

전체변형을 범위에서 변형특성 평가를 위한 공내재하시험 장치 개발

Development of Pressuremeter for Evaluation of Deformation Characteristic at Whole Strain Ranges

권 기 철* Kweon, Gi-Chul

Abstract

In order to analyze the deformational behavior accurately, the in-situ testing technique which provides the reliable deformational characteristics at whole strain ranges, needs to be developed. The pressuremeter is a unique method for assessing directly the in-situ shear modulus of soils with strain amplitude. This paper introduces a new alternative, the cavity strain measuring system in pressuremeter designed for whole strain ranges of $10^{-5}\%$ ~ 20% . Not only in the synthetic calibration chamber but also in the field, the pressuremeter tests were performed to determine the compliance of the new developed pressuremeter system. The variation in shear modulus with strain amplitude above $5 \times 10^{-2}\%$ was reliably determined by the developed pressuremeter. It is concluded that the major cause of error in small cavity strain measuring is not from the cavity strain measuring system but from the friction between measuring arm and membrane during unloading-reloading loops.

요 지

엄밀한 변형해석을 위해서는 전체변형을 범위에서 신뢰성 있는 변형특성 평가가 가능한 현장시험 기법이 개발되어야 한다. 공내재하시험은 현장지반의 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 직접 평가할 수 있는 유일한 시험기법이다. 본 연구에서는 $10^{-5}\%$ ~ 20% 의 전체변형을 범위에 대하여 적용 가능한 공동변형 측정방법을 고안하였다. 개발된 장비의 운용성 검증을 위하여 검증토조에 대한 시험과 현장시험을 수행하였다. 개발된 장비는 $5 \times 10^{-2}\%$ 이상의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 전단탄성계수 측정이 가능하였다. 미소한 공동변형을 측정하는데 발생하는 주요 오차의 원인은 공동변형 측정 시스템 자체보다는 측정봉과 멤브레인 사이에서 역재하-재재하 과정에 발생하는 마찰인 것으로 판단된다.

Keywords : Cavity strain measuring system, Deformation characteristics, PMT, Whole strain ranges

1. 서 론

변형률 크기에 따른 전체 변형률 영역(탄성영역 변형률 크기~파괴 변형률 크기)의 비선형탄성계수는 공용 중인 지반구조물의 변형 해석 및 내진설계에 매우 중요한 지반 특성치이다. 현재까지는, 현장지반의 비선형탄성계수 결정을 위하여, 동적인 현장시험으로부터 미

소변형률 영역의 최대탄성계수를 결정하고, 실내시험에서 결정된 변형률 크기에 따른 탄성계수 감소곡선(modulus reduction curve)을 결합하여 현장 지반의 전체 변형률 영역의 탄성계수를 결정하는 기법이 가장 신뢰할 만한 방법으로 평가되고 있다(권기철 등, 2000). 이러한 다소 복잡한 기법을 적용하는 이유는, 실내시험에서 신뢰성 있는 전체 변형률 영역의 변형 특성 평

* 정회원, 동의대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongeui Univ., gckweon@deu.ac.kr)

가가 가능하나 불교란 시료 채취의 어려움과 현장상태 재현의 문제점으로 인해 그 적용성이 제한되어 있고(김동수 등, 1997), 현장시험에서는 전체 변형률 영역의 비선형탄성계수를 결정하는 신뢰성 시험기법이 개발되어 있지 못하고 있기 때문이다.

공내재하시험(PMT)은 현장 지반에서 응력-변형률 관계의 측정이 가능한 대표적인 시험기법으로 많은 역학적 특성치 규명에 이용되어 왔다. 특히, 공내재하시험에서 측정되는 공동응력-공동변형률 곡선으로부터 현장지반의 변형률 크기에 따른 비선형 탄성계수를 결정하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다(Bellotti, 1989; Clarke, 1995). 그러나 개발되어 있는 공내재하시험 장치는 미소변형률 영역 또는 중간변형률 영역 중 어느 특정한 변형률 영역에서 신뢰성 있는 측정이 가능하여 전체 변형률 영역의 시험이 불가능한 상태이다.

본 연구에서는 이론적으로 전체 변형률 영역의 공동변위 측정이 가능한 기법을 고안하여, 새로운 공동변위 측정기법을 적용한 공내재하시험 장치를 개발·제작하고 시험장치 검증을 수행하였다. 또한 제작된 시험장치를 적용한 현장시험을 수행하여 시험장치의 현장 적용성을 평가하였다.

