

다목적 대형삼축압축시험장비의 구축과 적용

Development and application of Multi-purpose Large Triaxial Testing System

이성진*

Lee, Sung Jin

1. 서론

삼축압축시험장비는 현장 지반요소의 구축조건을 고려하여 지반재료에 대한 강도 및 변형특성을 얻을 수 있는 다목적으로 활용이 가능한 유용한 실험장비이다. 그럼에도 일반적으로 사용되는 소형 삼축압축시험장비는 현장에서 활용되는 크기의 조립재료 입자에 대한 실험이 불가능하기 때문에 입자 부서짐 등의 메커니즘이나 입자크기에 영향을 받는 조립재료의 거동특성을 실제 현상 그대로 반영할 수 없다. 따라서 입자 크기가 큰 조립재료에 대해 보다 합리적인 지반공학적 요소시험 결과를 얻기 위해서는 대형삼축압축시험장비의 사용이 필수적이다. 그러나 대형삼축압축시험장비가 소형삼축압축장비에 비해 갖추어야 할 장치에 따른 큰 구축비용과 제작기술의 부족 등으로 장비 구축이 어려워, 국내에서는 대부분의 조립재료 설계정수를 경험적 자료나 해외문헌의 자료로 적용해왔다. 2000년대 초에 한국수자원공사와 경주대학교에서 직경 300mm 공시체의 실험이 가능한 대형삼축압축시험장비를 구축하여 현재 여러 분야에 활용 중에 있다(신동훈 등 2000, 2003, 2004). 뒤를 이어 한국철도기술연구원에서는 최근 직경 150mm, 300mm, 500mm의 공시체와 사각시편(중간주응력/평면변형률) 등 보다 크고 다양한 입경의 조립재료에 대한 실험 뿐 아니라 Ko, 중간주응력 조건, 온도 제어(동결/융해)조건 등을 재현할 수 있는 부대장비를 갖추어 보다 현장 조건을 합리적으로 반영할 수 있는 대형삼축압축시험 시스템을 설계/구축하였다.

본 연구에서는 실험장비 시스템의 역학적 순응성 검증을 위해 동적물성 결과를 중심으로 검증작업을 수행하였으며, 이를 위하여 고유의 역학적 특성치(탄성계수)가 같은 직경 300mm와 50mm의 검증시편을 5종류로 제작하여 검증시험에 활용하였다. 검증 시험에는 대형삼축압축시험, 소형의 공진주시험, 비틀전단시험, 충격방향시험 등이 이루어졌으며, 실제 쇄석 재료에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 소개하고자 한다.

2. 대형삼축압축시험장비 개요

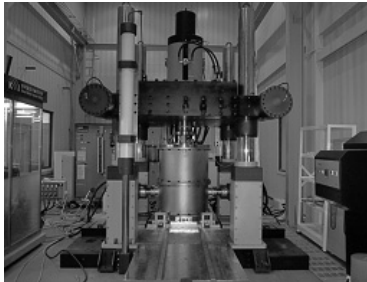
본 장비의 메인프레임은 2개의 액츄에이터(2000kN, 200kN)를 거치하고 하중의 반력대로 사용되는 Cross Head (약 180kN), Cross Head의 상하이동을 위한 400kN급의 유압실린더, Cross Head를 4축 Post에 고정시키는 4800kN의 유압클램프가 설치되어 최대하중 또는 최대속도로 하중제하 시에도 실험에 미치는 영향이 거의 발생되지 않도록 하였다. 본 실험에 앞서 수행된 최대성능 시험에서 2200kN 제하 시 반력대(Cross Head) 중앙부 최대 변위량이 0.26mm로 실험체 변위 이외의 시스템 자체 변위는 무시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 실험장비에는 주로 정적인 압축실험과 오이도미터실험을 위한 대용량(2000kN)의 액츄에이터와 별도로 미소변형수준의 동적 실험을 위한 200kN 액츄에이터를 분리 설치하여 작은 범위에서의 하중제어를 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 200kN 액츄에이터는 총 스트로크 400mm로 최대하중 하에서 $\pm 10\text{mm}/10\text{Hz}$ 의 속도로 고속제어가 가능하다.

