



# 지반특성에 기초한 모형 연성방호책 지주의 정적 및 동적안정성 평가

## Static and Dynamic Stability Evaluation of Model Guardrail Posts Based on Geotechnical Properties

임 유 진\*  
Yujin Lim

### Abstract

Availability of pressuremeter test for evaluation of geotechnical properties of foundation soil into which guardrail post is to be installed is investigated in this study. First, an analysis method of the post based on the pressuremeter test is proposed that can obtain bending moment and load-deformation profiles of the post. Then static horizontal load test onto a small scale guardrail post is performed in order to get bearing capacity and load-deformation pattern of the model post. The obtained results are compared with the load-deformation curves and bearing capacity of the post obtained from the pressuremeter method. In addition horizontal impact test to the post is performed using a model bogie car in order to check failure pattern around the model foundation and to investigate dynamic bearing capacity due to deceleration and inertia force of the soil. It is verified that the pressuremeter test is so useful and reasonable technique to analyze road foundation-post interaction.

**Keywords :** guardrail post, pressuremeter test, bearing capacity, bogie car

### 요 지

연성방호책 지주(post)의 실제 지반물성치를 파악하고 이를 이용한 해석방법을 수립하기 위한 방법으로 공내재하시험(PMT)의 사용가능성을 검토하였다. 공내재하시험 결과를 이용하여 지주의 휨모멘트 및 하중-변위관계를 예측할 수 있는 해석방법의 수립가능성을 검토하였다. 모형지반과 모형지주를 이용한 정재하시험을 실시하여 하중-변위의 발생패턴과 크기를 분석하였으며 이를 공내재하시험 해석방법으로부터 구한 결과값과 비교하여 공내재하시험 해석방법의 타당성을 검토하였다. 또한 모형차(bogie)를 이용하여 모형 지주에 대한 충격시험을 실시하여 지주주변지반의 파괴형태를 파악하였으며 측정된 최대감가속도로부터 정적지지력 대비 동적지지력의 발생크기를 분석하였다. 이와 같은 시험 및 해석결과로부터 공내재하시험이 방호책 지주와 도로지반 사이의 역학적 상호연관성을 분석하기 위한 합리적인 시험방법이 될 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 연성방호책 지주, 공내재하시험, 지지력, 모형차

\* 정희원 · 배재대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수 · 공학박사



# 1. 서론

도로 안전시설물의 종류로는 안전방호책(guard rail), 중앙분리대, 교량난간 등이 있으며 각 구조물마다 다양한 형태가 개발되어 있거나 새로운 형태 또는 안전개념을 고려한 개량제품이 계속 제안되고 있다. 특히, 근래 국도의 양방향 차선중앙에 집중설치되고 있는 철재 중앙분리대는 종방향 구조물로서, 차선을 이탈한 차량의 운동에너지를 효과적으로 흡수하여 탑승자의 안전을 도모하고 충돌차량이 과도하게 건너편 차선을 침범하여 후속사고를 유발하지 않도록 하는 데에 그 설치목적에 둔다. 이들 중 연성방호책 지주는 통상 방호책이라고 불리는 파형강판과 철제의 원형지주(post)로 구성된다. 연성방호책 및 콘크리트 중앙분리대의 사용에 의해 차량의 양방향 주행중 대향차선으로의 월선에 따른 대형교통사고의 예방과 사고빈도를 줄여 줄 수 있음이 확인됨으로써 정부에서는 “도로안전시설 설치 및 관리지침”(건설교통부, 1996) 중 방호울타리에 관한 규정을 제시함으로써 도로설계가 안전성을 고려하여 이루어지도록 유도하고 있다. 그림 1은 고성토부에 사용되는 방호책의 일례를 도시한 것이다.

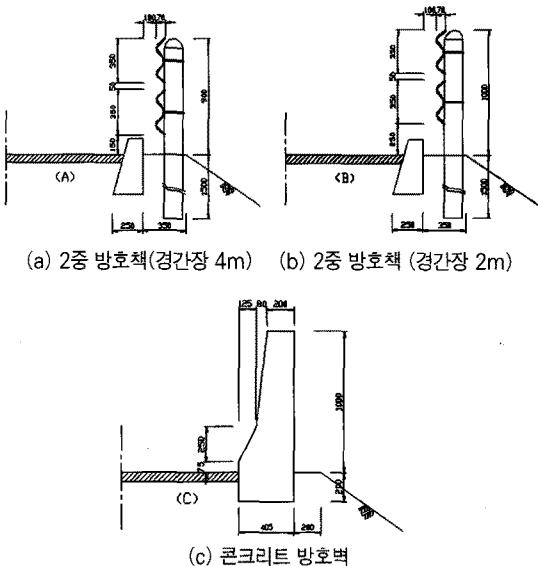


그림 1. 고성토부 길어깨에 사용되는 방호책의 대표적 단면

그동안 방호책 분야에 대한 국내 연구성과는 상부구조물로서의 방호책에 대한 동역학적 구조해석 등에 국한되어 있었으며(우광성 등, 1994(a), (b); 장승필, 1990; 김기동 외, 1997; 최홍수, 2003) 연구방법도 외국에서 개발된 충돌해석 프로그램을 이용하는 등(이학은 외, 1996) 매우 제한적이었다. 근래 한국도로공사에서는 충돌시험장을 개설하여 실물차량과 방호책을 이용한 차량 충돌시험을 실시(이성관, 2003)하고 있다. 그러나 이들 대부분의 연구와 시험은 상부구조물로서의 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 도로설계기준, 지형, 통행차량의 특성 등과 교통환경을 심도있게 고려하지 않고 있다. 따라서 산악지형이 많아 토공사시 절·성도의 변화가 심한 국내 지형실정을 고려한 방호책 지주 설치요령이 제정되어야 할 필요가 있다.

본 연구는 연성방호책 지주(post)의 설계 지반물성치를 파악하는데 사용될 수 있는 시험법과 해석법을 수립하기 위한 것으로서 먼저 지주의 횡방향 지지력과 지반물성치의 상호관계를 정량화하기 위하여 공내재시험을 이용한 지주설계방법 구축을 목적으로 한다.

## 2. 연성방호책 지주의 횡방향 지지력 예측

### 2.1 지반특성과 지주거동의 상관성

횡방향 하중을 받는 지주의 거동은, 지주의 주변 지반에 대한 상대강성에 따라 휨성(flexible) 또는 강성(rigid)으로 구분할 수 있다. 이를 구분하기 위해 상대강성(RR; Relative rigidity)을 아래와 같이 정의한다(Matlock and Reese, 1962).

