 거동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 단단한 모래입자와 연약한 고무입자로 이루어진 혼합체를 고결화(cemented) 시킨 후 K_v 구속 상태에서의 거동 특성을 분석하였다. 모래 함유량 또는 고무 함유량에 따른 거동 특성 파악을 위하여 다양한 모래부피비(sand volume fraction)를 가지는 시료를 준비하였으며 고결화 정도에 따른 영향을 연구하였다. 미소 변형을 상태의 거동을 평가하기 위하여 K_v 구속 상태에서 응력 수준에 따라 탄성과 속도를 측정하였다.

2. 고결화 효과에 따른 미소 변형을 거동

고결화 효과에 의한 흙의 거동은 고결화 작용제(cementation agent)의 종류와 양, 시료의 입도 분포, 밀도, 그리고 고결화 시 구속 응력의 크기 및 고결화 시간 등에 영향을 받는다고 알려져 있다(Acar and El-Tahir 1986; Baig et al. 1997 Clough et al. 1981; Ismail et al. 2002; Saxena et al. 1988). 입상 재료의 거동은 간극비, packing, coordination number 등 입자 접촉 특성에 의해 지배 받는다. 고결화 작용제는 각각의 입자 주위를 둘러싸 입자 접촉 면적을 증가시켜 이러한 입자의 접촉 거동에 영향을 미친다(Santamarina et al. 2001).

고결화된 흙은 강성 반응에 따라 낮은 응력에서의 고결화 지배 구간(cementation-controlled region)과 높은 응력 아래에서 응력 지배 구간(stress-controlled region)으로 나눌 수 있다. 고결화된 흙(cemented soils or bonded soils)은 입상 물질(particulate materials)보다 합성 물질(composite material)처럼 거동하기 때문에 고결화 효과는 낮은 구속

응력조건에서 강도 및 강성의 현저한 변화를 보여, 응력 변화에 따른 파 전달 속도의 변화가 매우 제한된다(Fernandez and Santamarina 2001). 구속응력이 증가함에 따라 고결화 효과는 파괴(decementation)되며, 고결화 파괴 이후 흙의 거동은 구속 응력에 의해 지배 받는다. 고결화 지배 구간과 응력 지배구간 사이의 전이 응력은 고결화 작용제의 양에 따라 결정된다(Saxena et al. 1988; Dass et al. 1994; Baig et al. 1997).

3. 실내 실험

3.1 실험 재료

고무-모래 혼합재는 단단하고 모나며 균등한 주문진 모래 입자와 연약한 분쇄 타이어 분말 고무 입자가 혼합된 상태이다. 각 모래 및 고무 입자의 크기 비에 따른 영향을 최소화 하기 위하여 사전 체가름 실험으로 분류된($D = 0.60 \sim 0.85\text{mm}$) 평균 유효 입경 $D_{50} = 0.725\text{mm}$ 를 가지는 모래 및 고무 입자로 시료를 조성하였다($D_{\text{sand}}/D_{\text{rubber}} \approx 1$): 주문진 모래(모나며 균질, $e_{\text{min}} = 0.60$, $e_{\text{max}} = 0.87$, $G_s = 2.62$); 고무 분말(모나며 불규칙 모양, $G_s = 1.15 \sim 1.17$). 모래는 수세식 체분석을 실시하였으며 체분석 이후 완전히 건조시킨 후 시료 조성에 이용하였다. 사용된 모래와 고무 입자의 재료적 특성 및 사진은 표 1과 같다.



3.2 시료 준비

모래부피비(sand volume fraction)가 $sf = V_{\text{sand}}/V_{\text{total}}$: 0(고무), 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 그리고 1.0(모래)의 7가지 시료를 준비하였다. 고결화 시료를 조성하기 위하여 건조 모래-고무 혼합재에 20g의 증류수와 동일한 양인 20g의 1종 포틀랜드 시멘트를 용기에 넣고 약 5분간 혼합하였다(물-시멘트 비=1). 각 입자와 물 그리고 시멘트가 완전히 혼합된 이후, 시료를 내경 74mm, 높이 63mm, 그리고 두께 16mm를 가지는 압밀셀에 재료 분리에 유의하면서 4개의 층으로 시료를 조성하였다. 각 층의 무게는 동일하게 유지하였으며, 탬핑(tamping) 방법을 이용하여 동일한 에너지를 각 층에 가하였다. 셀에 시료 조성을 완료하고, 상부캡을 설치한 후 시료의 초기 상태 결정을 위하여 초기 시료 높이를 측정하였다.

3.3 실험 과정

준비된 시료에 대하여 각각 재하, 제하, 그리고 재재하 실험을 실시하였다. 하중 증가 및 감소는 각 하중 단계별로 2배씩 유지하였으며, 각 하중 단계는 30분 동안 지속하였다. 고결화 시료는 시료가 경화되기 이전에 약 21kPa까지 수직 응력을 증가시킨 후 21kPa의 양생 수직 응력(σ_{sit})에서 72시간 양생을 실시하였다. 최대 수직 응력의 크기는 630kPa이며, 각 하중 단계별로 시료

표 1. 분쇄 타이어 분말 고무와 모래의 재료적 특성

재료적 특성	고무	주문진모래 (20/30)
비중	1.15~1.16	2.62
전단탄성계수 [MPa]*	1	≈100
포아송 비*	0.49	0.3
D_{50} [mm]	0.72	0.72
e_{max}	-	0.87
e_{min}	-	0.60
밀도 [g/cm^3]	0.53	1.67
사진	 0.5mm	 0.5mm

Note: * value relevant to the material that makes the particles

의 간극비와 탄성과 이동 거리를 결정하기 위하여 시료의 수직 변위를 측정하였다. 탄성과 및 수직 변위는 다음 하중 단계 재하 및 재하 직전에 측정하였다.