2. 전체변형률 영역의 변형 측정을 위한 공내재하 시험장치 개발

Menard(1955)에 의해 제안된 공내재하시험은, 초기에는 지반의 현장수평토압 추정을 위한 현장 시험기로 널리 사용되었다. 이후, 공내재하시험기의 거동 특성을 이론적으로 규명하기 위한 많은 노력이 이루어져, 강도특성 및 변형특성 평가를 위한 다양한 시험·해석 기법이 개발되어 있다(김동수 등, 1997; Clarke, 1995). 특히, 공내재하 시험은 현장에서 지반의 응력-변형률 관계를 직접적으로 결정할 수 있는 장점으로, 현장 지반의 변형률 크기에 따른 비선형 변형계수를 가장 합리적으로 추정할 수 있는

시험법으로 각광받고 있다(김동수 등, 1997; Bellotti, 1989; Jardine, 1986; Muir Wood, 1990; Robertson, 1989).

공내재하시험 장치는 공동변형 측정방법, 탐침의 관입방법 등에 따라 여러 가지 형태의 시험기로 구분된다. 미소변형률 영역의 측정에 우수한 특성을 갖는 공내재하시험 장치는 Camkometer와 Oyometer가 개발되어 있다(Clarke, 1995). 변형률 게이지(strain gauge)를 적용한 Camkometer는 미소변형률 영역의 변형측정에는 우수하지만, 대변형률 영역의 측정이 어렵고, Oyometer는 미소변형률 영역에서 대변형률 영역까지의 측정이 가능하지만 변형 측정장치가 탐침의 대부분을 차지하여 자가굴착(self-boring) 방식으로 전환이 불가능한 단점이 있다. 본 연구에서는 공내재하시험에서 자가굴착으로 확장이 가능하도록 하기 위하여 15mm 높이의 공간에서 약 25mm 범위의 공동변형까지 측정이 가능한 기법을 고안하였다.

2.1 개발된 공내재하시험의 공동변형 측정 기법

고안된 공동변형 측정장치의 개요는 그림 1과 같이, 탐침 수직방향의 공동변위를 측정봉과 케이블을 이용하여 탐침의 수평방향으로 전환하여 LVDT를 사용하여 측정하는 방식이다. 고안된 공동변형 측정장치는 15mm 높이의 공간에 설치되어 자가굴착으로 확장하는데 필요한 공간을 확보하고 있다. 이러한 공동변위 측정시스템에서 공동변위와 LVDT에서 측정되는 변위를 기하학적인 관계로부터 이론적으로 유도하면 그림 2와 같은 결과를 얻게 된다. 그림 2에서 보듯이, 공동변위와 LVDT에서 측정되는 변위의 관계는 선형에 가까운 관계를 유지하고 있어, 미소변형 상태의 측정 분해능은 사용하는 LVDT의 분해능과 거의 동일하고 약 25mm 범위의 공동변형 측정이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 고안된 공동변형 측정기법을 적용하면, 이론적으로는 10⁻⁵%~20% 범위(즉, 전체변형률 범위)의 공동변형 측정이 가능한 것으로 평가되어, 선형 영역의 미소변형률부터 대변형

