지반특성을 고려한 가드레일 지주의 안정성 평가

Stability Evaluation of Guardrail Posts Based on Geotechnical Properties

임유진*, 누엔 티엔 하이**, 양성철***
Yujin Lim, Tien Hai Nguyen, Sungchul Yang

1. 서 론

도로 안전시설물의 종류로는 안전방호책(guard rail), 중앙분리대, 교량난간 등이 있으며 각 구조물 마다 다양한 형태가 개발되어 있거나 새로운 형태 또는 안전개념을 고려한 개량제품이 계속 제안되고 있다. 특히, 근래 국도의 양방향 차선 중앙에 집중 설치되고 있는 철제 중앙분리대는 종방향 구조물로서 차선을 이탈한 차량의 운동에너지를 효과적으로 흡수하여 탑승자의 안전을 도모하고 충돌차량이 과도하게 건너편 차선을 침범하여 후속사고를 유발하지 않도록 하는 것이 주 설치목적이다. 이중 연성 방호책은 통상 가드레일이라고 불리는 파형강판과 철제의 원형지주(post)로 구성된다. 연성 방호책 및 콘크리트 중앙분리대의 사용에 의해 차량의 양방향 주행중 대향차선으로의 월선에 따른 대형교통사고의 예방과 사고빈도를 줄여 줄 수 있음이 확인됨으로써 정부에서는 "도로안전시설 설치 및 관리 지침"(건설교통부, 1996) 중 방호울타리에 관한 규정을 제시함으로써 도로설계가 안전성을 고려하여 이루어지도록 유도하고 있다. 그림 1.은 고성토부에 사용되는 방호책의 일례를 도시한 것이다.

그동안 방호책 분야에 대한 국내 연구 성과는 상부구조물인 방호책에 대한 동역학적 구조해석 등에 국한되어있었으며(우광성 등, 1994(a), (b); 장승필, 1990; 김기동 외, 1997; 최홍수, 2003) 연구 방법도 외국에서 개발된 충돌 해석 프로그램을 이용하는 등(이학은 외, 1996) 매우 제한적이었다. 근래 한국도로공사에서는 충돌시험장을 개설하여 실물차량과 방호책을 이용한 차량 충돌시험을 실시(한국도로공사, 2004)하고 있다. 그러나 이들 대부분의 연구와 시험은 상부구조물의 구조적 안정성에 관한 것이며 방호책을 지지하는 지주와 도로하부기초 사이의 역학적 및 상호연관성에 관한 것은 전무한 실정이다. 특히 국내의 방호책 설치요령은 일본의 설치규준을 준용하고 있고 국내의 도로 설계기준, 지형, 통행차량의 특성 등과 교통환경을 심도 있게 고려하지 않고 있다. 따라서 산악지형이 많아 토공사시 절·성토의 변화가 심한 국내 지형 실정을 고려한 방호책 지주 설치요령이 제정되어야 필요가 있다.

본 연구는 연성 방호책의 기초역할을 하는 지주(post)의 설계 지반물성치를 파악하는데 사용될 수 있는 시험법을 체계화 하는 것으로서 지주와 같은 횡방향지지 구조물의 지지력과 지반물성치의 상호관계를 합리적으로 정량화 시킬 수 있는 공내재하시험법(PMT)을 지주설계에 적용하기 위한 것이다.

* 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수(yujin@mail.pcu.ac.kr/Tel. 042-520-5402)
** 전 배재대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(nthai_humg@hotmail.com/Tel. 042-520-5855)
** 홍익대학교 건축공학과 조교수(scyang@hongik.ac.kr/Tel. 041-860-2561)