3.4 탄성과 측정

본 연구에서 적용한 탄성과 측정 트랜스듀서는 PZT (Piezo Zirconite Titanate) 재료로써 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트를 사용하였다. 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트는 홀트랜스듀서의 접촉 특성 및 적절한 작동 주파수로 인하여 토질 실험에 널리 이용되는 탄성과 트랜스듀서이다. 전단파(shear wave: S-wave) 측정을 위한 트랜스듀서로 벤더 엘리먼트(Piezo Systems PSI5H4E T226-H4-Y)를 이용하였으며, 압축파(primary wave: P-wave)의 발생 및 탐지를 위한 트랜스듀서로는 PZT 엘리먼트(Kangseo EST, BPE-20C)를 이용하였다. 벤더 엘리먼트 및 PZT 엘리먼트는 극화된 압전 물질 및 금속판으로 이루어져있다. 그림 1(a)와 같이 셀을 통한 직접파의 전달을 피하기 위하여 벤더 엘리먼트를 나일론 재질의 스크류 속에 고정하였다. 실험에 사용된 벤더 엘리먼트의 크기는 11.0×4.0×0.6 (길이×너비×두께, mm)이다. 시료 속으로 돌출된 외팔보의 길이는 6mm이다. PZT 엘리먼트는 그림 1(b)와 같이 원형의 금속판의 한쪽 면에 압전 소자가 덮여 있는 형태이며 압전 소자의 직경은 14mm, 센서 직경은 20mm, 그리고 두께는 0.45mm이다. PZT 엘리먼트 역시 직접파의 전달을 피하기 위하여 셀과 임피던스가 차이가 큰 재료를 사용하여 고정하였다. 실험에 사용한 모든 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트는 에폭시를 이용하여 방수 처리를 하였으며, 발신기와 수신기 사이의 전기적 간섭 현상인 누화현상(crosstalk)을 방지하기 위하여 전도성 페인트 및 접지로 차폐를 실시하였다.

PZT 엘리먼트와 벤더 엘리먼트 실험에서 압축파 및 전단파 속도는 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{P(or S)} = L_{P(or S)} / t_{P(or S)} \quad (1)$$

여기서, $L_{P(or S)}$ = 발신기와 수신기의 끝단 간 거리(Dyvik and Madshus 1985; Viggiani and Atkinson 1995); $t_{P(or S)}$ = 시료를 통한 압축파 또는 전단파의 이동 시간이다. 탄성과 속도의 초동 도달 시점은 zero after first bump점을 이용하였다(Lee and Santamarina 2005). 압축파 및 전단파는 10⁻³% 정도의 미소 변형율로 전파되므로 압축파와 전단파의 측정 동안 고결화 결합의 파괴는 발생하지 않

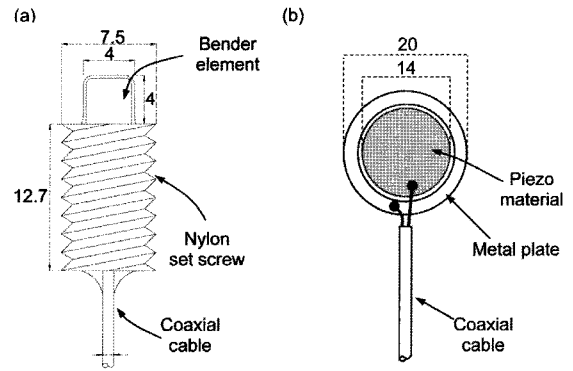


그림 1. 탄성과 트랜스듀서: (a) 벤더 엘리먼트 (b) PZT 엘리먼트. 그림내 숫자의 단위는mm 이다.

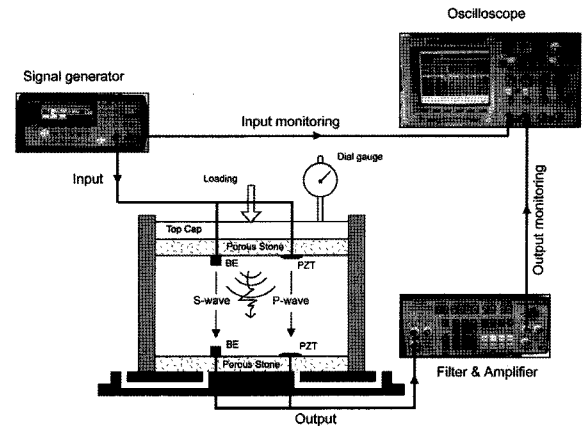


그림 2. 압밀셀 및 탄성과 측정을 위한 주변 장치

는다. 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트는 압밀셀의 상부 및 하부에 설치하였으며 연직 방향을 따라 투과법으로 측정하였다.

탄성과 측정은 신호발생기(Agilent 33220A)로부터 발생된 단일정현파를 입력 신호로 사용하였다. 발신 벤더 엘리먼트 및 PZT 엘리먼트로부터 생성된 전단파 및 압축파는 시료를 통과하여 수신기에서 획득되고 전기적 신호로 전환된다. 획득된 전기적 신호는 Filter & Amplifier (Krohn-Hite Model 3364)를 이용하여 신호의 잡음 제거와 증폭을 실시하였다. 처리된 신호는 디지털 오실로스코프(Agilent 54624A)로 저장하였다(그림 2). 임의의 부정확한 잡음(random and uncorrected noise)을 제거하기 위하여 1024개의 신호를 평균하였다.

4. 실험 결과 분석

4.1 수직 변형(횡방향 구속 K₀ 상태)

비고결화 및 고결화 된 모래부피비 0.2 및 0.8 시료의

응력-수직 변형 관계(K_0 상태)를 그림 3에 나타내었다. 비고결화 시료의 경우, 수직 응력이 증가함에 따라 수직 변형은 커졌으며, 수직 변형의 크기는 모래부피비가 작을수록 큰 값을 보였다. 또한 하중 제하 이후 모래부피비에 관계 없이 잔류 변형이 관찰되었으며, 모래부피비가 작은 시료일수록 큰 잔류 변형을 보였다. 고결화 시료의 경우, 고결화 이전의 낮은 수직 응력 수준에서는 비고결화 시료와 유사한 거동을 보였다. 그러나, 고결화 이후 고결화 결합이 파괴 될 때까지 매우 작은 변형을 증가를 보인다. 수직 변형율에 따르면 모래부피비 0.2 시료의 경우 약 90kPa에서, 모래부피비 0.8 시료의 경우 약 240kPa에서 고결화 파괴(decementation) 현상을 보인다. 고결화 결합 파괴 응력에 도달한 시료는 상당한 크기의 수직 변형율의 증가가 관찰되었다. 고결화 이후 응력에 따른 수직 변형율의 기울기는 이중 선형 관계를 보이며 고결화 결합 파괴 이후에는 비고결화 시료와 비슷한 기울기를 가진다. 또한 모래부피비 0.2 및 0.8 시료 모두 하중 제하에 따른 잔류 변형은 비고결화 시료에 비해 작은 값을 보였다.