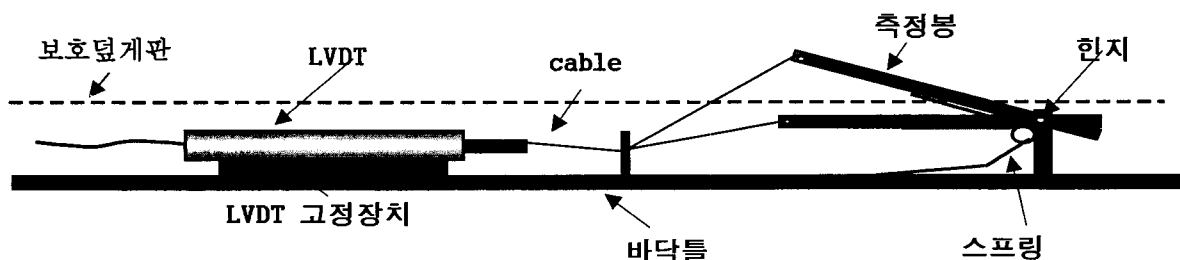


그림 1. 개발된 PMT 시험의 공동변위 측정 기법

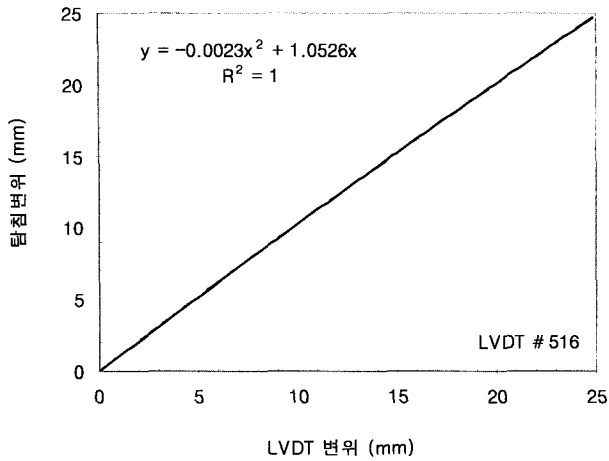


그림 2. 공동변위와 LVDT 측정 변위의 관계

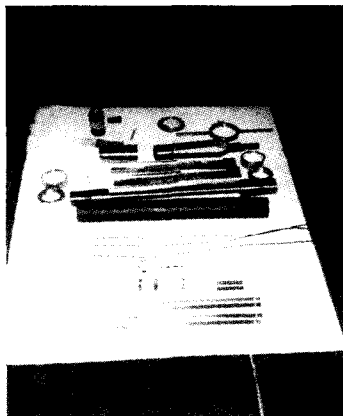
물 영역의 강도 특성 평가를 동일한 측정기를 사용하여 평가 가능한 것으로 나타났다.

2.2 고안된 공동변형 측정기법을 적용한 탐침 제작

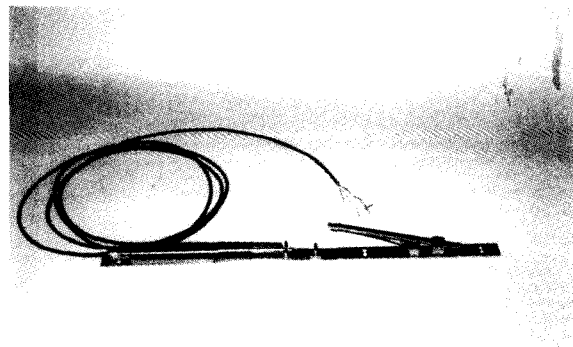
그림 1에 나타낸 측정기법을 바탕으로 3개의 공동변

형 측정장치를 제작하여, 공내재하시험기 탐침에 120° 각도의 세 방향으로 설치하였다. 탐침 내부에 설치된 공동변형 측정장치는 다음의 사항을 고려하였다. i) 높은 구속압력에 견딜 수 있도록 견고해야 하고, ii) 설치 후 공동변형 측정을 위한 추가적인 조절작업이 필요 없어야 하고, iii) 멤브레인의 자유로운 변형을 구속하지 않아야 하고, iv) 멤브레인의 국부적인 변형이 발생하지 않아야 한다. 그러나 시험 제작된 탐침의 공동변형 측정장치는 일부 문제점을 야기하였는데, 상세한 내용은 아래에 기술하였다.

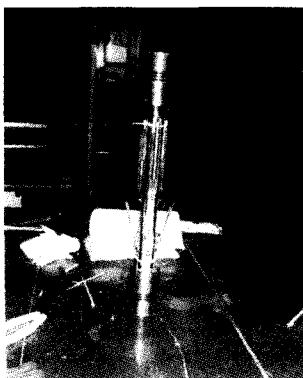
탐침의 제작과정은 사진 1과 같다. 먼저 공동변형 측정장치를 접착제(CN 사용)를 이용하여 조립하였다. 이때, LVDT와 변위 측정봉의 연결은 활동성이 좋고 신축성이 거의 없는 명주실을 사용하였다. 그 다음은 제작된 3개의 공동변형 측정장치를 120°간격으로 탐침의 몸체에 접착제를 사용하여 부착하고, 측정장치 보호를 위한 보호덮게와 멤브레인을 설치하여 탐침 제작을 완료 하였다.



(a) 탐침 제작 부품



(b) 제작 완료된 공동변형 측정장치



(c) 변위측정 장치 부착



(d) 보호덮게 설치 후



(e) 멤브레인 설치

사진 1. 고안된 공동변형 측정장치를 장착한 탐침 제작

2.3 제작된 탐침의 실내 검증

시험장치의 검증은 크게 시험장치에 적용된 센서의 검증(transducer calibration)과 시험장치 전체의 시스템 검증(system calibration)으로 나누어진다(Kim 등, 2000). 센서검증에서는 압력측정장치 검증, 공동변형 측정에 사용된 LVDT 자체의 검증, 멤브레인을 설치하지 않은 상태에서 공동변형과 LVDT 변위의 관계를 검증하였다. 시험을 통하여 평가된 공동변위(탐침변위)-LVDT 변위의 관계는 이론적으로 유도된 결과(그림 1)와 미소한 차이를 보였는데, 이것은 탐침 조립과정에서 발생한 약간의 치수오차에 기인한 것으로, 검증계수는 실측자료를 바탕으로 결정하여 사용하였다.