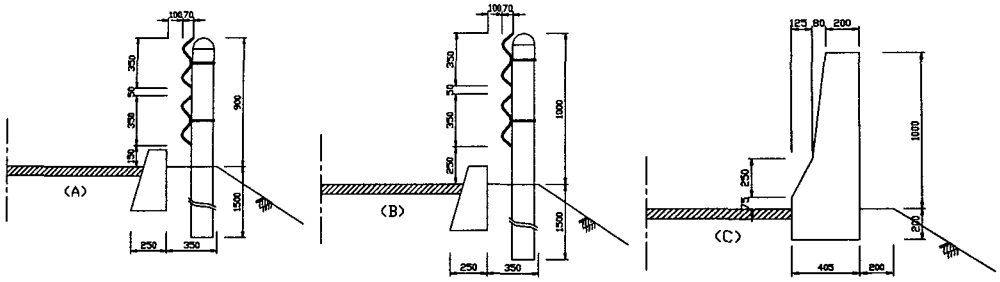


그림 1. 고성토부 길어깨에 사용되는 방호책의 대표적 단면: (a) 2중 가드레일(경간장 4m), (b) 2중 가드레일 (경간장 2m), (c) 콘크리트 방호벽

2. 연성 방호책 지주의 횡방향 지지력 예측

2.1 지반특성과 지주 거동의 상관성

횡방향 하중을 받는 지주의 거동은 지주의 주변 지반에 대한 상대강성에 따라 휨성 또는 강성으로 구분할 수 있다. 이를 구분하기 위해 상대강성을 아래와 같이 정의한다(Matlock & Reese, 1986).

$$RR = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_S}} \tag{1}$$

여기서, E= 철제지주의 탄성계수, I=단면2차모멘트, E_S=주변흙의 탄성계수로 정의된다.
따라서 방호책 지주의 경우 주어진 지반강성 대비 지주의 휨강성 크기가 지주의 근입깊이 결정에 핵심적인 요소로 작용한다. 그러므로 지반조건의 파악이 지주의 설계에 앞서 선행되어야 하며 공내재하시험이 이와 같은 목적으로 사용될 수 있다.

2.2 횡방향 하중을 받는 지주의 횡적 극한 지지력

지반공학적 입장에서 차량충돌시 방호책지주의 안정성은 지주 주변지반의 파괴관점에서 파악할 수 있다. 따라서 지주의 극한지지력을 예측할 수 있어야 한다. 방호책 지주는 충격시 횡방향 하중만을 받는 것으로 가정할 경우 지주의 지지력을 정적인 상태에서 파악할 수 있다. 지반의 구성토질이 점성-사질토(c-ϕ 흙), 점성토 또는 사질토 인지의 여부에 따라 크게 세 가지의 해석법이 제안되어 있다. c-ϕ 흙지반의 경우 Brinch-Hansen(1961)의 해석법이 강성의 짧은 말뚝을 대상으로 제안된 바 있으며 별도의 토압계수를 사용하여 다층지반에 적용가능한 장점이 있다. Broms(1964a, 1964b)는 먼저 사질토와 점성토에 각각 적용 가능한 극한 지지력 이론을 토압론에 근거하여 제시하였으며 해당 이론은 단주와 장주 모두 적용 가능하지만 다층지반과 c-ϕ 흙지반에는 적용불가능한 단점이 있다. 또한 Randolph(1985)는 별도의 선형토압 이론을 가정하여 점성토 및 사질토 지반에 타설된 강성의 단주에 적용 가능한 해석이론을 제안한 바 있으나 c-ϕ 흙지반에는 적용될 수 없는 한계점이 있다(그림 2 참조).

점성토 지반에 적용된 Randolph이론(1985) 및 Broms(1964)이론의 경우 설계를 위한 최종목적은 횡방향하중 H 및 회전점의 깊이 h를 계산하는 것이며 이는 가정된 토압분포 및 지반의 비배수강도(C_U)값을 이용(그림 2 참조)해 지주에 가해지는 수평력의 평형 및 회전점에 대한 모멘트 평형으로부터 계산된다. 단주의 경우 Randolph(1985)이론을 적용하고 수평력의 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$H+9C_Ud(L-h)=9C_Udh-10.5C_Ud^2 \tag{2}$$

$$H(e+h)=9C_Udh(\frac{h}{2})-10.5C_Ud^2(h-d)+9C_Ud\frac{(L-h)^2}{2} \tag{3}$$

따라서 위의 식으로부터 횡방향 하중 H를 구할 수 있으며 역으로 주어진 하중에 대해 소요 근입깊이 L을 구할 수 있다.