그림 4는 모래부피비 0.2 및 0.8 시료의 정규화된 수직 변형율($\epsilon_{cemented} / \epsilon_{uncemented}$)을 나타낸다. 정규화된 수직 변형율은 응력에 따라 1) capillary force, 2) cementation, 3) decementation 구간으로 나눌 수 있다. 고결화 시료의 경우, 고결화를 유발하기 위하여 시료 조성 시 20g의 물을 첨가하며, 첨가된 물은 각 입자 표면을 감싸기 때문에 입자 사이에 모세관력(capillary force)을 작용시킨다. 이러한 모세관력에 의하여 고결화 이전 낮은 수직응력 상태에서 고결화 시료는 비고결화 시료보다 더 적은 수직변형율을 보이며(물에 의한 pseudo cementation), 추가적인 하중 증가에 의하여 수직 응력이 모세관력을 넘어서게 되어 수직 변형율 비율은 1에 가까워지고 있다. 2) cementation 구간에서는 고결화 시료의 변형은 고결화 작용제의 영향으로 인하여 적은 반면, 비고결화 시료의 변형은 계속 발생하므로 정규화하면 감소하는 경향을 보인다. 고결화 파괴(sf=0.2 시료의 경우 약 80kPa, 모래부피비 sf=0.8 시료의 경우 약 160kPa)로 인하여 3) decementation 구간에서는 하중 증가에 따라 정규화된 수직 변형율은 증가하여 1에 가까워지고 있다.

4.2 근접장 내의 탄성과 신호

벤더 엘리먼트는 매질 속으로 벤더 엘리먼트가 설치

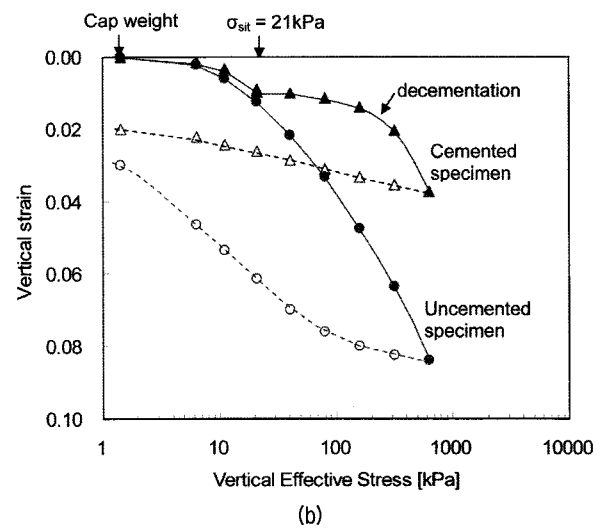
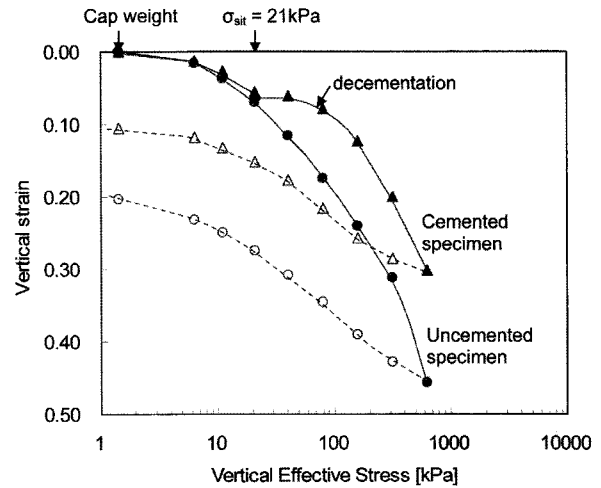


그림 3. 고결화 및 비고결화 시료의 응력에 따른 수직 변형을 비교: (a) sf = 0.2 (b) sf = 0.8

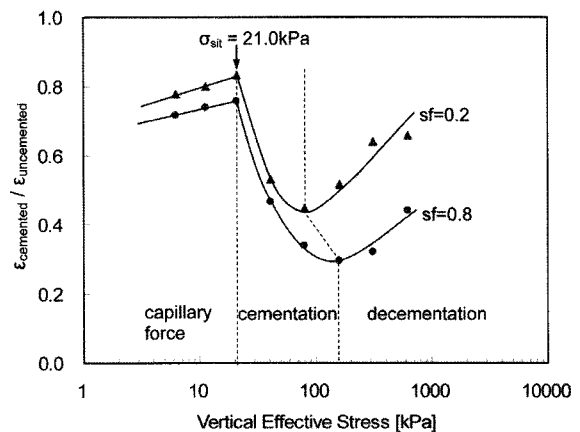


그림 4. 모래부피비 (sf) 0.2 및 0.8 시료의 정규화된 수직 변형율 ($\epsilon_{cemented} / \epsilon_{uncemented}$)

된 방향으로의 전단파의 전파뿐만 아니라 근접장 효과 (near field effect)로 인한 수직 방향의 압축파 역시 발생시킨다. 이러한 압축파의 전파는 전단파의 도착 시점

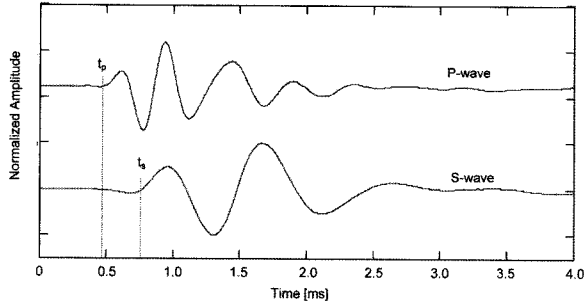


그림 5. 수직 응력 6.3kPa에서 수신 PZT 엘리먼트(P-wave)와 벤더 엘리먼트(S-wave)에서 얻은 탄성파 신호

판단을 어렵게 할 수 있다. 이러한 근접장 효과는 실내 실험과 같이 발신기와 수신기의 거리가 가까울수록 더욱 중요하다. 그림 5는 수직 응력 6.3kPa에서 수신 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트에서 얻은 신호이다. 근접장 내에서 전단파의 도달 시간 결정은 이러한 압축파로 인한 근접장 효과를 고려하여 결정하여야 한다. Signal matching technique에 따르면 근접장 내의 전단파의 도달은 전형적인 전단파 신호 중 첫 번째 최고점 이후 0인 점에 가까운 것으로 알려져 있다(Lee and Santamarina 2005). 또한, 근접장 효과는 발신기와 수신기 사이의 거리 (L)와 전단파의 파장(λ_s)의 비인 L/λ_s 로 판단할 수 있다. L/λ_s 가 커지면 압축파와 전단파 도달 시간의 차이는 점점 커지며, 압축파의 감소로 인하여 압축파의 크기 역시 줄어들어 전단파의 도달 시간을 더욱 명확하게 판단할 수 있다. 이러한 L/λ_s 는 흙의 댐핑에 영향을 받지만 4이상이면 압축파와 전단파를 쉽게 구별 할 수 있다고 알려져 있다(Sawangsurriya et al. 2006). 트랜스듀서의 공진주파수는 압전 물질의 탄성계수, 앵커 특성, 트랜스듀서의 주위 지반의 밀도 및 강성에 의해 영향을 받는다. 그림 5에 나타난 바와 같이 벤더 엘리먼트로 얻은 전단파 신호의 공진주파수보다 PZT 엘리먼트로 측정된 압축파의 공진 주파수가 더 큼을 알 수 있다.