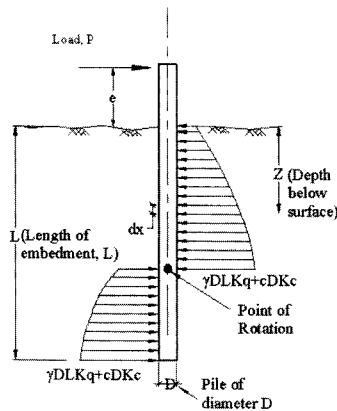
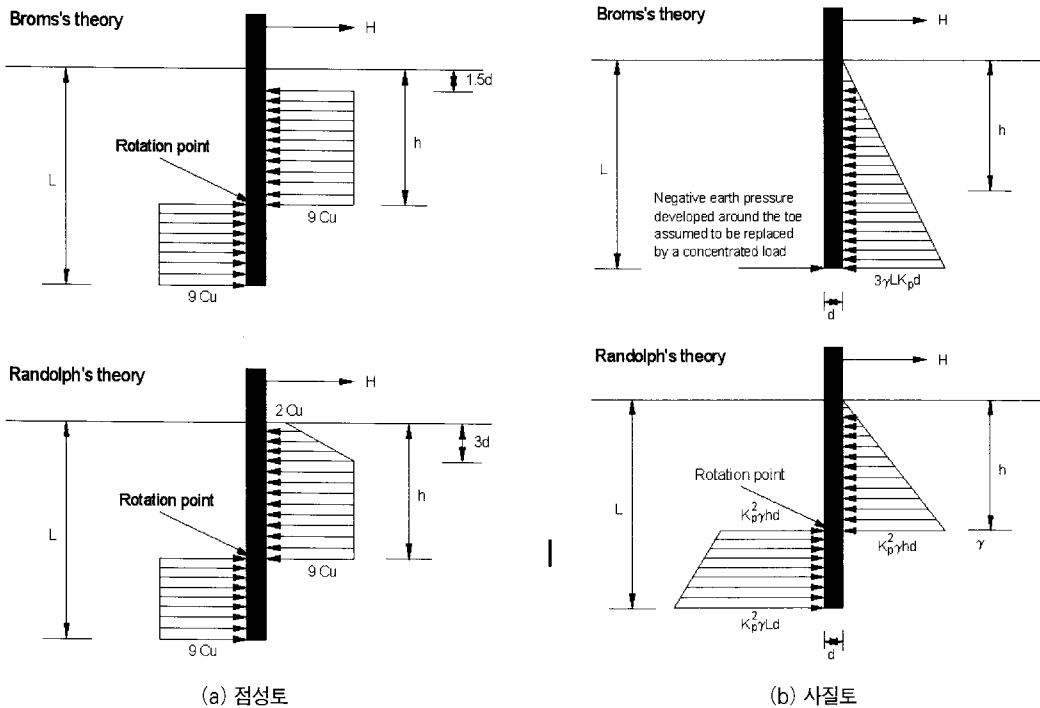
$$RR = 4 \sqrt{\frac{EI}{E_s}} \quad (1)$$



여기서,  $E$  = 지주의 탄성계수,  $I$  = 지주의 단면 2차모멘트,  $E_s$  = 주변흙의 탄성계수로 정의된다. 따라서 방호책 지주의 경우 주어진 지반강성 대비 지주의 휨강성 크기가 지주의 거동판단과 근입깊이 결정에 핵심적인 요소로 작용한다. 그러므로 횡방향 지반강성의 파악이 지주의 설계에 앞서 선행되어야 하며 공내재하시험(이하 PMT: Pressuremeter Test)이 이와 같은 목적을 이루기 위해 사용될 수 있다.

## 2.2 횡방향 하중을 받는 지주의 횡방향 극한 지지력

지반공학적 입장에서 차량충돌시 방호책 지주의 안정성은 지주주변지반의 파괴관점에서 파악할 수 있으므로 지주의 횡방향 극한지지력을 이용하면 된다. 방호책 지주는 충격시 횡방향 하중만을 받는 것으로 가정할 경우 지주의 지지력을 정적인 상태에서 파악할 수 있다. 지반의 구성토질이 점성-사질토



(c)  $c-\phi$  흙(Brinch-Hansen 식)

그림 2. 횡방향 극한지지력 산정을 위한 가정의 비교



( $c-\phi$  흙), 점성토 또는 사질토 인지의 여부에 따라 크게 세 가지의 해석법이 제안된 바 있다. Broms(1964a, 1964b)는 사질토와 점성토에 각각 적용 가능한 극한지지력 이론을 토압론에 근거하여 제시하였으며 해당 이론은 단주(short pile)와 장주(long pile) 모두 적용가능하지만 다층지반에는 적용 불가능한 단점이 있다. 또한 Randolph(1981)는 별도의 선형토압이론을 가정하여 점성토 및 사질토 지반에 타설된 강성의 단주에 적용가능한 해석이론을 제안한 바 있다. 반면  $c-\phi$ 성질을 가진 흙 지반의 경우 Brinch-Hansen(1961)의 해석법이 강성의 짧은 말뚝을 대상으로 제안된 바 있으며 별도의 토압계수  $K_q$  및  $K_c$ 를 사용하여 다층지반에 적용가능한 장점이 있다(그림 2 참조).

사질토 지반에 적용된 Randolph(1981)이론 및 Broms(1964)이론의 경우 설계를 위한 최종목적은 횡방향하중  $H$  및 회전중심점의 깊이  $h$ 를 계산하는 것이며 이는 가정된 토압분포값을 이용해 지주에 가해지는 수평력의 평형 및 회전점에 대한 모멘트 평형을 고려하여 계산한다. 단주의 경우 Randolph(1981)이론을 적용시 수평력의 평형 및 모멘트 평형은 각각 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$H = (2h^2 - L^2) \left( \frac{1}{2} K_p^2 \gamma d \right) \quad (2)$$

$$H(e+h) = \frac{1}{2} K_p^2 \gamma h^2 d \left( \frac{1}{3} h \right) + K_p^2 \gamma h d \frac{(L-h)^2}{2} + K_p^2 \gamma d (L-h) \frac{(L-h)}{2} (L-h) \left( \frac{2}{3} \right) \quad (3)$$

여기서,  $e$ =하중작용 높이,  $K_p$ =수동토압계수,  
 $d$ =지주직경,  $h$ =지주회전점까지의 깊이,  
 $L$ =근입깊이,  $\gamma$ =흙의 단위중량

마찬가지로 Broms이론을 적용하여 평형방정식을 정리할 수 있다. 반면 Brinch-Hansen(1961)의 지주에 대한 흙의 횡방향저항력 분포는 식 (4)로 표현된다.

$$p_u = \sigma'_v K_q + c K_c \quad (4)$$

여기서,  $\sigma'_v$ =유효수직응력,  $K_q$  및  $K_c$ =흙의 내부 마찰각  $\phi$  및 지주의 근입깊이비  $z/B$ 로 표시되는 토압계수로서 차트로 제시됨.