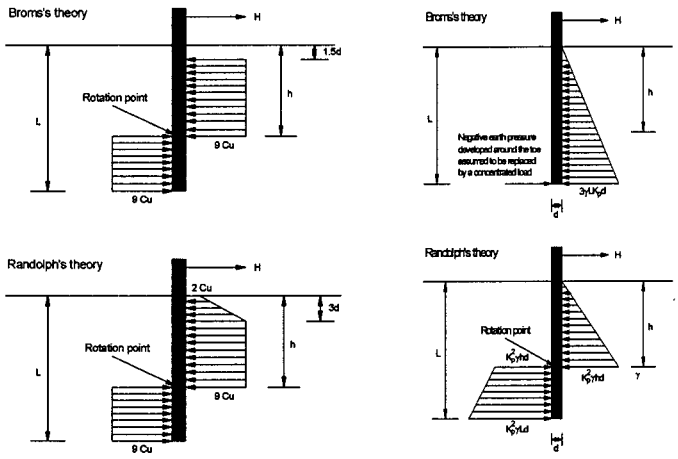


그림 2. 횡방향 극한 지지력 산정을 위한 가정의 비교: (a) 점성토, (b) 사질토

3. 공내재하시험을 이용한 지주의 거동예측

3.1 공내재하시험을 이용한 지주의 지반물성평가

국내 관행상 방호책 지주를 직접타설할 경우 관입깊이는 1.5m 정도이다. PMT를 이용할 경우 시험값을 이용해 두 가지 방법의 지주해석이 가능하다. 첫째 방법은 공내재하시험의 한계압(P_L)을 이용하는 것이며 시행착오법에 의해 주어진 근입깊이에서의 횡방향 극한하중 또는 주어진 하중하에서의 근입깊이를 결정할 수 있다. 두 번째 방법은 PMT로부터 구한 탄성계수를 이용하여 지주의 하중-변위(p-y)해석을 실시함으로써 적정 하중의 재하여부를 판단하는 것이다. 먼저 공내재하시험의 한계압은 이론상 프로브가 가압되어 무한팽창 하였을 경우의 압력이다. 실내에 모형지반을 구성할 수 있는 토조를 그림 3.과 같이 제작하고 지주 타설전의 지반물성치를 획득하기 위하여 공내재하시험을 실시하였다. 멤브레인 저항 등 보정을 마친 공내재하시험기는 천공후 소정깊이(그림 3. 참조)에 거치한 후 가압하였다. 공내재하시험으로부터 구한 보정후의 대표적인 가압력(p)~변형율($\Delta R/R_o$) 관계도는 그림 4.와 같다.

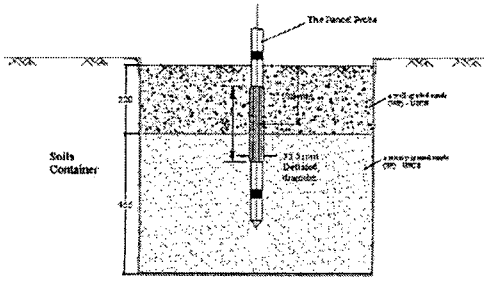


그림 3. PMT 프로브의 토조내 거치 개략도

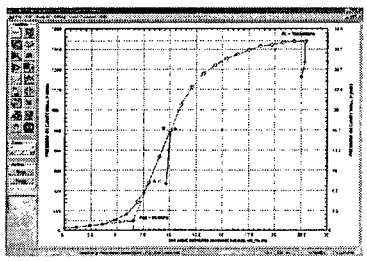


그림 4. PMT 데이터 후처리 프로그램에 의한 그래프

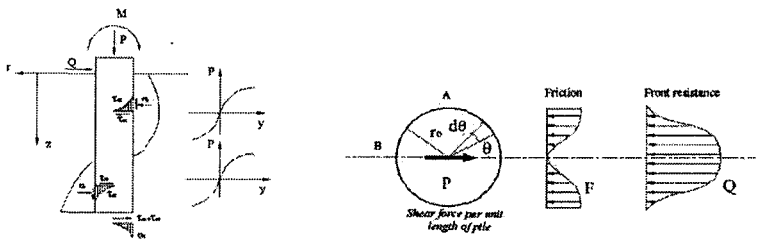
공내재하시험을 활용할 경우 지주의 특성길이와 횡방향 스프링계수에 의해 아래 식으로 상대강성을 구별할 수 있다.(Briaud, 1992)