공동응력과 공동변형은 멤브레인 내부에서 측정되므로 멤브레인 외부와 접촉해 있는 지반의 응력 및 변형과 차이가 발생한다. 따라서, 본 연구에서 적용한 시험기와 같이 수평 변위를 직접적으로 측정하는 형태의 공내재하시험장치의 경우에는, 멤브레인 강성(membrane stiffness), 멤브레인 압축성(membrane compression), 팽창에 의한 멤브레인 두께 감소(membrane thinning)를 고려하여 지반이 경험하는 공동응력 및 공동변형을 결정해야 한다. 본 연구에서는, 제작된 탐침에 대하여 공기중 시험을 통하여 멤브레인 강성을 결정하였고, 강성이 대단히 큰 두꺼운 철재 튜브 내에 탐침을 설치하여 공동변형이 없는 상태에서 공동응력을 재하여 멤브레인 압축성을 결정하였다. 한편 멤브레인의 팽창에 의한 멤브레인 두께 감소는 멤브레인 자체의 부피 변화가 없는 것으로 가정하고 수치적으로 계산하였다.

제작된 탐침의 전체 시스템 검증(system calibration)은 폴리우레탄 재질의 검증토조에(사진 2) 대한 독립적인 시험을 수행하여 서로 비교하는 기법을 적용하였다. 검증토

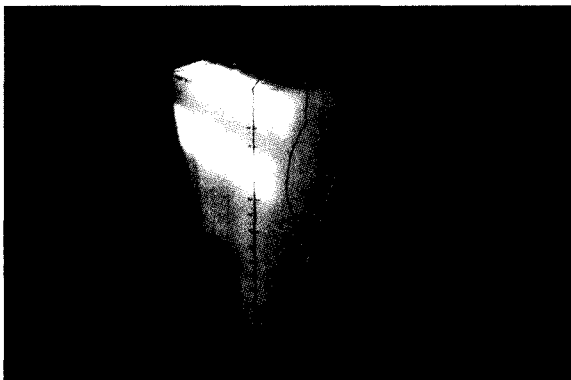


사진 2. 폴리우레탄 검증토조(탄성파 시험 전경)

조에서는 다운홀 형태의 실내 탄성파시험과 공내재하시험을 수행하였고, 검증시편에 대해서는 비틀전단시험을 수행하였다. 검증토조의 크기는 직경 50cm, 높이 100cm로 공내재하시험 탐침 직경(7.3cm)의 6.8 배로 모형토조의 경계효과는 매우 작을 것으로 판단된다(백규호, 1994).

우레탄 재질은 변형률 크기에 따라서 탄성계수가 일정하고, 구속응력의 영향을 받지 않으며, 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없는 장점이 있는 반면에 점탄성의 성질로 인하여 하중주파수와 온도에 따라서 탄성계수가 변화하는 단점이 있다(Kim 등, 2000). 따라서 유사한 온도조건에서 각 시험을 수행하였고, 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화를 비틀전단시험을 통하여 결정하여 각 시험의 하중주파수 차이를 고려한 후 탄성계수를 비교하는 방법으로 전체 시스템 검증을 수행하였다.

그림 3은 검증토조 다운홀시험에서 측정된 시간영역 신호 일례로, 전단파의 극성이 매우 뚜렷이 나타나, 확인한 나비모양(butterfly shape)을 확인할 수 있다. 그림 3에 나타낸 결과에서 전단파의 도달시간으로 평가하고 각 감지기 사이의 거리와 도달시간의 차이를 고려하여 전단파속도를 결정하였다.

그림 4는 검증시편에 대한 비틀전단시험에서 결정된 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화이며, 결과로부터 하중주파수의 영향은 $14.5\%/\log(freq)$ 로 평가되었다. 각 시험의 하중주파수차이를 고려하기 위하여 다운홀시험의 하중주파수는 주파수영역 분석을 통하여 최대 에너지를 갖는 350Hz를 적용하였고, 공내재하시험은 정적 시험으로서 0.01Hz(Kim 등, 2000)로 고려하였다.

