

현장타설 말뚝의 재하능력측정을 위한 SIMBAT 시험의 소개

김승*1, 이재정*2, 박종남*3

1. 서론

유럽에서 T.G.V 고속철도 건설 당시 구조물의 충분한 재하능력을 확보하기 위해 대구경 현장타설말뚝의 사용이 불가피하였다. 대구경 현장타설말뚝의 품질을 검사하기 위한 다양한 연구가 진행되었으며 특히, 구조물의 안정성 확보를 위해 사용된 현장타설 말뚝의 신뢰성 있는 시험법이 요구되었다. 이러한 필요성에 의해 유럽의 여러 국가는 공동의 프로젝트를 구상하여 현장타설말뚝에 대한 다양한 연구를 진행하였다. 이 프로젝트에서 100여개의 실제 현장타설 말뚝을 제작하고 각 말뚝에 대하여 정재하시험과 동재하시험을 실시하였다. 프로젝트에서 말뚝주변 토질의 탄성반응, 접박반응, 파괴반응 등의 다양한 변수에 관한 연구를 통하여 말뚝의 동적 재하능력과 정적 재하능력의 상관성을 분석하였다. 프로젝트를 주관한 프랑스 C. E. B. T. P.(e.g. Paquet, 1988)는 수치해석적 시뮬레이션 기법을 사용하여 현장타설말뚝의 재하능력을 측정하기 위한 프로그램을 개발하였다. 이 시험법은 시험법의 중요한 컴퓨터 프로그램의 명칭인 SIMBAT(영어의 Simulation과 불어의 Battage(Drop)의 합성어)에서 시험법의 명칭이 명명되었다. SIMBAT 시험법은 동적 재하시험을 통해 정적 재하능력을 측정하는 최근의 시험법으로 유럽, 미국 등 세계적으로 널리 적용하고 있으며, 국내에서

도 적용되고 있다.

2. SIMBAT 시험법의 기본원리

SIMBAT 시험법의 전체적인 시스템 구성은 그림 1과 같다. SIMBAT 시험을 위해서 현장타설말뚝은 일반적으로 변형률계와 가속도계를 부착하기 위해 지면보다 말뚝직경의 약 2~3배정도 높게 타설한다. 말뚝과 가지런하게 유도관을 말뚝 두부에 설치하고 약 0.25~8톤의 추를 유도관 안에 위치시킨다.

SIMBAT 시험법에서는 말뚝 두부의 변위를 직접 측정하기 위하여 특수하게 고안된 전자 데오드라이트를 사용한다. 데오드라이트는 직접적으로 말뚝 두부의 변위의 데이터를 정확하게 취득하는 장비로서 SIMBAT 시험법의 중요한 장치중의 하나이다. 시험은 유도관 속의 추의 자유낙하에 의한 연속된 일련의

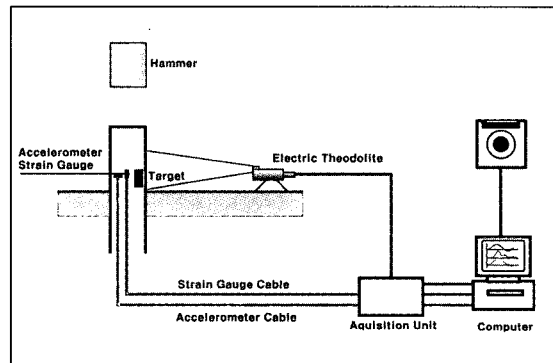


그림 1. 시스템 구성도

*1 특별회원, 미승씨엔에스검사(주) 대표이사
 *2 미승씨엔에스검사(주) 사원, 동아대학교 자원공학과 박사과정
 *3 동아대학교 자원공학과 교수