$$L_O = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}} \tag{2}$$

여기서, K=횡방향 스프링 계수이며 직타 강제지주의 경우 $K=2E_R$(그림 4.의 재재하부 탄성계수)로 정의 된다. 지주의 길이가 특성길이 이하일 경우 강성의 짧은 지주로, 특성길이의 3배 이상일 경우 휨성의 긴 지주로 거동하는 것으로 판단한다.

3.2 PMT에 의한 P-y 곡선의 획득

PMT결과를 이용, P-y곡선을 유도할 수 있으며 이를 COM624 등의 유한차분 프로그램의 입력치로 사용하면 휨모멘트 및 변위와 같은 지주의 횡방향 거동을 예측할 수 있다. 횡방향 재하시 지주에 대한 지반의 저항은 전면저항 Q와 마찰저항 F로 구분된다 (그림 5.(b)). 총저항 P는 변위 y가 발생할 때 Q와 F의 합으로 볼 수 있으며 P-y 곡선식은 F-y곡선에 Q-y 곡선 그래프를 더한 것이다. F-y곡선과 Q-y 곡선은 시험대상 지주가 타입식에 의해 설치되므로 공내재하시험 결과의 재재하 부분에서 구하였다. PMT시험의 처리와 지주에 대한 P-y해석을 일괄 실시할 수 있는 해석프로그램(PPOSTPMT)을 제작하였다.



(a) (b)

그림 5. 횡방향 재하시 지반의 저항성분 구성: (a) 저항메카니즘, (b) 저항성분 Q 및 F

전면저항 Q는 아래 식에 의해 계산 된다:

$$Q = \frac{P^*}{\alpha} \times B_{pile} \times S_Q \times \beta \tag{3}$$

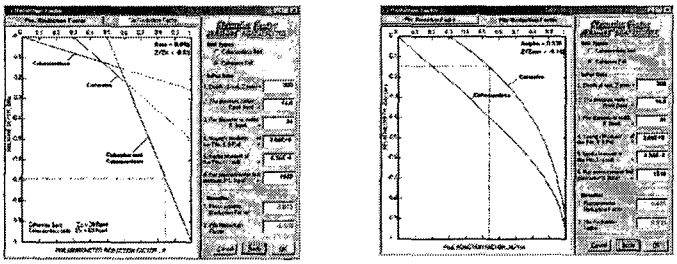
지주의 횡방향 변위는 아래 관계식으로부터 구한다.

$$y_Q = \frac{\Delta R_C}{R_C} \times R_{post} \tag{4}$$

마찰저항 F는 아래 식에 의해 계산 된다:

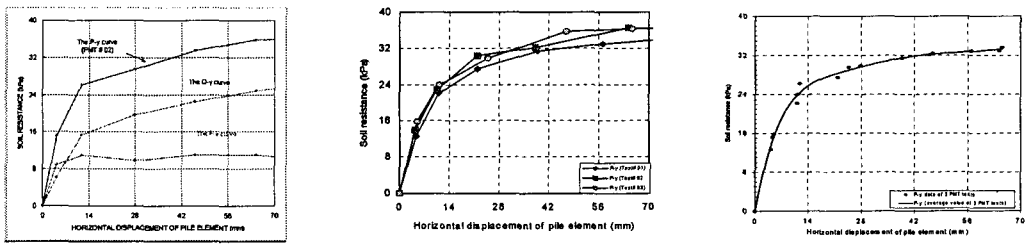
$$F = \tau \times B \times SF\frac{1}{\beta} \tag{5}$$