따라서 힘 및 모멘트 평형조건을 고려하여 횡방향 하중  $H$ 를 구할 수 있으며 역으로 주어진 하중에 대해 소요근입깊이  $L$ 을 구할 수 있다. 주로 강제로 만들어진 방호책 지주가 타설된 지반조건에 따라 단주 또는 장주로 거동하는 지를 먼저 평가할 필요가 있으며 이와 같은 평가는 공내재하시험을 이용해 효과적으로 수행할 수 있다.

### 3. PMT를 이용한 지주의 거동분석

#### 3.1 PMT를 이용한 지주의 지반물성평가

그림 3은 PMT시험방법과 취득된 데이터를 이용한 지반강성 분석방법을 간략히 도시한 것으로서 시험결과(ER)와 지주의 특성길이( $L_o$ )를 이용하여 식 (5)에 의해 식(1)에서 정의된 상대강성을 판단할 수 있다(Briaud, 1992).

$$L_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}} \quad (5)$$

여기서,  $K$ =횡방향 스프링 계수이며 직타 강제지주의 경우  $K = 2E_R$  (그림 3의 재재하부 탄성계수)로 정의된다. 지주의 근입깊이( $L$ )가 특성길이 보다 작을 경우 강성의 짧은 지주(단주)로, 특성길이의 3배 이상일 경우 휨성의 긴 지주(장주)로 거동하는 것으로 간주한다. 따라서 PMT로 측정된 탄성계수로부터 스프링 상수  $K$ 를 구하여 방호책 지주의 거동특성을 규명할 수 있으며 이를 근거로 근입깊이의 적정성을 평가할 수 있다.

국내 관행상 방호책 지주를 성토지반에 직접타설할 경우 근입깊이는 1.5m 정도이다. 그러나 이것은 지반물성치를 근거로 해석한 결과에 의한 것이 아니며 공사관습에 불과한 것이어서 이와 같은 근입깊이

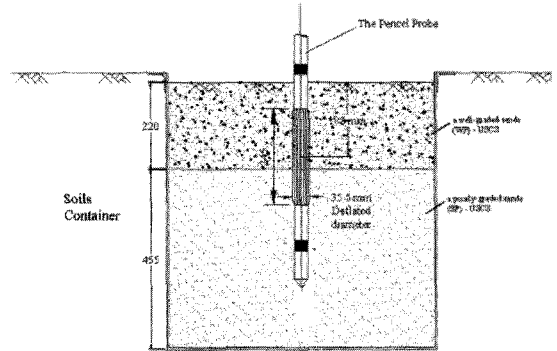
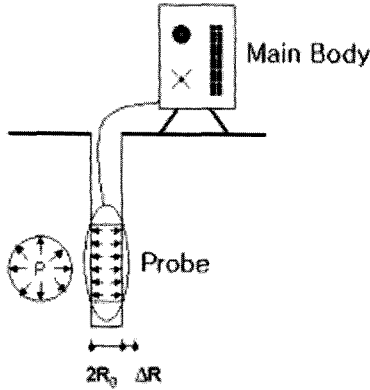


그림 4. PMT 프로브의 토조내 거치 개략도

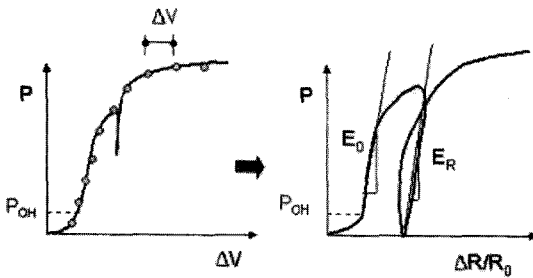


그림 3. PMT 시험의 개요도 및 시험결과 그래프 일례

가 타당한 것인지 명확히 밝혀진 바 없다.

PMT를 이용할 경우 획득한 시험값을 이용해 두 가지 방법의 지주해석이 가능하다. 첫째 방법은 PMT의 한계압( $P_L$ )을 이용하는 것이며 시행착오법에 의해 주어진 근입깊이에서의 횡방향 극한하중 또는 주어진 하중하에서의 근입깊이를 결정할 수 있다. 여기서 한계압( $P_L$ )은 이론상 프로브가 가압되어 횡방향으로 무한팽창하였을 경우의 압력이다. 두 번째 방법은 PMT로부터 구한 탄성계수를 이용하여 지주의 하중-변위( $P-y$ )해석을 실시함으로써 적정하중의 재하여부를 판단하는 것이다.

### 3.2 PMT시험을 위한 모형토조 및 모델 지주의 제작

지주가 근입되는 지반의 상대강성 크기( $K$ ) 및 횡방향재하중의 크기에 따른 지주의 근입깊이 적정성을 실험에 의해 분석하기 위해 실내모형토조를 그림 4와 같이 제작하였다.

제작된 모형토조내에 화강풍화토를 이용하여 모형 지반을 조성하였으며 사용된 흙은 화강풍화토로서 2가지(type I 및 type II)로 구분되며 대전광역시 관저동의 2개소에서 채취하였고, 통일분류법상 SP 및 SW로 각각 분류되었다. 수정다짐시험법에 의한 시험결과 최대건조밀도( $\gamma_{d-max}$ )는 각  $18.81 \text{ kN/m}^3$  및  $20.11 \text{ kN/m}^3$ , 최적함수비( $\omega_{opt}$ )는 12.31 및 10.47%이었다. 시료를 다진 후 성형하여 실시한 직접전단시험결과 내부마찰각( $\phi$ )은 각각  $33^\circ$  및  $35.5^\circ$ 였고 점착력( $c$ )은 각각  $71 \text{ kPa}$  및  $75 \text{ kPa}$ 이었다. 흙 시료를 다지기 위해 D다짐에 준하는 에너지 수준을 적용할 수 있도록 별도의 다짐 램머를 제작하였다. 토조내 흙시료는 총 5층으로 다졌으며 층 두께는 135mm씩이었다. 토조는 가로, 세로, 높이 각 0.7m이며 토층의 다진 후 총깊이는 675mm가 되었다.

방호책 지주로 사용된 강관의 규격은 표 1과 같다. 지주 #2는 휨강성( $EI$ )이 커서 단주에, 지주 #1은 휨강성이 작아 장주에 해당하도록 제작하였다.