그림 5는 여러 시험에서 결정된 탄성계수를 각 시험의 하중주파수를 고려한 후 비교한 것으로, 검증시편과 검증토조의 시험결과가 약간의 차이를 보이는 것은 동일한 재질로 제작되었으나 제작과정의 미소한 양생조건의 차이 때문인 것으로 판단된다. 한편 동일한 검증토조에서 시험이 수행된 다운홀시험과 PMT 시험에서 결정된 탄성계수가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있고, 이로부터 개발된 공내재하시험장치의 전체 시스템 검증을 완료하였다. 그러나 신뢰성 있는 변형률 측정 범위는 $5 \times 10^{-2}\%$ 정도(중간 변형률 이후)로, 이론적으로 평가된 개발된 장치의 측정 가능 변형률 크기보다 상당히 큰 값이며, 미소변형률 영역의 측정에는 문제가 있는 것으로 나타났다. 시험 완료 후 측정봉과 멤브레인의 국부적인 접촉 부분에서 과다하고 불규칙한 변형이 유발된 것으로 보아 이것이 미소변형률 영역에서 주요 측정 오차

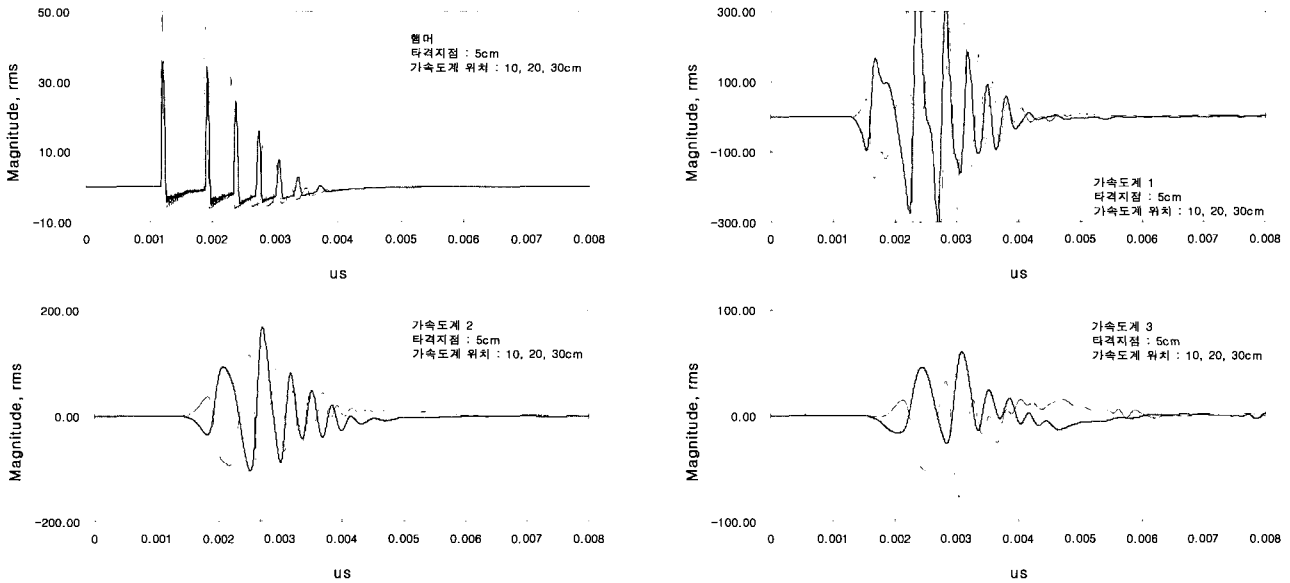


그림 3. 검증토조 다운홀 시험의 시간영역 신호 일례

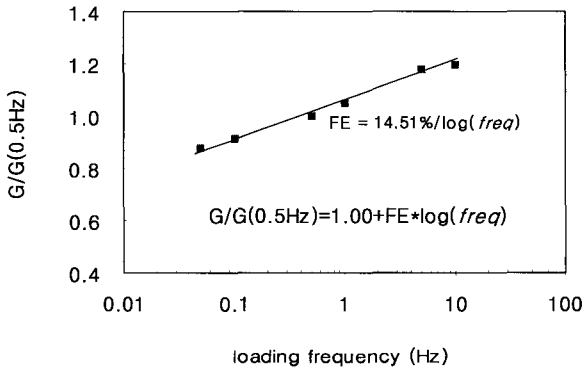


그림 4. 검증시험의 하중주파수 영향

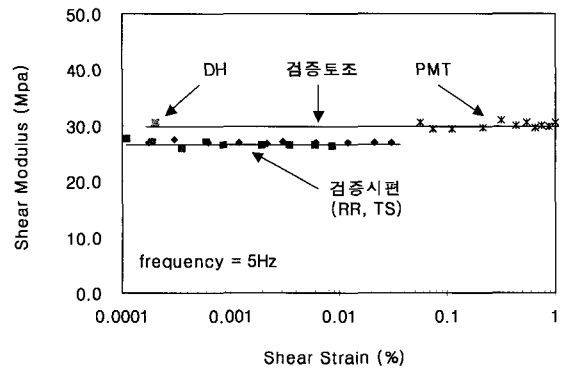


그림 5. 여러 시험에서 결정된 탄성계수 비교

의 원인으로 판단되며 공동변형 측정장치 자체의 한계는 아닌 것으로 생각된다. 따라서 향후에는 측정봉이 멤브레인에 가하는 힘의 크기를 좀더 줄일 수 있는 장치의 개선이 필요한 것으로 생각된다.