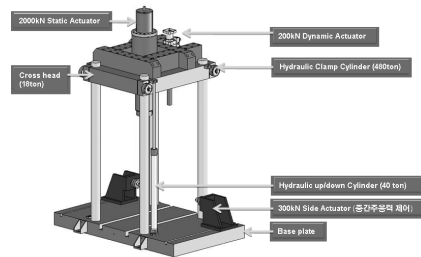
본 실험장비에서는 보다 다양한 입도의 조립재료와 다양한 현실적인 환경 및 구축조건에 대한 요소실험이 가능하도록 여러 종류의 삼축셀을 구축하였다. 먼저 일반 삼축압축조건 실험을 위해서 150 ϕ ×300H, 300 ϕ ×600H, 500 ϕ ×1000H의 공시체의 거치와 미소변형 측정용 센서 및 케이블의 설치와 실험이 가능한 셀

* 정희원·한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원·공학박사·031-460-5072(E-mail:geolsj@krii.re.kr)

(cell)을 500 \times 900H, 700 \times 1200H, 900 \times 1650H으로 각각 구성하였다. 모든 실험 셀(cell)은 최대 구속압 2MPa하에서 안전하도록 설계, 제작되었다. 삼축압축실험을 위해서는 시료의 포화, 시료 내부 배압 및 구속압 제어와 부피 측정 등을 위해 공압공급장치(Air Compressor), 공기건조시스템(Air Drying system), 탈기수 장치, 이산화탄소 공급장치, 고압레귤레이터, 진공펌프 등으로 구성된 루프시스템을 구축하였으며, 루프상의 밸브와 압력제어는 컨트롤러에서 컴퓨터로 제어가 가능하도록 구성하였다.



(a) 대형삼축압축시험장비



(b) 메인 프레임 구성 개요

그림 1. 대형삼축압축시험장비 전경(한국철도기술연구원, KRRI)

또한 시료의 포화작업이 필요할 경우 이산화탄소로 시편 내부의 공기를 치환하고 이중부압법 또는 배압법 등으로 포화도를 높일 수 있도록 하였다. 그리고 실험 도중 시편 내부의 배압(back pressure) 제어 시 고압에서 공기가 시편 내부 간극수로 녹아들어 발생될 수 있는 포화도 저하를 최소화 하기 위해 질소, 산소 등 일반대기의 기체에 비해 그 용해도가 약 10-20%에 불과한 헬륨을 이용해 배압을 제어할 수 있는 시스템이 추가되었다. 포화시료의 실험 중에 시료의 부피변화는 시료 내부 간극수의 변화량으로 측정할 수 있으며, 불포화 시료의 경우 셀내부의 구속압을 제어하는 물의 부피변화로 부피변화를 측정할 수 있도록 하였다.

삼축압축실험을 위해서는 실험조건에 맞는 공시체의 제작이 중요한 과정이다. 실험에서 목적으로 하는 밀도를 정하고 그에 맞는 시료를 성형하기 위해서는 공시체를 균일하게 반복 재현가능한 하중으로 성형할 수 있어야 할 것이다. 본 장비에서는 현장다짐조건에 유사한 하중조건에서 공시체를 제작하기 위하여, 하중크기(최대 100kN)와 주파수제어(30Hz, $\pm 1.85\text{mm}$ at 100kN)가 가능한 전용 다짐장비를 제작하여 시편의 일관된 품질 재현의 수준을 향상시켰다.

본 연구에서 사용한 삼축압축실험장비는 하중 및 변위제어가 가능한 장비이며 정확한 하중제어를 위해 로드셀을 셀내부에 설치하였다. 특히 본 장비에 구축된 로드셀은 2MPa 압력까지 내압 방수형으로 삼축셀 내부에 위치하도록 하여 삼축셀과 재하로드(rod)와의 마찰이 실험에서 측정되는 하중에 미치는 영향을 제거하였으며, 압축과 인장 실험이 모두 가능한 타입으로 설치하였다.