표 1. 방호책 지주의 제원, 근입깊이 및 지표면상 재하 높이

	지주깊이 (mm)	지주내경 (mm)	지주외경 (mm)	두께 (mm)	근입깊이 (mm)	재하높이 (mm)
지주 #1	1000	28	34	3	615	225
지주 #2	1000	24	34	5	615	225



### 3.3 PMT 시험결과 및 P-y 곡선의 획득

지주 타설전 모형지반의 지반물성치를 획득하기 위하여 PMT시험을 실시하였다. 멤브레인 저항 등 보정(calibration)을 마친 공내재하시험기는 특수제작된 비트를 이용하여 천공한 후 소정깊이(그림 4. 참조)에 거치하여 횡방향 가압시험을 실시하였으며 제하 및 재재하시험을 실시하였다. PMT로부터 구한 보정후의 대표적인 가압력( $p$ )~변형율( $\Delta R/R_0$ ) 관계도는 그림 5와 같다. 모형지반의 초기접선 탄성계수( $E_0$ )는 2284~2759kPa(평균 2555kPa), 재재하 탄성계수( $E_R$ )는 14365~16470kPa(평균 15768kPa)였으며 한계압력은( $P_L$ ) 1390~1503kPa(평균 1445.6 kPa)인 것으로 측정되었다.

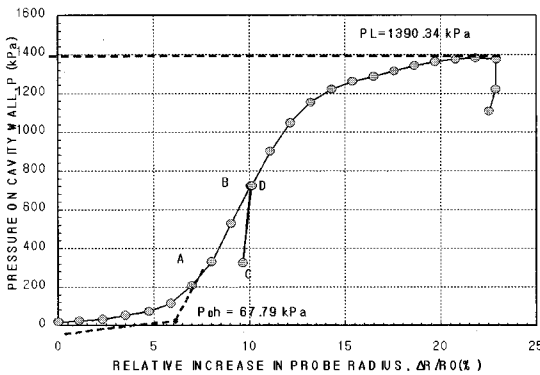
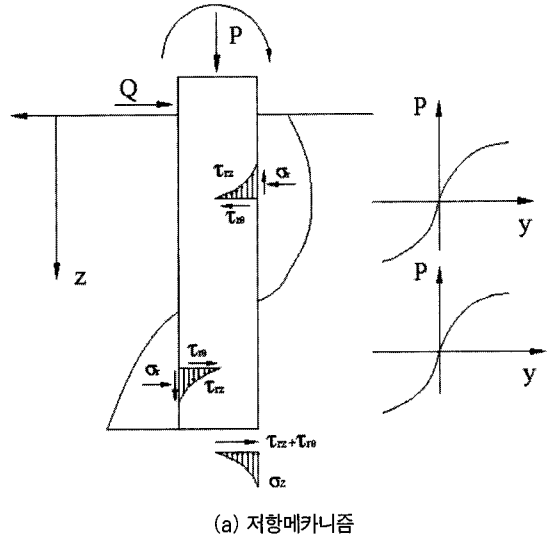


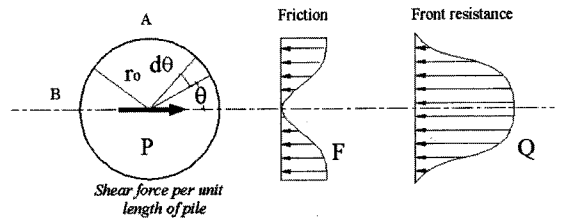
그림 5. 모형지반에서의 대표적인 PMT 가압력( $p$ )~변형율( $\Delta R/R_0$ ) 관계도

PMT결과를 이용, 하중-변위모델 즉,  $P$ - $y$ 곡선을 유도하였으며 이를 COM624 유한차분 프로그램의 입력치로 사용하면 지주의 휨모멘트 및 변위를 계산할 수 있다. 횡방향 재하시 지주에 대한 지반의 저항은 전면저항  $Q$ 와 마찰저항  $F$ 로 구분된다(그림 6(b)). 총저항  $P$ 는 변위  $y$ 가 발생할 때  $Q$ 와  $F$ 의 합으로 볼 수 있으며  $P$ - $y$ 곡선식은  $F$ - $y$ 곡선에  $Q$ - $y$ 곡선 그래프를 더한 것이다.  $F$ - $y$ 곡선과  $Q$ - $y$ 곡선은 시험대상 지주가 타입식에 의해 설치되므로 공내재하시험 결과의 재재하 부분에서 구하였다. PMT시

험의 처리와 지주에 대한  $P$ - $y$ 해석을 일괄 실시할 수 있는 해석프로그램(PPOSTPMT)을 Visual Basic을 활용하여 제작하였다.



(a) 저항메카니즘



(b)저항성분 Q 및 F

그림 6. 횡방향 재하시 지반의 저항성분 구성

전면저항  $Q$ 는 식 (6)에 의해 계산 된다.

$$Q = \frac{P^*}{\alpha} \times B_{pile} \times S_Q \times \beta \quad (6)$$

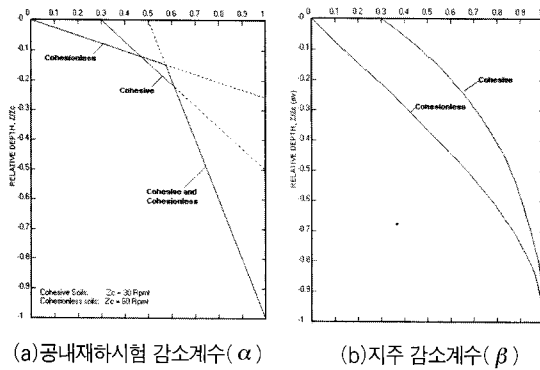
지주의 횡방향 변위는 식 (7)의 관계로부터 구한다.

$$y_Q = \frac{\Delta R_C}{R_C} \times R_{post} \quad (7)$$

마찰저항  $F$ 는 식 (8)에 의해 계산 된다.

$$F = \tau \times B \times SF \frac{1}{\beta} \quad (8)$$

여기서  $P^*$ =순공내압,  $\tau$ =전단응력,  $\alpha$  및  $\beta$ =지주와 PMT 감소계수,  $R_{pile}$ =지주반경,  $B_{pile}$ =지주직경,  $S_0$ =지주형상계수(원형지주=0.8),  $SF$ =지주형상계수(원형지주=0.8)이다. 마찰저항  $F$ 에 대한 변위  $y$ 도 식(7)과 유사한 방법으로 구한다. 지주에 대한 횡방향 재하시험 지주의 한계깊이(critical depth)로 인해 공내재하시험기 및 지주에 대한 감소계수를 고려하여 저항치를 보정한다. 사용된 공내재하시험기에 대한 감소계수는 그림 7(a)와 같고 지주에 대한 감소계수는 그림 7(b)와 같으며 모두 PPOSTPMT 프로그램 내에서 계산하였다. 감소계수를 고려하여 PMT 데이터로부터 유도된  $P$ - $y$ 곡선 그래프는 그림 8과 같다. COM624 프로그램 해석을 위해 시험에서 구한  $P$ - $y$ 그래프의 평균값을 대표치로 사용하였다.