3. 현장시험을 통한 적용성 평가

3.1 공내재하시험장치 시스템 구성

공내재하시험장치는 크게, 공동압력 재하장치, 공동변형 측정장치, 데이터 획득 및 부속장치로 구분된다. 본 연구에서 개발된 공내재하시험 장치에서는, 공기압으로 구속응력을 재하하였고, 탐침변형 측정에 사용되는 LVDT는 AC 형태로, 5kHz의 입력전압을 필요로하여 신호발생기(function generator)를 사용하였다. 시험기의 전체 시스템 구성은 그림 6과 같다.

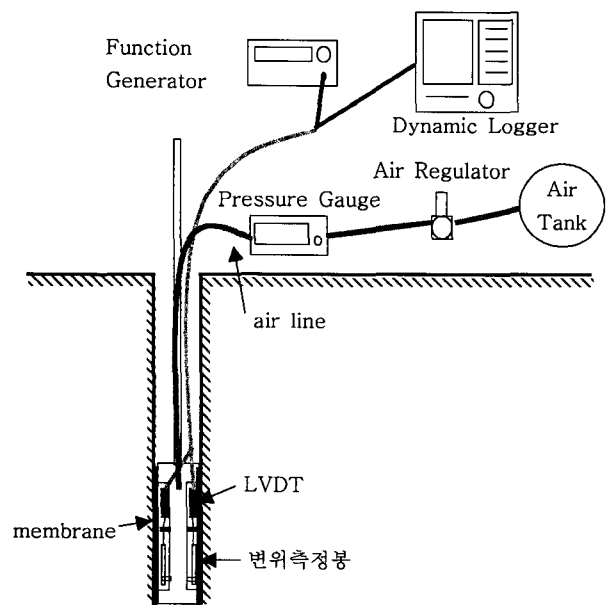


그림 6. 개발된 공내재하시험장치 시스템

3.2 현장시험

시험 위치는 경기도 이천에 위치한 도로 현장으로, 노상토 층에서 시험을 수행하였다. 노상토층은 사질토 성분을 함유한 화강풍화토 지반이었으며 층다짐으로 균일한 지층구조를 나타내고 있었다. 시험결과와 비교를 위하여 동일한 위치에서 크로스홀시험을 수행하고, 시료를 채취하여 공진주시험을 병행하였다.

공내재하시험이 수행될 시추공 설치를 위하여 탐침의 직경보다 약간 큰 얇은 알루미늄관을 지반에 타입하였으며, 타입시 알루미늄관 내부의 흙을 핸드오거를 이용하여 제거하면서 알루미늄관을 관입하여 주변 지반의 교란을 최소화 하였다. 소정의 깊이까지 알루미늄관을 관입하여 시추공을 형성한 뒤, 관입된 알루미늄관을 유압잭을 이용하여 인발한 후, 매끈하게 형성된 시추공 내부에 탐침을 관입하여 공내재하시험을 수행하였다 (사진 3).