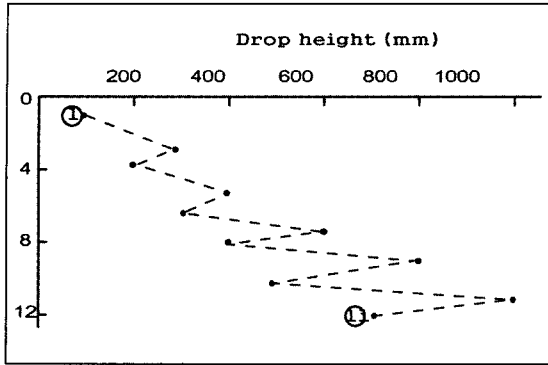


그림 2. 타격높이의 변화

타격을 말뚝의 두부에 가하게 된다(약 10회 이상). 추의 타격의 높이는 점진적으로 증가와 감소가 교차하도록 한다(그림 2). 말뚝의 두부에 부착된 한 쌍의 가속도계와 테오드라이트의 사용의 효과는 가속도계의 신호를 적분을 통하여 속도의 데이터와 변위 데이터를 취득하며, 변위데이터는 테오드라이트의 변위 데이터와 비교하여 가속도 데이터의 적분시 발생하는 적분상수를 보정한다. 이와 같은 방법으로 각각의 타격에서 침하량의 정확한 계산이 가능하다.

각 타격에 대한 동적 반발력(R_{dy})은 그림 3과 같이 구해진다. 이러한 방법은 1972년에 개발된 CAPWAP 형태의 분석과 유사하다. 하지만 말뚝 두부의 파의 속도로부터 재하능력을 측정하는 CAPWAP 방법과는 다르게 SIMBAT 시험법에서는 말뚝 두부 파의 속도보다 주변 토질의 영향을 고려한 말뚝 내부를 관통하는 파의 속도를 분석하여 재하능력을 측정한다.

C.E.B.T.P.는 SIMBAT 시험법에서의 정적재하능력과 동적재하능력의 관계를 아래의 식과 같이 제안하였다(식1).

$$R_d(\xi, v_{pen}) = R_s(\xi) f(v_{pen}) \quad (1)$$

여기서 $f(v_{pen})$ 은 토질과 관계되어 말뚝을 관통하는 파의 속도의 함수이고, ξ 는 시험의 시작부터 누적된 침하량을 의미한다.

시험의 해석은 가해진 응력에 따른 동적 재하력과

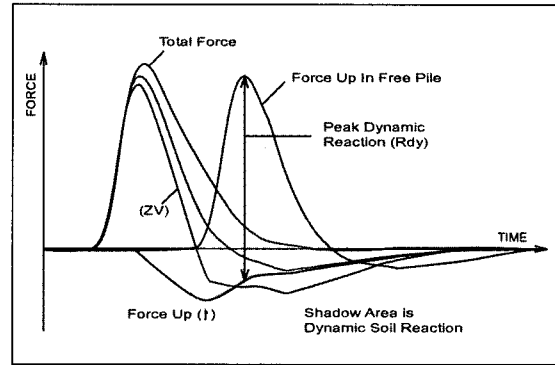


그림 3. 힘의 분리 그래프

정적 재하력의 비율을 비교검토하는 방법을 적용한다. 일반적으로 타격높이가 높고 무거운 추를 사용할수록 말뚝과 주변 토질사이의 응력의 비율은 높고 동적재하능력/정적재하능력의 비율은 커진다. 그러므로 SIMBAT 시험은 말뚝 주변 토질의 상황을 고려하여 예상되는 토질의 정적저항 범위에서 시행을 한다.

함수 $f(v_{pen})$ 에는 토질의 영향으로 인한 감쇠계수가 포함되어 있다. 측정된 말뚝의 동적 반발력은 누적 말뚝 침하량과 검토되어 일반적인 하중-침하량 그래프를 얻는다. 감쇠계수의 변화에 따른 하중-침하량 그래프의 일반적인 형태는 그림 4와 같다. 회귀분석에 의한 곡선들의 평균으로 말뚝의 하중-침하량의 그래프를 구하게되며 이는 CRP(constant rate of testing) 시험과 유사한 형태를 가지게 된다.