변위측정은 내부와 외부에서 측정하는 방법이 있으나, 외부 측정 변위는 미소변위의 측정을 위한 정밀도 확보가 어렵고, 단부오차(bedding error)를 포함하기 때문에 미소변형수준의 변위 측정에 적합하지 않다. 단부오차는 시료의 양쪽 끝부분에서의 평탄성 등의 문제로 인하여 실제보다 큰 변위가 계속되어 변형률이 크게 평가되는 것으로 시료를 성형할 때 아무리 정밀하게 하더라도 완전히 배제할 수 없는 오차 요인이다. 따라서 본 실험장비에서는 국부(local)변형 측정방법을 도입하였고, 이를 위해 셀 내부의 시편 측면에 변위센서(LDT, Local Deformation Transducer)를 부착하여 미소변위를 측정하였다.

LDT는 국부변위 측정방법의 하나로 1% 이하의 변형률을 측정하고자 할 때 널리 사용되며, 일본의 Tatsuoka 등(1991)이 개발하여 사용되고 있다. LDT(Local Deformation Transducer)는 얇은 인칭동판에 4개의 변형률계(Strain gauge)를 Full bridge 형태로 붙여서 동판이 휘어질 때 발생하는 응답을 측정하여 변위를 측정하는 장치이다. 본 연구에서 사용한 동판은 길이 520mm로서 인가전압 3V에 출력은 약 4.5mV/V 범위 이내에서 측정되어 앰프를 이용해 최대 7.3V까지 최대 25mm 변위까지 측정할 수 있다.

LDT를 사용하여 삼축압축실험을 하는 경우 멤브레인에 LDT거치를 위한 헌지를 붙이고 헌지 사이의 거리

를 정확히 측정한다. 다음, 힌지에 LDT의 양끝을 거치하고 실험을 수행한다.

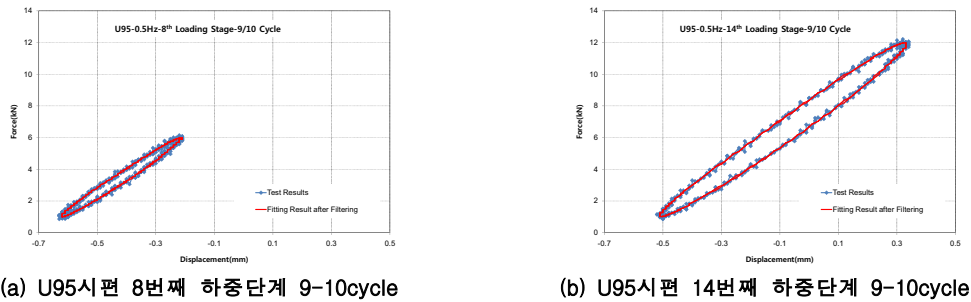
3. 시험장비 검증

3.1 검증 시험

본 연구의 검증 시험에서는 강성도가 서로 다른 우레탄 5개 종류의 우레탄 검증시편을 사용하여 실험장비를 검증하였다. 우레탄 재료의 검증시편은 변형률 크기에 따라 탄성계수가 일정한 선형거동을 나타내고, 강성도가 구속응력이나 응력이력에 영향을 받지 않으며, 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없어 취급이 용이한 장점을 갖고 있다(Stokoe 등, 1990). 따라서 우레탄 재료의 시편은 실험장비의 검증시편으로 적합한 것으로 평가된다(권기철 1999). 그러나 이러한 장점이 있는 반면 검증시편의 점탄성으로 인해 하중주파수가 증가하거나 온도가 감소할수록 강성도가 증가하는 경향이 있다(Stokoe 등, 1990). 그러므로 각 실험을 유사한 실내온도에서 실시하고, 각 실험이 수행되는 하중주파수를 고려하여 탄성계수를 비교하는 방법을 적용하였다. 5종의 다른 강성도를 갖도록 배합된 우레탄 재료를 직경 300mm와 50mm로 즉 강성도별로 한 쌍의 대형 및 소형 우레탄 검증시편을 제작하였다.