공내재하시험의 하중조합은, 시추공 설치과정의 지반교란 효과를 줄이기 위하여, 재하-역재하 단계를 포함

하였다. 시험결과 그림 7(a)와 같은 공동응력-공동변형률의 관계를 획득하였다. 본 연구에서는 Bellotti(1989)에 의해 제안된 방법을 적용하여 공동응력-공동변형률의 관계로부터 비선형 탄성계수를 결정하였으며, 크로스홀 시험에서 결정된 최대탄성계수와 공진주/비틀전단시험에서 결정된 비선형 특성을 결합한 전체변형률 영역의 탄성계수와 비교하여 그림 7(b)에 나타내었다. 탐침이 위치한 깊이 범위에서, 크로스홀 시험으로부터 결정된 탄성계수의 변화가 심하여 하나의 대표값을 선정하기 곤란하였으며, 그림 7(b)에는 탄성계수의 범위로 표시하였다. 최대탄성계수의 급격한 변화는 지반의 불균질성이라기 보다는 매우 얇은 깊이(심도 70cm)에서 시험이 수행되어 구속응력의 크기가 급격하게 증가하고 사질성분의 노상토가 구속응력의 영향을 매우 크게 받기 때문으로 생각한다.

그림 7(b)에 나타난 결과를 살펴보면, 크로스홀시험 및 공진주시험에서 결정된 탄성계수와 개발된 공내재하시험에서 결정된 탄성계수는 다소의 차이를 보이고 있으며, 개발된 공내재하시험에서 신뢰성 있는 변형률