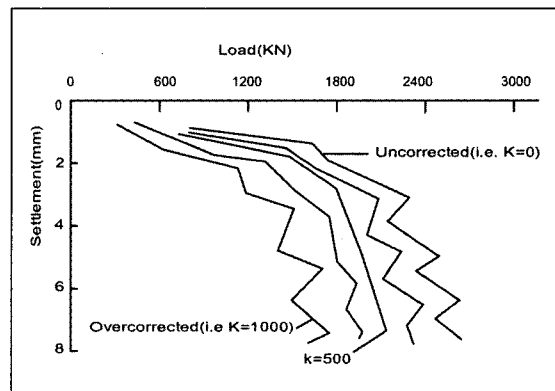


그림 4. 감쇠계수(J)에 따른 하중-침하량 곡선의 변화

3. SIMBAT 시험방법 및 해석

3.1. 시험의 준비

SIMBAT 시험의 시스템 구성도는 그림 1에 나타내었다. 힘과 파의 속도를 측정하기 위하여 가속도계와 변형률계가 한 쌍으로 사용된다. 가속도계와 응력계의 선택은 매우 중요하다. SIMBAT 시험에서는 전자 테오드라이트를 사용한다. 이것이 일반적인 항타분석(PDA)와 구별되는 특징적인 요소이다. 전자 테오드라이트를 사용하는 이유는 두 가지가 있다. 첫째는 각각의 타격의 정확한 침하량의 측정이고, 둘째는 타격순간의 짧은 시간 동안 변위의 기록을 위한 것이다. 실제로 타격은 0.080초의 순간에 2048개의 자료가 취득된다. 테오드라이트는 이순간의 말뚝의 변위를 약 0.01ms 단위로 기록하게 된다. 가속도계,

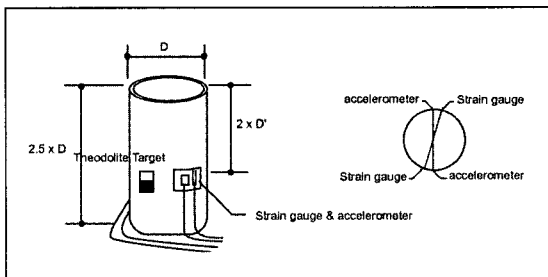


그림 5. 가속도계, 변형률계 및 테오드라이트 부착 방법

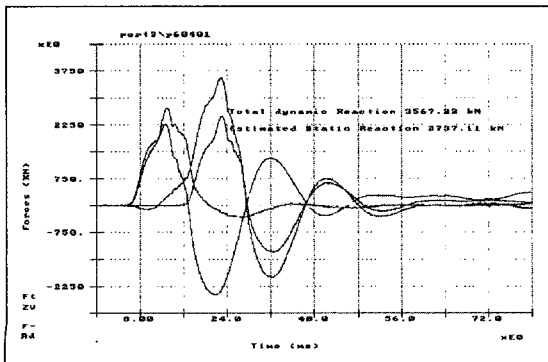


그림 6. SIMBAT 시험의 화면출력 예

변형률계 및 테오드라이트 반사판의 부착위치는 말뚝 두부로부터 직경의 약 2~2.5배의 하단에 동일한 높이에 부착한다(그림 5). 타격에 이용되는 추의 무게는 말뚝에 충분한 충격력을 발생시키기 위해 약 0.25~8톤의 무게를 사용한다. 타격은 추의 낙하고를 달리하며 10여 차례 반복한다(그림 2).

3.2. 자료의 취득

변형률계, 가속도계 및 테오드라이트는 케이블로 자료취득장치에 연결된다. 자료취득 장치는 증폭과 필터링의 기능을 하며, PC에 내장된 A/D 변환장치로 연결된다. 자료는 타격과 동시 화면에 출력되며 저장된다. 그림 6은 취득된 자료의 출력화면의 예이다.