4.3 탄성파 신호 및 속도

재하 및 제하 시 측정된 고결화 시료(sf=0.2, 0.8)의 대표적인 압축파 및 전단파 신호를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다. 고결화 이전의 압축파 및 전단파의 초동 시간은 수직 응력이 증가함에 따라 감소하였다. 높은 모래부피비(sf=0.8) 시료보다 낮은 모래부피비 시료(sf=0.2)의 강성이 상대적으로 작기 때문에, 낮은 모래부피비 시료의 탄성파 신호는 높은 모래부피비 시료보다 낮은 공

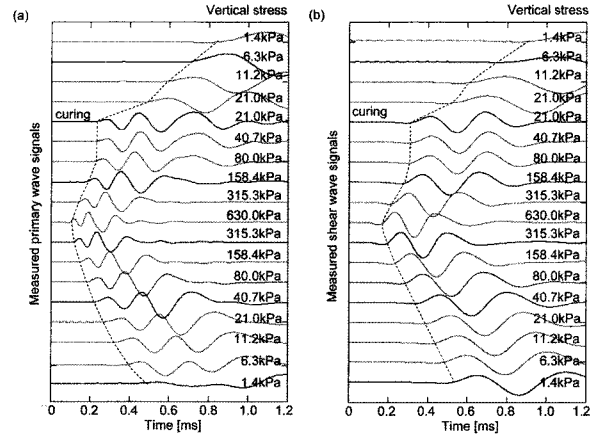


그림 6. 재하 및 제하 시 측정된 모래부피비 sf = 0.2 시료의 탄성파 신호: (a) 압축파 (b) 전단파

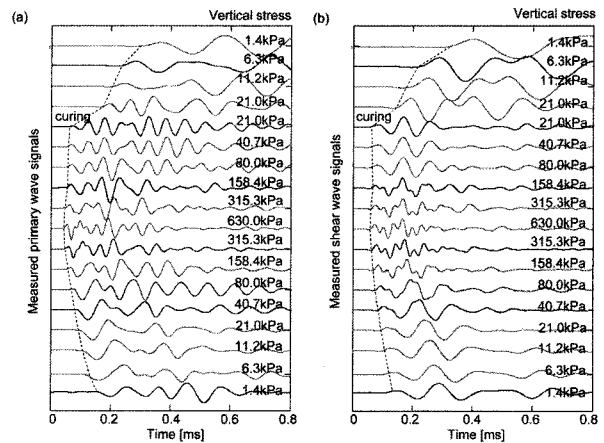


그림 7. 재하 및 제하 시 측정된 모래부피비 sf = 0.8 시료의 탄성파 신호: (a) 압축파 (b) 전단파

진주파수 및 긴 초동 시간을 보였다. 고결 시(수직응력 21kPa) 압축파와 전단파 모두 수직 응력의 증가 없이 초동 시간의 급격한 감소가 관찰 되었다. 고결화 이후, 탄성파의 공진주파수 및 이동 시간은 수직 응력이 증가함에도 불구하고 고결화 결함이 파괴되는 시점(decementation)까지 거의 일정하게 유지되었다.

응력 상태가 등방성인 경우(isotropic state of stress)의 경우, 탄성파의 polarization plane에서 평균 유효 응력(σ'_o)을 이용하여 탄성파의 전파 속도는 다음과 같이 표시할 수 있다(P파와 S파 포함).

$$V = \alpha \left(\frac{\sigma'_o}{1kPa} \right)^\beta \quad (2)$$

여기서, α 및 β 는 실험적으로 결정되는 값이다. α 계수는 유효 응력 1kPa에서의 혼합재의 탄성파 속도이며 간극비, 입자 구조, 그리고 입자의 강성에 지배 받는다. β

지수는 접촉 특성 및 입자 구조 변화에 영향 받으며, 대수축(log scale)에서 응력과 탄성과 속도의 기울기를 나타낸다(Santamarina et al. 2001). 고결화 및 비고결화 시료(sf = 0.2, 0.8)의 하중 재하 동안 수직 응력의 변화에 따라 측정된 압축파 및 전단파 신호로부터 산정한 탄성과 속도를 그림 8에 나타내었다. 비고결화 시료의 경우, 압축파 및 전단파 속도는 수직 응력이 증가함에 따라 증가하였으며, 높은 모래부피비를 가지는 시료일수록 동일한 크기의 수직 응력에서 더 빠른 압축파 및 전단파 속도를 보였다. 고결화 시료의 경우, 시료가 경화되기 이전의 낮은 구속 응력(1.4kPa ~ 21kPa)에서 비고결화 시료와 유사하게 수직 응력의 증가에 따라 탄성과 속도는 증가하는 경향을 보인다. 그러나 고결화 이전에도 고결화 시료의 탄성과 속도가 모세관현상으로 인하여 약간 더 큰 값을 보였다. 동일한 크기의 응력($\sigma_{sit} = 21\text{kPa}$)에서 72시간 동안 고결화 후 경화에 의해 압축파 및 전단파 속도의 급격한 증가가 관찰되었다. 고결화 이후 추가적인 하중의 증가에도 탄성과 속도는 고결화 결합에 의하여 일정한 값을 보였다(고결화 지배구간). 고결화 이후 지속적인 하중의 증가는 고결화 결합을 파괴시켜 응

력의 증가에도 불구하고 전단파 속도의 감소를 발생시켰다. 전단파 속도에서 고결화 결합 파괴는 모래부피비 sf=0.2 시료의 경우 약 160kPa, 모래부피비 sf=0.8 시료의 경우 약 200kPa에서 관찰되었다. 그러나 압축파의 경우 하중 증가에 따라 전단파 속도의 감소와 비교하여 미소한 감소가 관찰되었으며, 이 후 응력의 증가에 따라 압축파 속도는 증가하는 경향을 보였다. 압축파 속도에서 고결화 결합 파괴는 모래부피비 sf=0.2 시료의 경우 약 80kPa, 모래부피비 sf=0.8 시료의 경우 약 160kPa에서 관찰(그림 4의 정규화된 수직 변형율로 산정한 값과 일치)되었다. 이는 고결화 결합의 파괴로 인한 강성의 감소 효과와 수직 변형에 따른 압축 구속의 증가 효과가 서로 상충된 결과로 판단된다. 고결화 결합의 파괴 이후, 추가적으로 하중이 증가함에 따라 탄성과 속도는 비고결화 시료와 유사하게 응력의 증가에 따라 증가하였다(응력 지배구간).