여기서 P^*=순공내압, τ=전단응력, α 및 β=지주와 공내재하시험 감소계수, R_{pile}=지주반경, B_{pile}=지주직경, S_Q=지주 형상계수(원형지주=0.8), SF=지주형상계수(원형지주=0.8)이다. 마찰저항 F에 대한 변위 y도 식(4)와 유사한 방법으로 구한다. 지주에 대한 횡방향 재하시 지주의 한계깊이(critical depth)로 인해 공내재하시험기 및 지주에 대한 감소계수를 고려하여 저항치를 보정한다. 사용된 공내재하시험기에 대한 감소계수는 그림 6.(a)와 같고 지주에 대한 감소계수는 그림 6.(b)와 같으며 모두 PPOSTPMT 프로그램 내에서 계산된다. 감소계수를 고려하여 공내재하시험 데이터로부터 유도된 p-y 곡선 그래프는 그림 7.과 같다. COM624 프로그램 해석을 위해 시험에서 구한 p-y 그래프의 평균값을 대표치로 사용하였다.



(a) (b)

그림 6. 감소계수 계산창: (a)공내재하시험 감소계수, (b)말뚝 감소계수



(a) (b) (c)

그림 7. p-y 곡선 작성창:(a) 대표적인 p-y, F-y 및 Q-y 그래프, (b) 시험에서 구한 p-y 그래프, (c) 평균 p-y 그래프

3.3 지주에 대한 실내 모형시험

그림 8.과 같은 실내 충돌시험기를 제작하였다. 소형의 모형차량에 의해 가상 가드레일지주에 대한 충격시험을 실시할 수 있으며 정적 및 cyclic 수평재하시험을 별도 실시할 수 있도록 유압장치로 제작되었다. 모형차량은 가압된 공기에 의해 사전 결정된 속도로 발사될 수 있다. 가드레일 지주에는 가속도계 또는 스트레인 게이지를 부착하여 차량의 입사각과 충격속도, 가드레일의 재질, 두께 및 형상 등에 따른 충격력과 감가속도 (deceleration) 및 횡방향 재하에 따른 지주내 휨변형률을 측정토록 하였다. 그림 9.는 각종 소요 시험기를 부착한 후의 횡방향 정재하시험 및 충격시험장면이다.

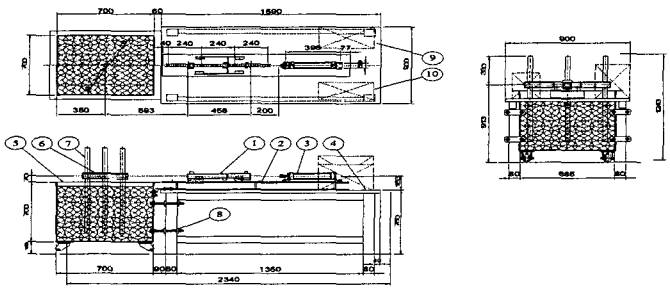
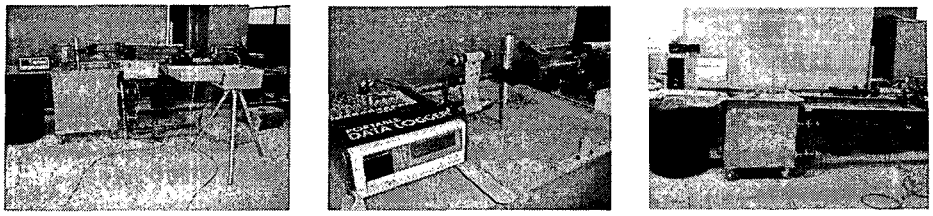


그림 8. 실내 모형충돌 시험기 개념도: ①Bogie 모형차량, ②track 및 재하장치 좌대, ③압출장치, ④시험대, ⑤토조, ⑥모형 가드레일 steel plate, ⑦가드레일 지주, ⑧조임쇠



(a) (b) (c)