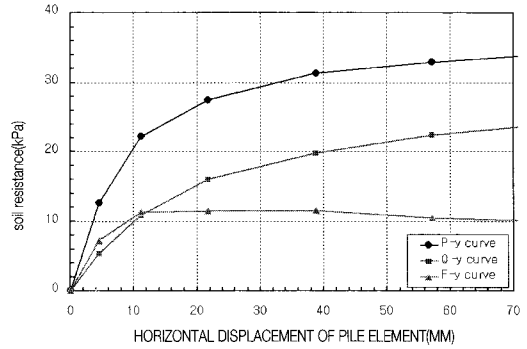


(a) 공내재하시험 감소계수( $\alpha$ ) (b) 지주 감소계수( $\beta$ )

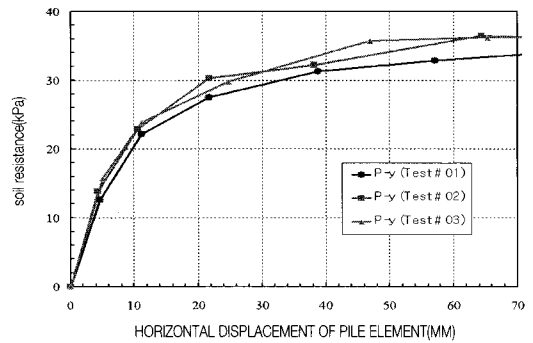
그림 7. 감소계수 및 계산항

### 3.4 지주에 대한 횡방향 재하시험 및 충돌시험

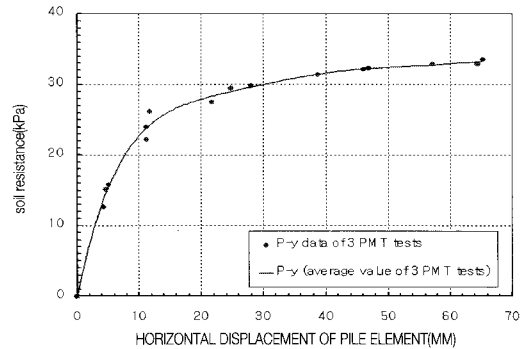
그림 9와 같은 실내 정재하시험장치 및 충돌시험기를 제작하였다. 소형의 모형차량에 의해 가상방호책 지주에 대한 충돌시험을 실시할 수 있으며 정적 및 반복 수평재하시험을 별도 실시할 수 있도록 유압장치로 제작되었다. 모형차량은 가압된 공기에 의해 사전에 결정된 속도로 발사된다. 방호책 지주에는 가속도계 또는 스트레인게이지를 부착하여 차량의 충돌



(a) 대표적인 p-y, F-y 및 Q-y 그래프



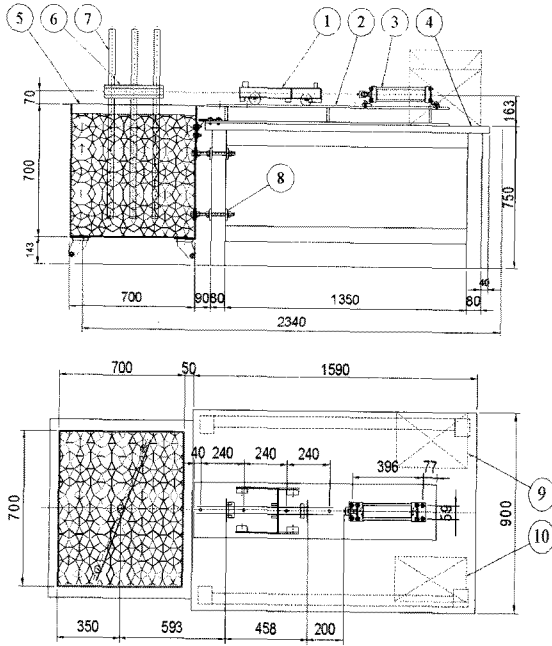
(b) 시험에서 구한 p-y 그래프



(c) 평균 p-y 그래프

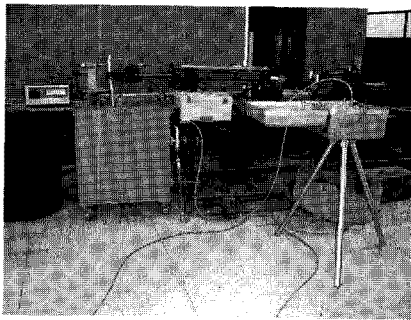
그림 8. p-y 곡선의 작성

속도, 방호책의 재질, 두께 및 형상 등에 따른 충격력과 감가속도(deceleration) 및 횡방향 재하에 따른 지주내 휨변형률을 측정토록 하였다. 그림 10은 각종 소요시험기를 부착한 후의 횡방향 정재하시험을, 그림 11은 충격시험장면과 사용된 모형차(bogie)의 제원을 도시한 것이고 무게는 5.6 kg이었다.

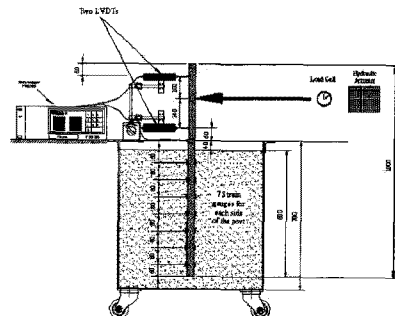


- ① Bogie 모형차량 ② track 및 재하장치 좌대
- ③ 압출장치 ④ 시험대 ⑤ 토조
- ⑥ 모형 방호책 steel plate ⑦ 방호책 지주 ⑧ 조임쇠

그림 9. 실내 모형충돌시험기 개념도



(a) 횡방향 재하시험



(b) 재하시험 상세도 및 계측기 매설상세도

그림 10. 실내 횡방향 재하 및 공내재하시험

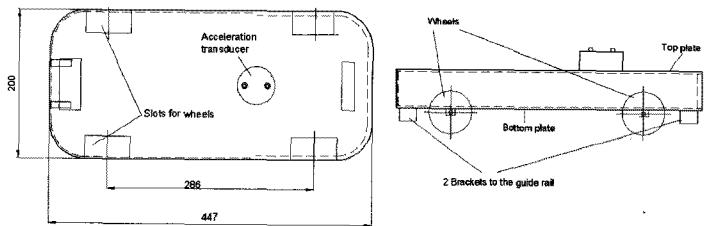
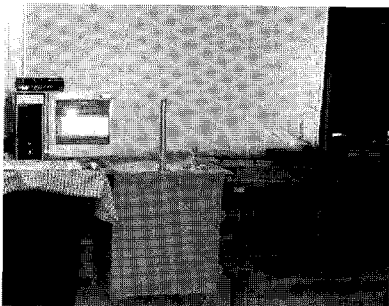