4.4 고결화에 따른 탄성과 속도 변화

그림 9(a)은 고결화 시간에 따른 sf=0.2 및 0.8 시료 압축파 및 전단파 속도의 비고결화 시료의 탄성과 속도

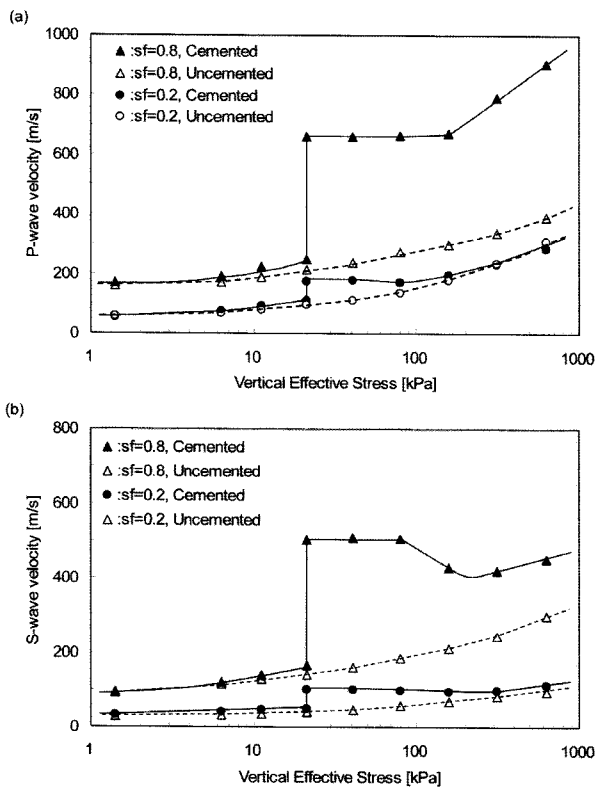


그림 8. 고결화 및 비고결화 시료 (sf = 0.2, 0.8)의 하중 재하동안 수직 응력의 변화에 따라 산정한 탄성과 속도: (a) 압축파 속도 (b) 전단파 속도

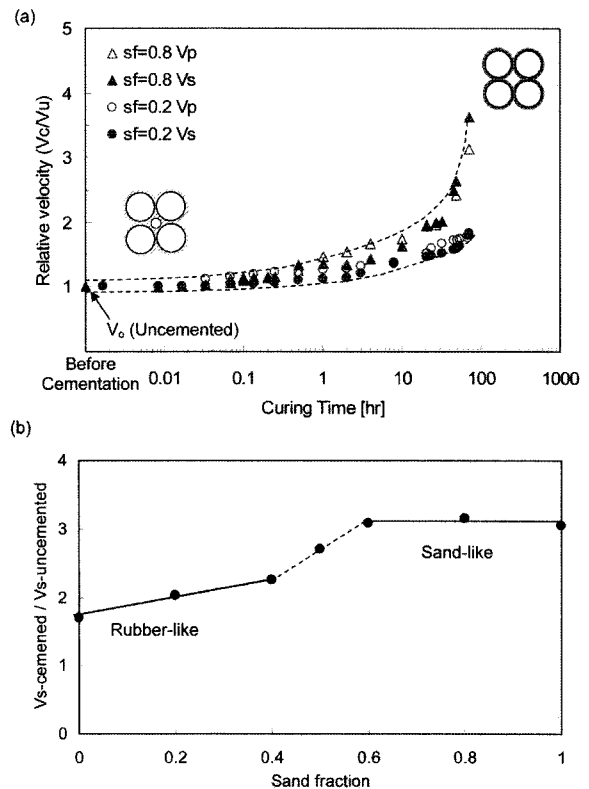


그림 9. 고결화에 따른 탄성과 속도 변화. (a) 고결화 동안 탄성과 속도 비율: V_c - 고결화 시료의 탄성과 속도, V_u - 비고결화 시료의 탄성과 속도, $\sigma_v = 21\text{kPa}$; (b) 고결화 이후 모래부피비에 따른 전단파 속도의 비 ($V_{s\text{-cemented}}/V_{s\text{-uncemented}}$).

에 대한 상대적인 속도를 나타낸다. 입상 매질의 강성은 유효 응력의 상태에 의해 정의된다. 그러나 고결화 작용제는 유효 응력의 증가 없이도 시간에 따라 입자의 접촉점 주변의 면적을 증가시켜 미소 변형을 강성을 상당히 증가시킨다. 시간에 따른 압축과 및 전단파의 증가 양상은 거의 유사하며, 하중 재하 후 약 1시간 동안 탄성과 속도는 거의 증가하지 않으며 약 1시간 이 후 탄성과 속도는 시간에 따라 급격한 증가를 보인다. 하중 재하 직후에도 약간의 탄성과 속도의 증가가 관찰되는데 이는 하중 재하에 따른 입자 내 하중 재분배 때문으로 판단된다. 이러한 시간에 따른 경화 특성은 고결화 작용제의 종류와 양에 따라 좌우된다. 그림 9(b)는 모래부피비에 따른 고결화에 의한 전단파 속도의 증가비($V_{s-cemented}/V_{s-uncemented}$)를 나타낸다. 고결화에 따른 전단파 속도의 상대적 증가량은 모래부피비에 따라 구별할 수 있으며, 모래부피비 $sf = 0.2$ 이하의 낮은 증가비를 보이는 그룹(rubber-like), 모래부피비 $sf = 0.8$ 이상의 높은 증가비를 보이는 그룹, 그리고 모래부피비 $sf = 0.4-0.6$ 의 천이 구간으로 구별할 수 있다.