3.2 대형삼축압축시험장비 자체 검증

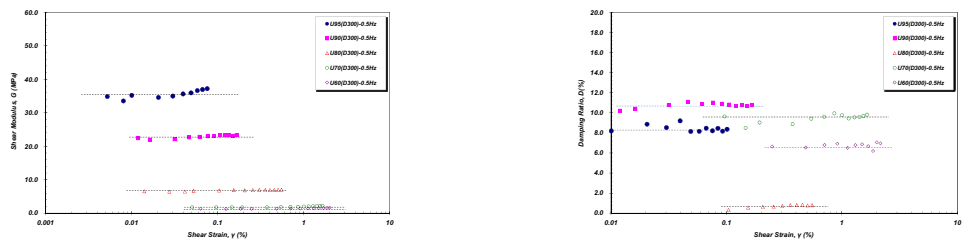
대형삼축압축시험장비의 검증실험은 대형우레탄시편(직경 3500mm)에 대해 수행하였으며, 지반재료에 대한 동적실험과 같이 JGS 기준으로 실험하였다. 검증실험을 위해 수행된 우레탄 검증시편에 대한 대형삼축압축 시험의 이력곡선의 일례는 그림 2와 같다.



(a) U95시편 8번째 하중단계 9-10cycle

(b) U95시편 14번째 하중단계 9-10cycle

그림 2. 하중-변위 이력 곡선



(a) 0.5Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과

(b) 0.5Hz에서의 LTX 감쇠비 결과

그림 3. 대형삼축압축시험(LTX)로 수행된 주파수별 동적물성 결과

앞서 언급된 바와 같이 구속압과 변형률 수준에 영향을 받지 않는 우레탄 검증시편의 탄성계수값이 실험 결과에서도 변형률에 따라 일정한 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 우레탄 재료 특성상 하중주파수에 따라 증가하는 강성의 경향도 합리적으로 반영하는 것으로 확인되었다.

3.3 다른 시험법과의 교차 검증

시험장비의 자체 검증시험을 통해 하중이나 변형률 수준에 따른 시스템의 성능을 확인할 수 있었다. 이번에는 보다 합리적인 검증을 위해 다른 실험법과의 절대적 시험결과값의 교차검증을 추가로 실시하였다. 즉, 대형우레탄시편에서 수행된 대형삼축압축시험 결과를 소형 우레탄시편에 대해 수행된 공진주/비틀전단실험, 충격반향(Impact Echo)실험 결과와 비교 검증하였다. 또한 시험법별로 다른 주파수로 수행된 결과를 반영하여 다른 주파수에 따른 영향도 검토하였다.

우레탄 재료는 구속압에 영향을 받지 않는 대신 하중 주파수에는 영향을 받는 재료이다. 이러한 검증시편의 재료특성을 고려해서 동일한 주파수에서 수행된 전단탄성계수를 비교하였다. 즉, 300mm 우레탄시편에 대해 0.5Hz의 주파수로 수행된 대형삼축압축시험 결과와 같은 강성으로 제작된 50mm 우레탄시편에 대해서도 동일한 0.5Hz의 주파수로 수행된 비틀전단시험 결과의 절대값을 5쌍의 우레탄 시편들에 대해 비교하였다. 동일한 강성도로 제작된 각 우레탄 시편에 대해 대형삼축압축시험(LTX)으로 평가된 전단탄성계수와 비틀전단시험(TS)으로 평가된 전단탄성계수가 시험이 수행된 변형률 수준에 관계없이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다(그림 4).

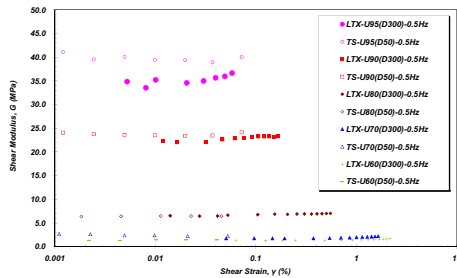
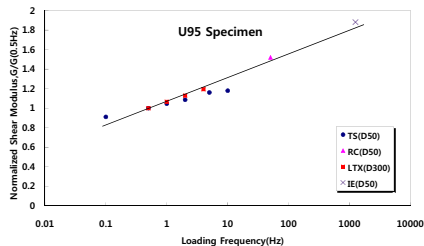
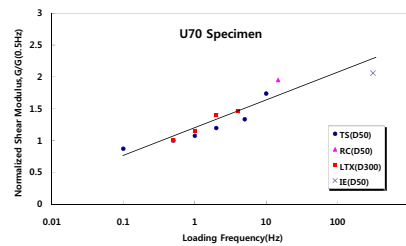