그림 9. 횡방향 재하 및 충격시험: (a) 횡방향재하시험, (b) 재하시험 상세도, (c) 충격시험

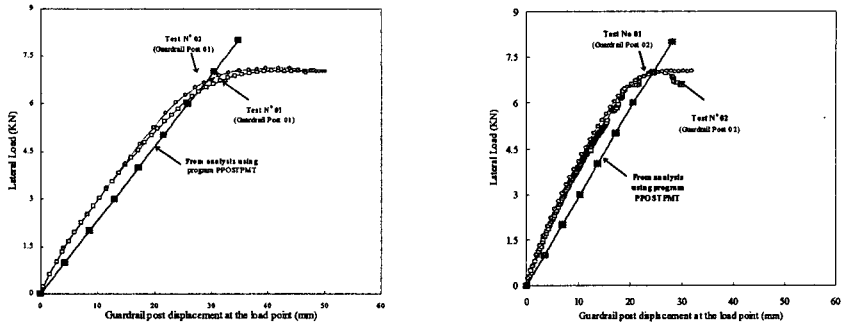
모형토조에서 사용된 흙은 화강풍화토로서 2가지(type I 및 type II)로 대별되며 대전광역시 관저동의 2개소에서 채취하였고, 통일분류법상 SP 및 SW로 분류되었다. 수정다짐시험법에 의한 시험결과 최대건조밀도($\gamma_{d\text{-}max}$)는 각 18.81 kN/m^3 및 20.11 kN/m^3, 최적함수비(ω_{opt})는 12.31 및 10.47 %이었다. 시료를 다진 후 성형하여 실시한 직접전단시험결과 내부마찰각(ϕ)=33° 및 35.5° 이었고 점착력은 71 kPa 및 75 kPa이었다. 시료를 다지기 위해 별도의 다짐 램머를 제작하였으며 이는 다짐에너지를 고려하여 충분한 다짐도와 소정의 다짐밀도(최대다짐밀도의 95%)를 확보하기 위함이다. 토조 내 흙시료는 총 5층으로 다졌으며 층 두께는 135mm씩 이었다. 토조는 가로, 세로, 높이 각 0.7m이었으며 토층의 다진 후 총깊이는 675mm가 되었다. 지주로 사용된 강관은 아래 표 1.과 같고, 지주 #2는 휨강성(EI)이 커서 강체에 가깝고 지주 #1은 휨강성이 작다.

표 1. 가드레일 지주의 제원, 근입깊이 및 지표면 상 재하높이

	지주 길이 (mm)	지주 내경 (mm)	지주 외경 (mm)	두께 (mm)	근입깊이 (mm)	재하높이 (mm)
지주 #1	1000	28	34	3	615	225
지주 #2	1000	24	34	5	615	225

4.정적 횡방향 재하시험과 PMT시험에 의한 예측치 비교 평가

횡방향 재하시험에 의해 얻어진 하중-변위 관계그래프와 유한차분 프로그램인 COM624에 의한 해석 결과를 함께 그림 10.에 도시하였다. COM624의 입력 p-y 식은 PMT시험 및 후처리 프로그램인 PPOSTPMT로부터 구한 것이다. 재하시험은 지주#1과 #2에서 모두 명확하게 횡방향 극한 하중을 확인 할 수 있었으나 COM624에 의한 해석결과에서는 극한하중이 발견되지 않았다. 이는 지주 타설과 PMT시험전 천공시 천공장 주변의 지반 교란정도가 크고 정량적 상관성이 명확하지 않은 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 PMT가 선천공인 반면 모델시험시의 지주는 타입식이므로 보다 정확한 p-y관계식을 구하기위해서는 교란정도에 따른 전면저항 Q 및 마찰저항 F의 분리가 필요하다. c-ϕ성인 다져진 화강풍화토에서 재재하 탄성계수의 사용에 의한 p-y곡선의 획득이 적절한 지를 추가로 규명할 필요가 있다. 다만 현수준에서 제한적으로 PMT에 의한 p-y관계식 도출 및 횡방향 지주해석이 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