그림 11. 모형차(bogie)를 이용한 지주충돌시험 장면 및 충돌시험에 사용된 모형차(bogie)의 제원

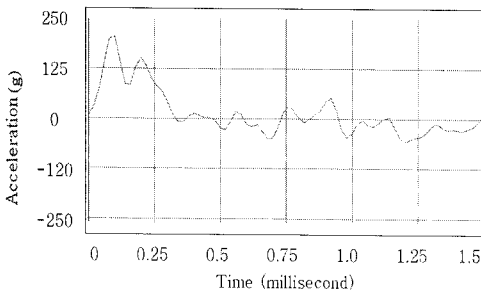




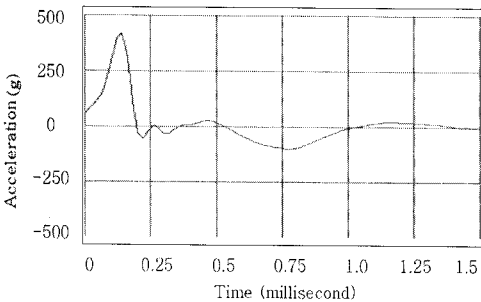
## 4. 충돌시험과 횡방향 재하시험 및 해석결과의 분석

### 4.1 충돌시험 결과

그림 12는 충격시의 모형차량 및 지주 #1로부터 읽은 감가속도의 변화 예를 도시한 것이다. 충격직전 최대가속도( $a_{max}$ )를 이용하여 계산된 힘( $F_{max}$ )과 충격직후 지주, 모형차량 및 주변 흙째기의 총질량( $m_{total}$ ) 및 평균가속도( $a_{avg}$ )를 이용하면 정적지지력 이외에 관성력으로 인한 추가지지력의 크기를 계산할 수 있다. 이를 계산하기 위해서는 충격시 발생하는 지주 주변의 흙째기의 형상과 크기를 파악할 필요가 있다.



(a) 모형차량



(b) 방호책 지주

그림 12. 감가속도 변화 일례

측정된 평균감가속도는 모형차에서 125g이었으며 방호책 지주에서는 196g이었다. 이를 근거로 하여 가속도와 관성력(inertia force)으로 인해 발생하는

지주의 동적지지력은 지주의 정적지지력에 비해 약 5~7배 정도 크게 발생하는 것으로 계산되었다. 이와 같은 동적지지력은 지주 주변지반에 형성되는 파괴흙째기의 관성저항에 의해 발생하는 것으로서 지주 주변지반에서의 가속도를 직접 측정하지는 못하였으나 동적저항력의 발생에 필요한 지주 주변흙째기의 소요평균가속도는 식 (9)와 같이 흙째기의 질량( $m_s$ )을 이용하여 계산할 수 있다.

$$a_{avg} = \frac{(P_{post} - P_{soil})}{m_s} \quad (9)$$

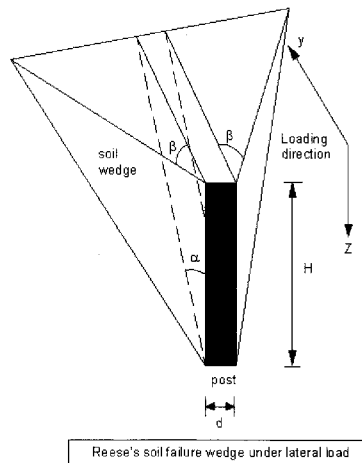
여기서,  $a_{avg}$  = 지주 주변지반 파괴된 흙째기의 평균가속도

$P_{post}$  = 지주를 소성파괴시키는데 소요된 힘

$P_{soil}$  = 정적조건에서 흙째기 파괴생성에 소요된 힘

$m_s$  = 파괴된 흙째기의 질량

위의 식을 이용, 파괴에 소요된 관성력을 계산하기 위하여 그림 13과 같은 지주 주변 파괴흙째기를 가정하였다. 이와 같은 파괴흙째기의 형상은 Reese 등 (1974) 및 Bang과 Shen(1989)에 의해 제안된 것과 유사한 것으로서 지주 또는 말뚝에 횡방향 하중이 재하될 때 하중재하지점 반대편에 발생하는 수동과 파괴되는 지반을 대상으로 한 것이다.



Reese's soil failure wedge under lateral load

그림 13. 관성력 계산을 위해 가정된 파괴흙째기의 형상



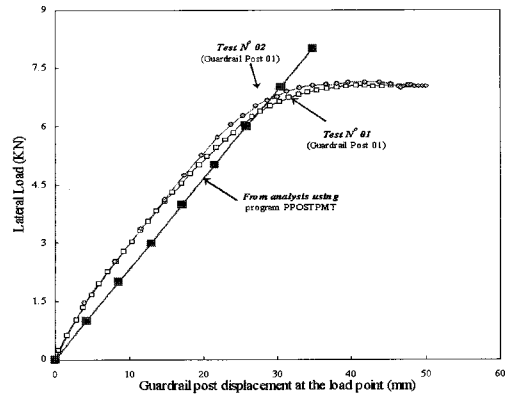
#### 4.2 정적 횡방향 재하시험과 PMT시험에 의한 하중-변위관계 예측치 비교 평가

횡방향 재하시험에 의해 얻어진 하중-변위 관계그래프와 유한차분 프로그램인 COM624에 의한 해석결과를 함께 그림 14에 도시하였다. 모델지주에 대한 재하시험시 주어진 지반조건하에서 장주 및 단주 모두 지주자체의 구조적 파괴는 관측되지 않았으나 95% 최대전조밀도와 최적함수비 조건에서 다짐된 지반조건에서 횡방향 재하에 의한 지반의 소성파괴가 관측되었으며 이때 측정된 평균횡방향 극한지지력은 지주 #1  $P_{ult} = 7.09$  kN, 지주 #2  $P_{ult} = 7.015$  kN이었다.

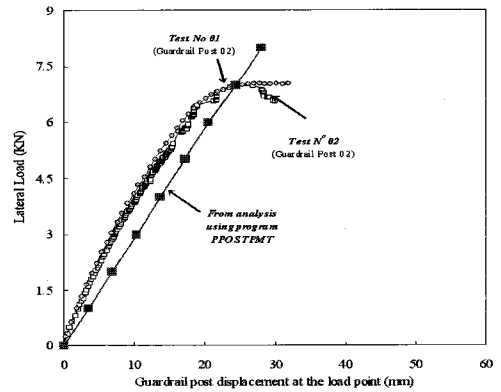
COM624의 입력  $P-y$ 식은 PMT시험과 후처리 프로그램 (PPOSTPMT)에 의해 구하였다. COM624에 의한 하중-변위 해석결과는 뚜렷한 비선형성과 극한지지력이 확인되지 않았다. 모형지주에 대한 PMT해석방법이 실측에 근접한 하중-변위 관계 및 극한 지지력을 계산하지 못한 이유로는, 모형지반을 구성하는 토립자와 지주에 비하여 PMT프로브가 너무 커서 지주와 PMT프로브 및 모형지반사이의 상사관계가 불명확하고 지주타설시와 PMT시험을 위한 천공시 공경주변의 지반교란정도가 지주직경에 비하여 크고 정량적 상관성이 명확하지 않은 때문인 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 사용된 PMT가 선천공인 반면 모델시험시의 지주는 타입식이므로 보다 정확한  $P-y$ 관계식을 구하기 위해서는 교란정도에 따른 전면저항  $Q$  및 마찰저항  $F$ 의 분리가 필요할 것으로 판단된다.