그림 4. 대형삼축압축시험과 비틀전단시험 결과 비교

추가적으로 다른 주파수 대역에서 전단탄성계수를 평가한 공진주시험과 충격반향시험 결과를 활용해 장비 성능을 평가하였다. 즉, 각 실험 방법별로 수행된 결과를 일관된 기준으로 비교 검증하기 위해서는 각 실험법에서 결정된 탄성계수를 주파수의 영향을 고려하였다. 권기철(1999)의 연구결과에서 우레탄 검증시편은 하중주파수의 대수적 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 검증한 바 있다. 본 연구에서도 이와 같은 우레탄 시편의 특성 반영 여부를 검증하기 위해 수행된 실험들, 비틀전단실험(TS), 공진주실험(RC), 충격반향시험(IE), 대형삼축압축실험(LTX)에서 각 실험이 수행된 하중주파수의 영향정도를 평가하기 위해 각 실험들에서 얻어진 탄성계수를 0.5Hz로 정규화하여 그 값을 비교하였다(그림 5).



(a) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U95)



(b) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U70)

그림 5. 시험방법별 다른 주파수 영향을 고려한 결과 비교

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전단탄성계수가 하중 주파수에 대하여 거의 직선적으로 증가되고 있음을 확인할 수 있었다. 지반재료의 동적물성치 평가를 위해 널리 사용되고 있는 다양한 시험기법으로 도출된 전

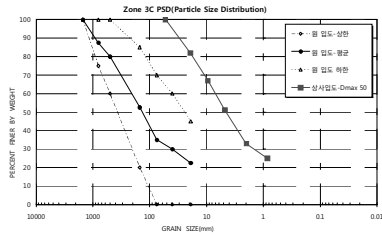
단단성계수 절대값 및 하중주파수에 따른 경향성을 비교함으로써, 대형삼축압축시험장비의 신뢰성을 확인할 수 있다고 판단된다.

4. 자갈재료의 동적물성 시험

아래 그림과 같은 원입도분포의 재료에 대해 최대 입경 50mm의 상사입도법으로 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 재료는 구장암 계열의 암석이 주된 성분이며, 암석자체의 물성은 다음 표와 같다. 이러한 재료로 직경 300mm의 공시체로 건조단위중량은 $2.1(t/m^3)$ 로 건조상태에서 제작되었다.

표 1. 시험재료의 기본 물성

Bulk Density (kN/m ³)	Specific Gravity	Porosity (%)	Absorption (%)	Ultrasonic Velocity (m/s)		UCS (MPa)	q_u (MPa)
				P과	S과		
27.30	2.79	0.59	0.21	5,260	3,501	173.66	115.2