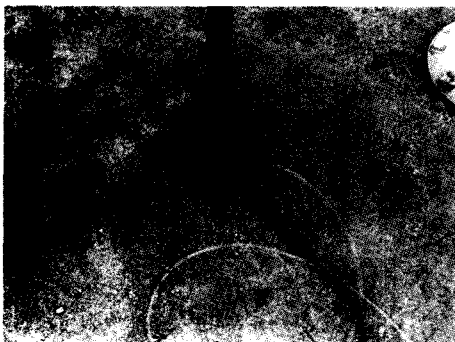
(a) 보링홀 형성



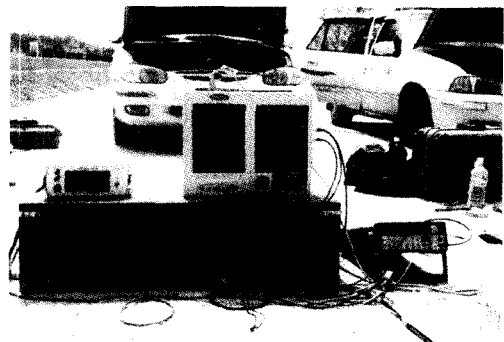
(b) 케이싱 제거



(c) 탐침 설치

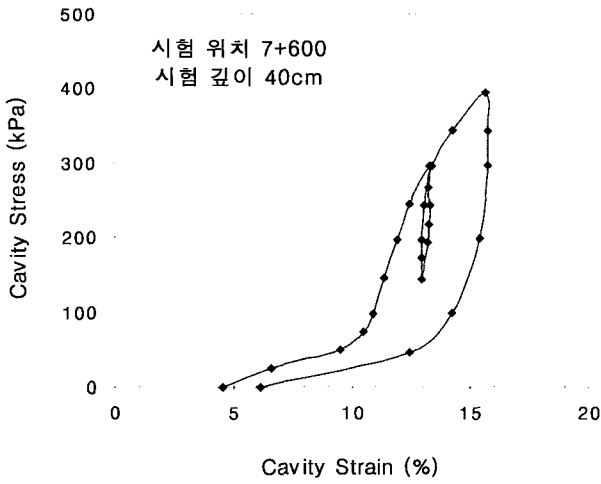


(d) 탐침 설치 완료

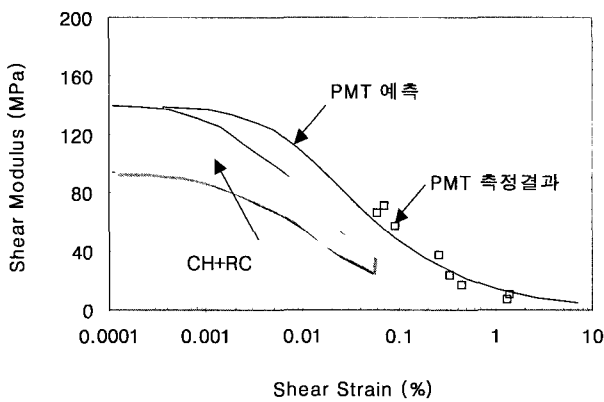


(e) 공동변형, 압력 측정

사진 3. 현장 공내재하시험



(a) 공동응력-공동변형률 곡선



(b) 여러 시험에서 결정된 변형률 크기에 따른 탄성계수

그림 7. 제작된 공내재하시험장치를 적용한 현장적용성 평가 시험 결과

측정 범위는, 검증토조 결과와 유사한 $5 \times 10^{-2}\%$ 정도(중간 변형률 이후)로 미소변형률 영역의 측정에는 문제가 있는 것으로 나타났다. 크로스홀시험 결과와의 차이 원인은, 매우 얇은 깊이에서 시험이 수행되어 공내재하시험 시험결과로부터 탄성계수 결정과정에 사용되는 구속응력 보정의 영향이 지나치게 민감하게 작용한 영향으로 판단된다. 따라서 향후에는 지반자체의 변화와 구속응력 보정의 영향이 작은 깊은 깊이에서 비교시험을 계획하고 있다. 미소변형률 영역에 측정 신뢰도 저하는, 검증토조 시험에서와 같이, 측정봉과 멤브레인의 국부적인 접촉부분에서 과다하고 불규칙한 변형이 유발되기 때문으로 추정되며, 공동 변형 측정시스템 자체의 문제점은 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 공내재하시험에서 전체 변형률 영역

의 공동변위 측정이 가능한 기법을 고안·제작하여 시험장치 검증을 수행하였다. 또한 제작된 시험장치를 적용한 현장시험을 수행하여 시험장치의 현장 적용성을 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 공내재하시험에서 자가굴착 방식에서의 확장과 전체 변형률 영역에서 측정이 가능한 공동변형 측정장치를 고안하였다. 고안된 측정장치는 15mm 두께범위 이내에서 설치 가능하고, 이론적 검토 및 멤브레인이 설치되지 않은 상태에서 개발된 공동변형 측정장치만의 검증 결과, 측정 가능 변형률 범위는 $10^{-5}\% \sim 20\%$ 로 평가되었다.
- (2) 우래탄 재질의 검증토조에서 다운홀시험 및 비틀전단시험과의 비교를 통한 개발된 공내재하시험 장치의 전체 시스템 검증결과 $5 \times 10^{-2}\%$ 변형률 크기 이상의 범위에서 신뢰성 있는 측정이 이루어지는 것으로 평가되었다. 이것은 개발된 공동변형 측정장치만의 측정가능 변형률 크기보다 상당히 큰 값으로, 미소 변형률 영역의 측정에는 문제가 있는 것으로 나타났다. 이러한 미소변형률 영역에서 주요 측정 오차의 원인은 공동변형 측정장치의 한계가 아니라, 측정봉과 멤브레인의 국부적인 접촉부분에서 과다하고 불규칙한 변형이 유발되기 때문으로 추정되며, 측정봉이 멤브레인에 가하는 힘의 크기를 좀더 줄일 수 있는 장치의 개선이 필요하다.
- (3) 개발된 시험장치 전체시스템의 적용성을 현장시험을 통하여 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(R01-2001-00482) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 권기철, 김동수(2000), "다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.345-352.
2. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형 특성 평가", 한국지반공학회 논문집, 제13권, 제5호, pp.89-100.
3. 김동수, 박재영, 이원택(1997), "공내재하시험기를 이용한 미소 변형 전단탄성계수 측정", 한국지반공학회 논문집, 제13권, 제4호, pp.109-120.
4. 백규호(1994), "사질토 지반에 따입된 개단강관말뚝의 지지력 특성", 한국과학기술원 박사학위논문.

5. Bellotti, R. et al.(1989), "Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sand", *Geotechnique* 39, No.2, pp.269-292.
6. Clarke, B. G.(1995), "Pressuremeter in Geotechnical Design", Blackie Academic & Professional, ISBN 0-7514-0041-6.
7. Jardine, R. J., Potts, D. M., Fourie, A. B. and Burland, J. B, (1986), "Studies of the influence of non-linear stress strain characteristics in soil structure interaction", *Geotechnique*. 36(3), pp.377-396.
8. Kim D. S. and Kweon G. C.(2000), "Calibration of Testing Equipments for Reliable Small-Strain Deformation Measurements Using Synthetic Specimens", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.23, No.4, pp.454-463.
9. Merard, L.(1955), "Mesures in situ des proprietes physiques des sols, Annales des Ponts et Chaussees", Paris, No.14, pp.357-377.
10. Muir-Wood, D.(1990), "Strain dependent moduli and pressuremeter tests", *Geotechnique*, 40(26), pp.509-512.
11. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Davies, M. P. and Sy, A.(1989), "Evaluation of pile design in Fraser River Delta using in-situ tests", *Found. Engng Current Principles and Practices*, Evanston, Appl., Texam, USA, *ASTM STP* 956, pp.443-457.

(접수일자 2003. 9. 24, 심사완료일 2003. 11. 24)