이와 같은 제한성에도 불구하고 본 해석에서 고려한 모형지주의 크기와 휨강성계수( $EI$ ), 근입깊이(625mm) 및 재하 높이(225mm)와 지반강성을 고려할 때 횡방향 하중 7 kN에서 약 25~30mm의 횡방향 변형발생에측은 본 해석방법의 실적용 가능성이 있음을 뜻한다.

그림 5의 공내재하시험 결과를 이용하여 지주가 받는 횡방향 극한지지력을 별도로 분석하였다. 그림 15와 같이 지주가 받는 극한지지력( $P_{ult}$ )을 횡방향



(a) 강성 작은 지주(#1)



(b) 강성 큰 지주(#2)

그림 14. 지주의 횡방향 하중-변위 비교

함평형식인 식 (10)과 회전점 'O'에 대한 모멘트 평형식인 식 (11)를 이용하여 구하였다. 이때 두 평형조건을 이용하더라도 2개의 식에 4개의 미지수가 발생하므로 시행착오법에 의하여 구하였다. 모형지반에서 측정된 한계압력( $P_L$ )이 1390~1503kPa이므로 이들의 평균값 1445.6kPa를 지주에 대한 지반의 최대횡방향저항력으로 가정하고 이를  $P_L$ 으로 간주하였다. 이는 모형지주와 지반조건 및 PMT시험기구 사이에 실물지주와 현장의 조건을 1:1로 재현, 반영할 수 있는 상사법칙이 적용되지 않았고, 모델지주 및 PMT 프로브의 근입깊이가 현장에 비하여 매우 얇음을 고려하여 하나의 한계압력( $P_L$ ) 측정값만을 사용한 결과이다.



$$P_{ult} = \frac{1}{2} p_{L1} D z_3 - \frac{1}{2} p_{L2} D (L - z_3) \quad (10)$$

$$P_{ult}(z_1 + z_3) = \frac{1}{2} p_{L1} D z_2 (z_3 - z_2 + \frac{2}{3} z_2) + \frac{1}{2} p_{L1} D (z_3 - z_2) \frac{2}{3} (z_3 - z_2) + \frac{1}{2} p_{L2} D (L - z_3) \frac{2}{3} (L - z_3) \quad (11)$$

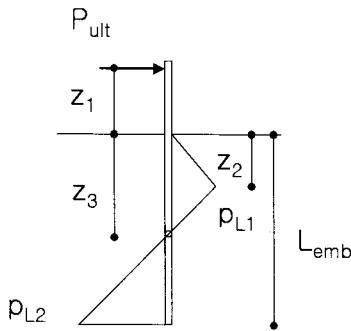


그림 15. 힘-평형관계를 고려한 횡방향 극한지지력 평가방법

지주의 횡방향지지력을, Brinch-Hansen 및 Randolph의 사질토 적용 모델에 의한 계산값과 PMT시험값을 이용한 계산값 및 모델지주에 대한 재하시험 측정값을 함께 표 2에 정리하였다. 지주하단에 부(-)의 토압이 작용하는 것으로 가정하는 제한성이 있는 Broms 모델은 비교대상에서 제외하였다. 약 4회 정도의 시행착오 반복계산에 의해 PMT시험값(한계압력( $P_L$ ))을 이용한 횡방향지지력을 구할 수

표 2. 모형 방호책지주의 횡방향 극한지지력 비교

Measured Lateral Bearing Capacity ( $P_{ub}$ ) (kN)		Computed Bearing Capacity ( $P_{ult}$ ) (kN)		
		Brinch-Hansen	Randolph	PMT
Thin Post	7.04	8.63	7.3	7.087 @ $h_3=0.43$ m
Thin Post	7.14			
Thick Post	6.97			
Thick Post	7.06			

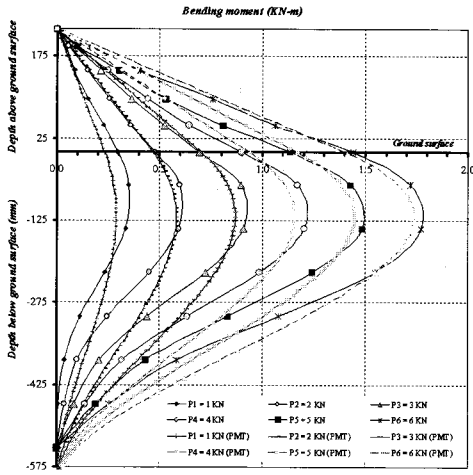
있었으며 재하시험에 의한 횡방향지지력에 가장 근접한 결과를 보였다.

그림 16은 PMT  $p$ - $y$ 식을 이용하여 COM624 프로그램으로부터 계산한 지주의 휨모멘트와 횡방향 재하시험에서 구한 실측휨모멘트 결과를 비교 도시한 것이며 지주의 강성차이에 상관없이 매우 근접한 결과를 구할 수 있었다. 따라서 PMT해석방법을 사용하면, 방호책 지주의 설계기준이 허용휨응력일 경우 최대허용변위에 의한 결정방법에 비하여 보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

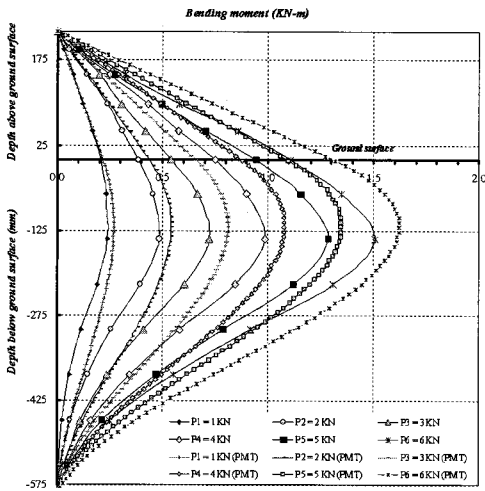
방호책 지주는 충격시 짧은 시간( $t=0.01$ sec)에 재하가 완료된다. 따라서 정재하에 의해 동적하중을 받는 지주의 거동을 파악하기 위해서는 재하속도효과를 고려하여야 한다. 재하시간 효과를 고려하여 식 (12)에 의해 횡방향 극한하중( $P_{ult}$ )을 보정할 수 있다. 시간효과 계수  $n_t$ 는 일반적인 평균값인 0.025를 사용하였다. 정재하시험에 의한 파괴소요시간을 약 120초, 충격에 의한 파괴소요시간을 0.01초로 가정하면 충격에 의한 횡방향 극한하중은 정재하시험에 비해 약 12.7%의 증가가 기대된다. 그러나 이것은 지주에 대한 모형차의 충격시 파괴되어 지주 및 모형차와 함께 거동하는 흙췌기의 감가속도와 관성효과계산이 고려되지 않은 것으로서 근입지주의 순수한 시간효과만을 고려한 것이다.