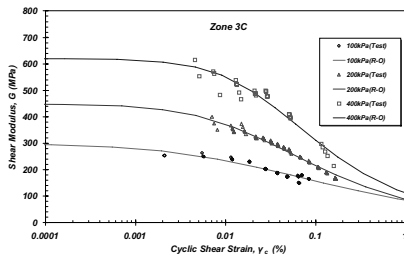


(a) 원재료 입도분포 및 상사입도

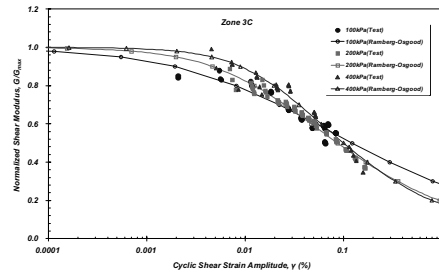


(b) 공시체

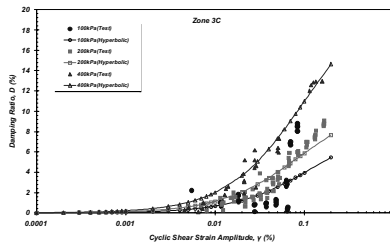
그림 6. 재료의 입도분포와 공시체



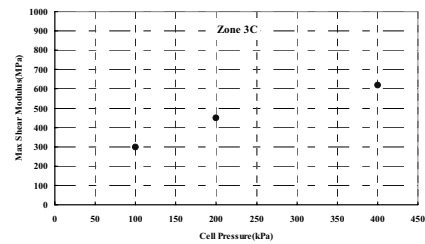
(a) 전단변형률에 따른 전단탄성계수(Zone-3C)



(b) 전단변형률에 따른 G/G_{max}(Zone-3C)



(c) 전단변형률에 따른 감쇠비(Zone-3C)



(d) 최대전단탄성계수의 구속압의존성(Zone-3C)

그림 7. 쇄석재료의 동적물성 실험 결과



다짐과정에서 재료의 파쇄에 의한 원입도의 변화를 최소화하고 실제 시공 현장의 다짐조건을 유사하게 반영하기 위해 하중과 주파수를 제어할 수 있도록 다짐작업을 수행하였다. 이번시험의 시편은 목표밀도에 맞도록 층별다짐하였으며, 최소 10kN, 최대 80kN에서 5Hz의 주파수의 정현파로 다졌다. 시험과 분석은 JGS의 시험 과정과 분석과정을 따랐으며, 결과는 위 그림과 같다.

5. 결론

시험장비 구축이후 시험장비의 검증은 향후 수행되는 시험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 반드시 필요한 과정이다. 본 연구에서는 시험장비 시스템의 역학적 순응성 검증을 위해 동적물성 결과를 중심으로 검증작업을 수행하였으며, 실제 조립재료에 대한 적용성도 평가하였다.

- (1) 본 연구 대상 대형삼축압축시험장비는 우레탄시편들에서 진단변형률에 따른 탄성계수와 감쇠비가 일정한 값을 나타내면서 우레탄 검증시편의 재료 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.
- (2) 같은 강성으로 제작된 소형(직경 50mm) 우레탄시편과 대형(직경 300mm) 우레탄시편에 대해 같은 하중 주파수로 수행된 비틀전단시험과 대형삼축압축시험에서 5쌍 검증 시편 모두 절대적인 강성값이 거의 같은 결과를 보여 다른 시험법과의 비교에서도 합리적인 결과를 검증할 수 있었다.
- (3) 대형삼축압축시험, 비틀전단시험, 공진주실험, 충격반향시험으로 상호 검증한 결과, 일정 하중주파수(0.5Hz)에서의 탄성계수로 정규화하였을 경우 하중주파수의 대수축에 직선적 증가경향을 보이는 우레탄 검증시편의 특성을 매우 이상적으로 나타내고 있었다.
- (4) 이상의 시험 결과들로 대형삼축압축시험장비 전체 시스템의 검증이 이루어져 향후 본 장비로 수행되는 동적물성 시험결과에 대해 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 실제 조립재료에도 적용하여 시험 장비의 적용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045) “대형지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구”과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고 문헌

1. 권기철(1999), “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법” 한국과학기술원 토목공학과 박사학위논문
2. 신동훈, 오병현, 박한규, 박성진, 황성준(2000), “조립재료의 변형-강도 특성에 대하여(I) -대형삼축시험장치의 개발” 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp.311-318.
3. 신동훈(2003), “대형진동삼축시험기를 이용한 암석재료의 동적변형특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집, pp.299-308
4. 신동훈, 김기영, 전제성, 조성은(2004), “대형삼축시험시 내부측정식 미소변위 측정기법에 의한 조립재료의 탄성계수 산정”, 대한토목학회 2004년도 정기학술대회 논문집, pp.1439-1443.
5. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990), “Development of Synthetic Specimens for Calibration and Evaluation of M_R Equipment” In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.