4.5 속도-간극비 관계

그림 10은 모래부피비 0.2. 및 0.8 시료의 압축과 및

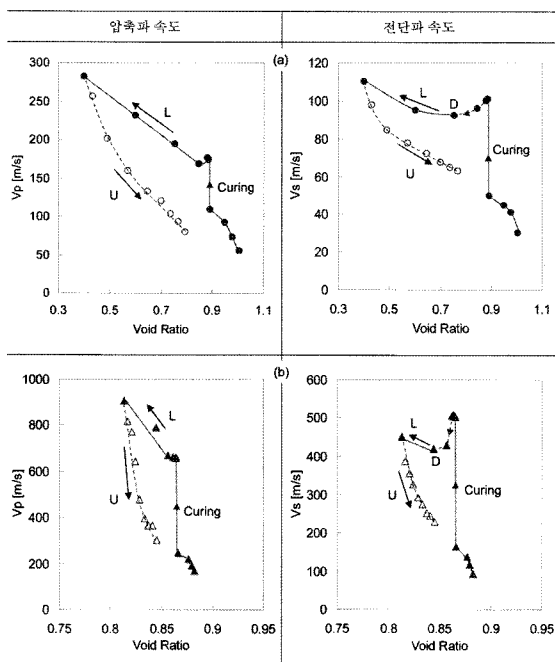


그림 10. 탄성과 속도-간극비 관계: (a) $sf = 0.2$ (b) $sf = 0.8$. 그림 내 L 및 U는 각각 하중 재하 및 제하를 표시하여, D는 고결화 결합 파괴를 의미

전단파 속도-간극비 곡선을 나타낸다. 고결화에 따라 동일한 간극비에서 급격한 압축과 및 전단파 속도의 증가를 보인다. 전단파 속도의 경우 하중 증가에 따른 고결화 결합의 파괴(collapse) 및 연화 현상(softening)이 명확하게 관찰되었다. 또한 모래부피비가 낮은 $sf=0.2$ 시료에서 더 큰 연화 현상이 관찰되었다. 그러나, 압축과 속도의 경우 낮은 모래부피비 시료에서는 미미한 고결화 결합 파괴가 관찰되었으나 명확한 연화 현상은 관찰되지 않았다. 이러한 연화 현상은 고결화 결합이 하중에 따라 순전히 파괴되는 것이 아니라 부분적인 파괴(partially collapse)가 진행되기 때문이다. 실험이 끝난 후 시료의 육안 관찰 시에도 부분적인 고결화 파괴가 확인되었다.

4.6 전단탄성계수

미소변형 전단탄성계수 G_{max} 는 전단파 신호로부터 계산된 전단파 속도(V_s)와 밀도(ρ)로부터 다음 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

그림 11은 재하과정 시 비고결화 시료의 수직유효응력에 따른 미소변형 전단탄성계수 G_{max} 값의 변화와 고결화 시료($sf = 0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$, 그리고 1.0)의 재하 및 재재하 과정 동안 수직 응력에 따른 미소변형 전단탄성계수 G_{max} 값의 변화를 나타낸다. 비고결화 시료의 경우 G_{max} 값은 고무와 같이 낮은 전단탄성계수를 보이는 그룹($sf \leq 0.2$)과 모래와 같이 높은 전단탄성계수를 보이는 그룹($sf \geq 0.8$)의 두 그룹으로 크게 분류된다(그림 11-a). 또한 모래부피비가 $0.4-0.6$ 인 시료는 응력 변화에 따라 매우 민감한 거동을 보인다. 특히 모래부피비가 0.4 인 시료는 구속응력에 따라 낮은 구속압에서는 고무와 비슷한 거동양상을 보이나 높은 구속압에서는 모래와 비슷한 거동을 보인다(유사고무거동 및 유사모래거동 그룹의 경계). 고결화 시료의 경우 재하 시, 시료는 고결화와 고결화 파괴를 겪게 된다. 양생 응력(σ'_{sil})에서 고결화 및 추가 하중 증가에 따른 고결화 결합 파괴는 비고결화 시료에서 관찰되었던 유사 고무, 유사 모래, 그리고 전이 거동을 방해한다. 그러나 재하 과정 동안 고결화 결합의 파괴를 경험하여 재재하 과정 동안 고결화 시료와 상이한 거동을 보이며 양생 응력을 경계로 고결화 지배 구간과 응력 지배 구간으로 구별된다(그림 11-c). 응력 지배구간에서는 비고결화 시료와 유사한

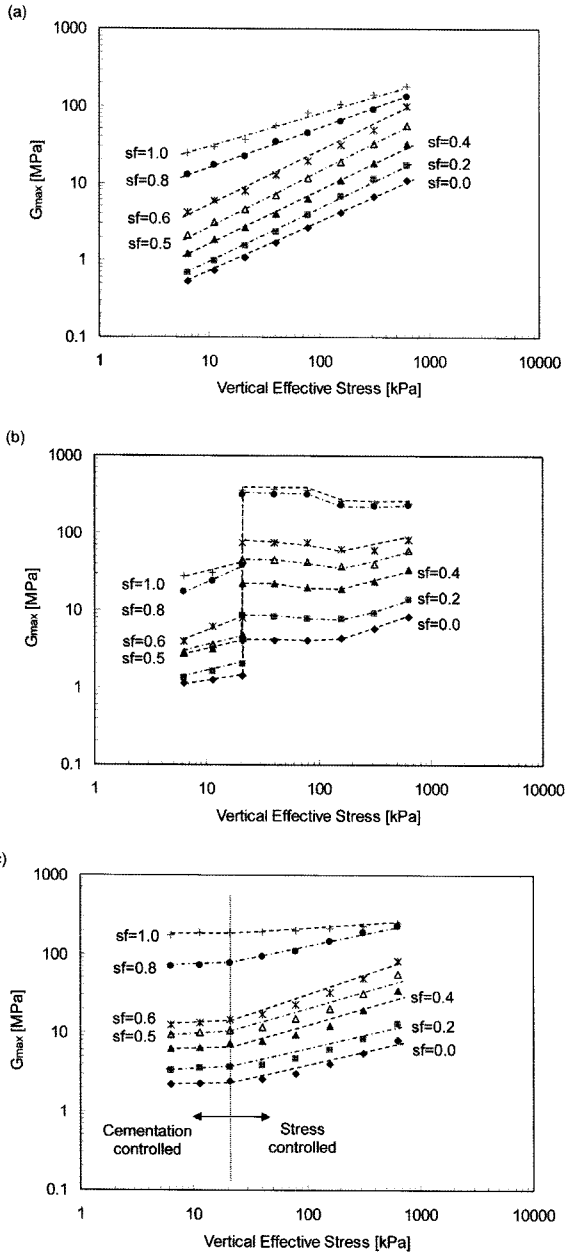


그림 11. 고결화에 따른 전단탄성계수의 변화: (a) 비고결화 시료 (b) 재하 시 고결화 시료 (c) 재재하 시 고결화 시료

경향을 보이지만, 고결화 파괴 이후 고결화 시료의 미소변형 전단탄성계수는 비고결화 시료의 전단탄성계수보다 더 큰 값을 보인다.