실물충격시에는 충격에 의해 구조적 파괴 즉, 소성힌지(plastic hinge)의 발생이 우선되는지 또는 지주주변의 지반이 우선 파괴되는지의 여부를 판단할 수 있는 공학적 판단기준이 필요하다. 모형시험에는 한계가 있을 수 밖에 없으므로 하중의 크기, 근입깊이, 재하높이, 지반강성 및 지주의 휨강성( $EI$ ) 등 다양한 매개변수의 변화를 유도하면서 우선 파괴의 판단기준 설정을 위한 유한요소해석(FEA)이 필요하며 추가연구가 진행중이다.

$$\frac{P_{ult-t_o}}{P_{ult-t}} = \left(\frac{t}{t_o}\right)^n \quad (12)$$



(a) 강성이 작은 지주(#1)



(b) 강성이 큰 지주(#2)

그림 16. 횡방향 재하에 따른 지주의 휨모멘트 분포도

## 5. 결론

연성방호책 지주(post)의 설계 지반물성치를 파악하고 이를 이용한 해석방법을 수립하기 위한 방법으로서 공내재하시험(PMT) 결과를 이용하여 방호책 지주의 휨모멘트 및 하중-변위관계를 예측할 수 있는 해석방법의 수립가능성을 검토하였다. 모형지반

과 모형지주를 이용한 정재하시험을 실시하고 하중-변위의 발생패턴과 크기를 공내재하시험 해석방법으로부터 구한 결과값과 비교하여 제안된 해석방법의 유효성을 검토하였다. 또한 모형차(bogie)를 이용하여 모형지주에 대한 충격시험을 실시, 지주 주변지반의 파괴형태를 파악하였으며 정적지지력 대비 동적지지력의 발생크기를 분석하였다. 이와 같은 분석으로부터 공내재하시험이 방호책 지주와 도로지반사이의 역학적 상호연관성을 분석하기 위한 가능한 시험방법이 될 수 있음을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) PMT로부터 지주설계에 필요한 지반공학적 물성치 획득 및 적용방법을 제시하였으며 적용가능성을 확인하였다. 소형방호책 지주에 대한 실내 횡방향 정재하시험을 실시하여 변위와 휨모멘트를 측정하고 이를 PMT로 얻어진  $P-y$  관계식을 이용한 프로그램 해석결과와 비교하여 방호책 지주에 대한 PMT해석방법의 유효성을 확인하였다. 또한 기존 횡방향지지력 공식에 의한 결과와 비교 검토하였으며 PMT시험결과(한계압력  $P_u$ )를 이용한 횡방향지지력 예측방법의 효용성을 확인하였다.
- (2) 모형차를 이용한 충격시험기를 제작하고 모형지주에 대한 충격시험을 실시하였으며 최대감가속도를 이용하여 충격시 지주가 받는 추가 동적지지력의 계산이 가능한지를 검토하였다. 감가속도와 관성력으로 인해 발생하는 지주의 동적지지력은 지주의 정적지지력에 비해 약 5~7배 정도 크게 발생하는 것으로 계산되었다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

건설교통부 (1996) "도로교 표준 시방서", 대한토목학회



건설교통부 (1980) "방호책설치요령"

건설교통부 (1989) "도로안전시설 설치편람"

김기동, 고만기(1997) "연성 방호구조물의 입력변수에 대한 동적 퍼포먼스 민감도 분석", 공주대학교 방재 연구센터 논문집 제1권 pp48-62

우광성, 조승형, 고만기, 김우 (1994) "BARRIER VII 프로그램을 이용한 가아드레일의 설계평가 및 지침", 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, pp191 - pp198

우광성, 고만기, 조승현, 김우 (1994) "설계변수에 의한 가아드레일의 동력학적 거동에 관한 연구", 전산구조공학 제7권 제2호

이학은, 고만기, 김기동, 한동석 (1996), "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 연성 방호구조물의 동적 퍼포먼스 평가", 대한토목학회 학술발표회 논문집(I)

장승필 (1990) "자동차 방호체계의 동력학적 거동에 관한 연구", 서울대학교 토목공학과 교량공학 연구실

최홍수 (2003) "Olson Model을 이용한 충돌하중 산정 및 연성 베리어 설계", 공주대학교 대학원 석사학위 논문

이성관 (2003) "실물충돌시험을 통한 합성수지형 방호 울타리 성능평가", 고속도로지, 제66호, 한국도로공사, pp. 30-40

Bartlett, R. and Kutler, B.L. (1992) "Lateral Load Capacity of Posts and Footings for Metal Beam Guardrails Located Close to Slopes", *Technical Report, Dept. of Civil and Env. Engineering, Univ. of California at Davis*

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*

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

Brinch-Hansen, (1961) "The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces", *Geoteknisk Inst., Bull. No. 12*

Broms, B. (1964a) "The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils" *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27-63*

Broms, B. (1964b) "The Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils" *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.90, No.SM3, pp.123-156*

Hai, Nguyen Tien (2004) "Development of a Design Method Using Pressuremeter Test for Design of Posts in Metal Beam Guardrails", *Master's Thesis, Paichai University*

Jeyapalan, J.K., Dewey J., Hirsh, T.J., Ross, H.E., and Cooner, H.(1984) "Soil-Foundation Interaction Behavior of Highway Guardrail Posts", *Transportation Research Record 970, TRB, National Research Council, pp.37-47*

Matlock, H. and Reese, L.C. (1962) "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", *Transactions, ASCE, Vol. 127, pp.1220-1247*

Ranolph, M.F. (1981) "Response of Flexible Piles to Lateral Loading", *Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 247-259*

Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974) "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", *Paper No. OTC 2080, Proc. 6th Annual Offshore Technology Conference Texas, Vol2. pp.463-483*

접 수 일: 2009. 2. 18  
 심사 일: 2009. 2. 19  
 심사완료일: 2009. 3. 2