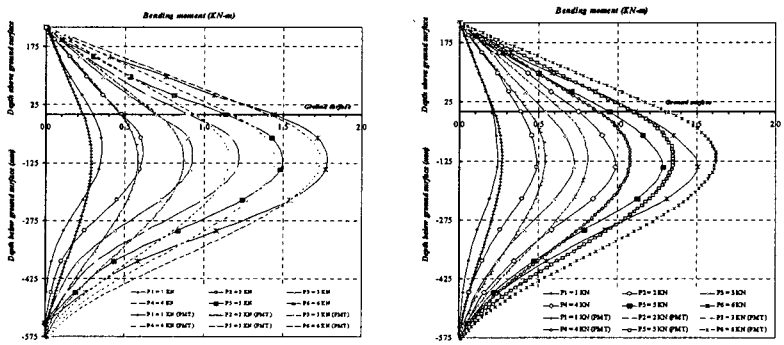


(a) (b)

그림 10. 지주의 횡방향 하중-변위의 비교: (a) 강성 작은 지주(#1), (b) 강성 큰 지주 (#2)

그림 11.은 PMT p-y식을 이용하여 COM624프로그램으로부터 획득한 지주의 휨모멘트와 횡방향 재하시험에서 구한 결과를 비교 도시한 것이다. 휨모멘트는 지주의 강성에 상관없이 실측치에 매우 근접한 결과를 구할 수 있었다. 지주의 휨모멘트는 지반강성(K)과 지주의 휨강성(EI)에 크게 영향받지 않지만 지주의 변위는 지반강성에 크게 영향 받는 것으로 알려져 있다(Briaud, 1992). 따라서 지주의 타설방법 및 PMT 시험을 위한 천공방법에 따라 보다 엄밀한 지반 교란정도 및 지주에 미치는 영향의 상관성을 파악할 필요가 있다.

가드레일 지주는 충격시 짧은 시간(t=0.01 sec)에 재하가 완료된다. 따라서 일반적인 정재하에 의해 지주의 거동을 파악하기 위해서는 속도효과를 고려하여야 한다. 따라서 재하시간 효과를 고려하여 아래 식 (6)에 의해 횡방향 극한하중(H_U)을 보정할 수 있다. 시간효과 계수 n_t는 평균 0.025이었다. 이를 식에 사용하고 정재하시험에 의한 파괴소요시간을 약 120초, 충격에 의한 파괴소요시간을 0.01초로 가정하면 충격에 의한 횡방향 극한하중은 정재하시험에 비해 약 12.7%의 증가가 기대된다. 그러나 실물충격시에는 지주의 구조적 소성파괴와 지반파괴의 가능성에 대한 판단기준 설정이 필요하며 이를 위해 추가연구가 진행될 예정이다.



(a) (b)

그림 11. 횡방향 재하에 따른 지주의 휨모멘트 분포도: (a) 강성 작은 지주(#1), (b) 강성 큰 지주 (#2)

$$\frac{H_{U-to}}{H_{U-t}} = \left(\frac{t}{t_o}\right)^{n_t} \tag{6}$$

5. 결 론

가드레일지주의 안정성을 판단하는 방법으로서 현장 원위치시험 방법인 공내재하시험(PMT)에 의한 사용법 및 해석방법을 제시하였으며 실용적인 측면에서 사용가능성을 확인하였다. 실내 횡방향 정재하 시험장치와 모형충격시험기를 제작하였으며 이를 이용해 PMT로부터 지주설계에 필요한 지반공학적 물성치 획득방법을 제시하고자 하였다. 추가적인 연구를 통해 지주의 소성파괴와 지반파괴에 대한 판단 기준설정이 시급한 실정이며 아울러 충격시 지주의 극한하중을 정확하게 예측하기 위한 PMT 연구를 계속할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원(No. R05-2002-000-01069-0)으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Briaud, J.-L., Lytton, R. L. and Hung, J. T. (1983) "Obtaining Moduli from Cyclic Pressuremeter Tests", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 5, May 1983, pp. 657-665

2. Briaud, J.-L. (1992) *The Pressuremeter*, Balkema Press

3. Hai, Nguyen Tien (2004) "Development of a Design Method Using Pressuremeter Test for Design of Posts in Metal Beam Guardrails", 석사학위논문, 배재대학교 대학원