5. 토의

5.1 고결화 시료의 속도-응력 관계

그림 12는 비고결화 시료와 고결화 시료의 속도-응력의 관계를 나타낸다. 고결화 시료의 속도-응력의 관계는 고결화 지배 구간과 응력 지배 구간으로 나뉘며, 고결화

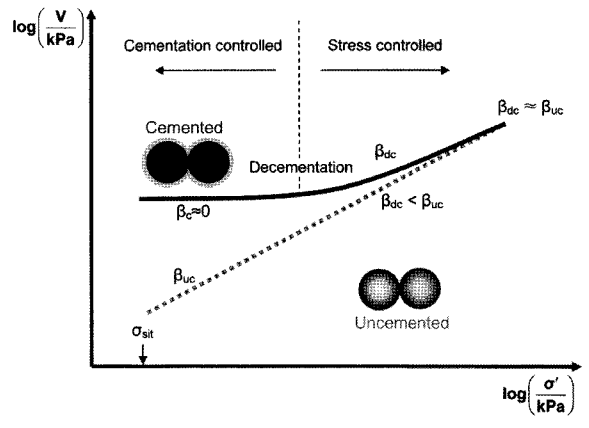


그림 12. 비고결화 시료와 고결화 시료의 속도-응력의 관계. β_{uc} 는 비고결화 시료의 β 지수, β_{dc} 는 고결화 파괴 이후 고결화 시료의 β 지수를 표시함

결합이 파괴되기 이전인 고결화 지배 구간의 β 지수는 0에 가까운 값을 가진다. 일반적으로 낮은 응력 하의 탄성 구형 입자의 경우 β 지수는 $1/6$ (Hertzian contact), 높은 응력 구간에서는 contact yield로 인하여 $\beta \approx 1/4$ 값을 가진다. 앞서 설명한 바와 같이 β 지수는 접촉 특성 및 입자 구조 변화에 영향을 받는다. 모래의 경우 강성이 크거나 조밀한 구조일수록 더 낮은 β 지수를 가지며, 점토의 경우 소성 지수가 높을수록 높은 β 지수를 가지며 preloading 및 aging 정도가 클수록 더 낮은 β 지수를 가진다(Santamarinat et al. 2001). 고결화 시료는 응력의 증가에 따라 고결화 결합이 파괴되더라도 부분적으로 고결화 결합이 남아 있으며 파괴된 고결화 작용제가 공극을 채우게 되어 비고결화 시료보다 동일한 구속 응력 하에서 더 조밀한 구조 및 더 큰 강성을 가지게 된다. 따라서 고결화 결합 파괴 이후의 β_{dc} 는 비고결화 시료의 β_{uc} 보다 더 작은 값을 가게 되어 응력이 증가함에 따라 속도는 비고결화 시료의 속도 값에 접근하게 된다. 그러나 고결화 결합이 완전히 파괴된 이후에는 비고결화 시료와 유사한 속도-응력 관계를 보인다.

5.2 고결화결합 파괴 메커니즘

고무-모래 혼합재의 고결화 결합의 파괴 메커니즘은 크게 2가지로 예상할 수 있다: (1) 각 입자 모양의 변화; (2) 입자 이동. 그림 13은 고무-모래 혼합재의 고결화 결합의 파괴 메커니즘을 보여준다. 고무 입자의 강성은 모래 입자의 강성에 비하여 매우 작기 때문에, 그림 13(a)와 같이 낮은 모래부피비의 시료는 하중 작용 시 연약한 고무 입자 자체의 큰 변형으로 인하여 고결화 결합의

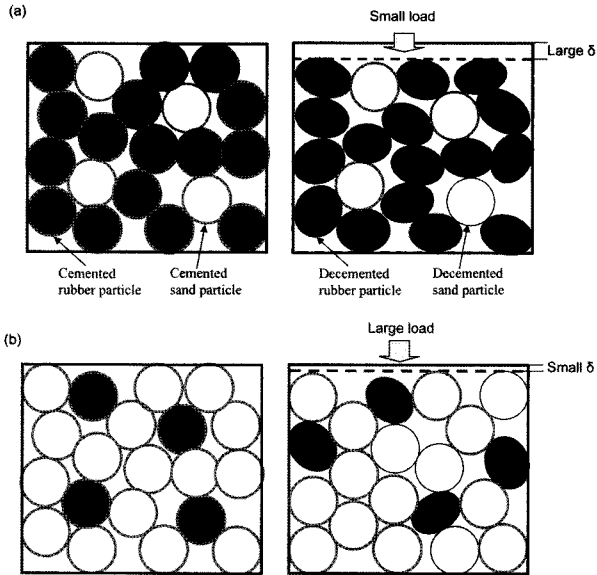


그림 13. 고무-모래 혼합재의 고결화 파괴 메커니즘: (a) 개별 입자 모양의 변화 (b) 입자 구조의 변화

파괴가 발생한다. 반면에 그림 13(b)와 같이 높은 모래 부피비 시료에서는 큰 입자 모양의 변화 없이 단단한 모래 입자가 수직 하중을 분담한다. 따라서, 높은 모래 부피비 시료의 고결화 결합을 파괴하기 위해서는 입자 사이의 미끄러짐이나 회전 등으로 인한 입자 구조의 파괴를 유발할 충분히 큰 하중이 요구되며, 낮은 모래부피비 시료에 비하여 상대적으로 높은 강성으로 인하여 적은 변형이 발생한다.

6. 요약 및 결론

다양한 모래부피비를 가지는 단단한 모래 입자와 연약한 고무 입자 혼합재의 고결화에 따른 거동 특성을 분석하였다. 비고결화 및 고결화 시료를 조성하여 실험을 수행하였으며 탄성파(압축파 및 전단파)의 측정은 실내 실험에서 널리 사용되는 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트를 이용하였다. 벤더 엘리먼트와 PZT 엘리먼트 모두 압밀셀을 통한 직접파의 전달을 방지하기 위하여, 셀과 임피던스 차이가 큰 물질을 이용하여 셀에 고정하였으며 방수, 전기적 차폐, 그리고 접지를 실시하였다.

비고결화 시료의 경우, 응력의 증가에 따라 수직 변형은 증가하였으며, 그 크기는 모래부피비가 작을수록 큰 값을 보였다. 또한 제하 이후 모래부피비에 관계 없이 잔류 변형이 관찰되었으며, 모래부피비가 작은 시료일수록 큰 잔류 변형을 보였다. 고결화 시료의 경우, 고결화 이전에는 비고결화 시료와 유사한 거동을 보였으나,

고결화에 따라 응력 저항 거동을 보인다. 고결화 결합 파괴 응력에 도달한 후에는 상당한 수직 변형의 증가가 관찰되었다. 하중 제하에 따른 잔류 변형 역시 비고결화 시료에 비해 상당히 작은 값을 보였다.

근접장 내에서 측정된 전단파 신호의 첫 번째 움직임은 압축파의 도달 시간과 일치하였으며, 근접장 내의 전단파 초기 도달시간을 결정 시에는 근접장에 따른 효과를 고려하여야 한다. 비고결화 시료의 압축파 및 전단파 속도는 수직 응력의 증가에 따라 증가하였으며 압축파 및 전단파 속도는 모래부피비가 증가함에 따라 증가하였다. 고결화 경화에 따라 탄성파 속도는 수직 응력의 증가 없이 급격한 증가를 보였으며, 추가적인 응력 증가에도 일정한 값을 보였다. 지속적인 수직 응력의 증가는 고결화 결합의 파괴를 유발하고 고결화 결합의 파괴는 응력의 증가에도 불구하고 압축파 및 전단파 속도의 감소를 발생하였다. 고결화 결합을 파괴 시키기 위한 응력은 모래부피비에 따라 다르며, 높은 모래부피비의 시료일수록 더 큰 파괴 응력을 보였다. 또한 정규화된 수직 변형율과 압축파로 산정한 고결화 파괴 응력이 유사하였다. 고결화 결합의 파괴 이후, 추가적으로 하중이 증가함에 따라 탄성파 속도는 비고결화 시료와 유사하게 응력의 증가에 따라 증가하였다.

비고결화 시료는 응력에 따른 미소변형 전단탄성계수의 변화에 따라 유사고무, 유사모래, 전이 3가지의 거동을 보이며, 유사고무거동 및 유사모래거동 그룹의 경계인 전이 시료의 모래부피비는 약 0.4~0.6으로 나타났다. 고결화는 비고결화 시료에서 나타나는 유사고무, 유사모래, 전이 3가지의 거동을 방해하며, 고결화 작용제의 양에 따라 재재하 시의 다른 거동이 관찰되었다. 재재하 시 고결화 시료의 전단탄성계수는 동일한 크기의 수직응력에서 비고결화 시료의 전단탄성계수보다 더 큰 값을 보인다. 고무-모래 혼합재의 고결화 결합의 파괴 메커니즘은 모래부피비에 따라 다르며 낮은 모래부피비의 시료는 입자 모양의 변화가 고결화 결합의 파괴에 주요 원인이나, 높은 모래부피비 시료에서는 입자 구조의 변화에 의한 고결화 결합의 파괴가 주요한 원인이다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-042-D00315)임을 밝히며 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Acar, Y. B. and El-Tahir, A. (1986). "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand." *J. Geotech. Eng.*, 112(11), 1001-1015.
2. Ahmed, I. and Lovell, C. W. (1993). "Rubber soils as light weight geomaterials." *Transportation research record* 1422. Transportation Research Board, 61-70.
3. Airey, D. W. (1993). "Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 119(9), 1379-1398.
4. Baig, S., Picornell, M., and Nazarian, S. (1997). "Low strain shear moduli of cemented sands." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(6), 540-545.
5. Bosscher, P. J., Edil, T. B., and Kuraoka, S. (1997). "Design of highway embankments using tire chips." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(4), 295-304.
6. Clough, G. W., Rad, N. S., Bachus, R.C., and Sitar, N. (1981). "Cemented sands under static loading." *J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107(6), 799-817.
7. Coop, M. R. and Atkinson, J. H. (1993). "The mechanics of cemented carbonate sands." *Geotechnique*, 43(1), 53-67.
8. Dass, R. N., Yen, S. S., Das, B. M., Puri, V. K., and Wright, M. A. (1994). "Tensile stress-strain characteristics of lightly cemented sand." *Geotech. Test. J.*, 17(3), 305-314.
9. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985). "Lab measurements of Gmax using bender element." *Proc. ASCE convention on Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, 186-196.
10. Feng, Z. Y. and Sutter, K. G. (2000). "Dynamic properties of granulated rubber sand mixtures." *Geotech. Test. J.*, 23(3), 338-344.
11. Fernandez, A. L. and Santamarina, J. C. (2001). "Effect of cementation on the small-strain parameters of sands." *Can. Geotech. J.*, 38(1), 191-199.
12. Garga, V. K. and O'Shaughnessy, V. (2000). "Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design." *Can. Geotech. J.*, 37(1), 75-96.
13. Eleazer, W. E. and Barlaz, M. A. (1992). "Technologies for Utilization of Waste Tires in Asphalt Pavement." *Proc. Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*, ASCE, New York, NY, September 13-17, 193-201.
14. Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., and Randolph, M. F. (2002). "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(6), 520-529.
15. Lee, J. H., Salgado R., Bernal, A., and Lovell, C. W. (1999). "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125(2), 132-141.
16. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005). "Bender elements: performance and signal interpretation." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 131(9), 1063-1070.
17. Lee, J. S., Dodds, J., and Santamarina, J. C. (2006). "Behavior of rigid-soft particle mixtures." *J. Materials in civil Eng.*, ASCE, 19(2), 179-184.
18. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001). *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. John Wiley and Sons. New York.
19. Saxena, S. K., Reddy, K. R., and Avramidis, A. S. (1988). "Static behavior of artificially cemented sand." *Indian Geotechnical J.*, 18(2), 111-141.
20. Sawangsuriya, A., Biringen, E., Fratta, D., Bosscher, P. J., and Edil, T. B. (2006). "Dimensionless limits for the collection and interpretation of wave propagation data in soils." *ASCE Geotechnical Special Publication (GSP) No. 149: Site and Geomaterial Characterization*, 160-166.
21. Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., and Sandford, T. C. (1998). "Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(11), 1061-1070.
22. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995). "Interpretation of bender element tests." *Geotechnique*, 45(1), 149-154.
23. Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2005). "Decementation, softening, and collapse: changes in small-strain shear stiffness in koloadng." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(9), 350-358.
24. Zornberg, J. G., Cabral, A., and Viratjandr, C. (2004). "Behaviour of Tire Shred-Soil Mixtures." *Can. Geotech. J.*, 41(2), 227-241.

(접수일자 2007. 12. 18, 심사완료일 2008. 1. 29)