3.3. 결과의 분석

말뚝을 관통하는 파의 속도는 직접 측정되지 않고 가속도의 데이터의 적분을 통해 계산되어진다. 속도 데이터의 보정은 가속도계 데이터의 2회 적분을 통한 것과 테오드라이트의 변위 데이터의 비교를 통해 이루어진다. 이러한 보정은 SIMBAT 시험에서 가능한 특징적인 요소이다. 이러한 과정을 통한 전체적인 힘의 분리 그래프는 앞의 그림 3과 같다.

3.4. SIMBAT 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션의 목적은 두 가지가 있다. 첫째로, 전형적인 CASE 방법을 사용하여 동적 반발력의 계산을 하는 것이며, 둘째로, 말뚝의 주변과 선단에서의 토질의 저항의 분포를 결정하는 것이다. 전형적인 CASE 방법에서 최종적인 재하능력의 계산은 마지막 타격의 결과만을 분석하여 말뚝의 재하능력을 판단한다. 하지만 SIMBAT 시험법은 타격높이에 따른 각각의 타격에 대한 기록과 함께 각 타격의 상관성을 분석하여 말뚝의 재하능력을 결정하고 이를 통

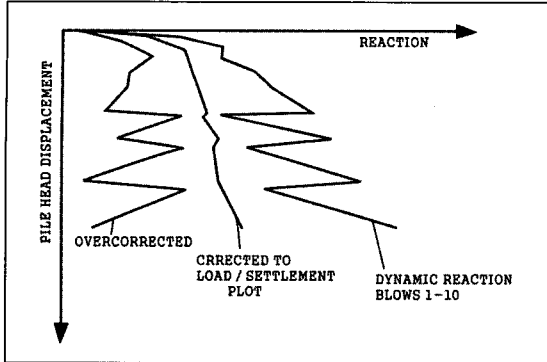


그림 7. 시뮬레이션을 통한 하중-침하량의 관계

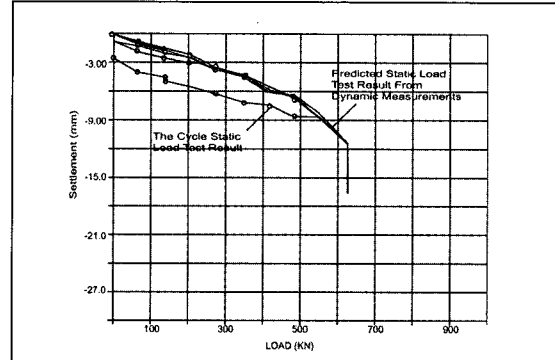


그림 8. 정재하시험과 동재하시험의 비교

해 정적 재하능력을 유추한다.

그림 7은 시험을 통해 취득된 동적 재하량과 시뮬레이션을 통해 계산된 정적 재하량의 하중-침하량의 관계를 나타낸 것이다. 그림 8은 연속적인 타격을 통해 취득된 자료를 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 정적 재하능력을 계산하고 그것과 실제 정재하시험의 그래프와 비교를 나타낸 것이다. 이러한 분석이 가능하기 때문에 SIMBAT 시험법을 정·동적 재하시험이라 불려진다.

식(2)는 정적 재하능력을 계산하는 SIMBAT 시험법에서 적용되는 것이다. 이 계산식은 불연속적인(타격높이가 일정한) 단일 타격의 시험법인 CASE 방법의 재하능력 계산식인 식(3)과 비교된다. 식(2)는 일련의 연속적인(추의 낙하고가 일정하게 증감하는) 타격을 시행하는 SIMBAT 시험법 재하능력의 계산식이며, 이 계산식은 SIMBAT 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램에 적용된다.

$$R_{st} = R_{dy}(K_{pen})^a \quad (2)$$

$$R_{st} = R_{dy} - J(ZV_1 + F_1 - R_{dy}) \quad (3)$$

여기서, R_{dy} : 동적지지력

R_{st} : 정적지지력

J : 감쇠계수

V_1 : 타격순간의 말뚝 두부의 속도

F_1 : 타격순간의 가해지는 총힘

K_{pen} : 연속적인 타격에 대한 말뚝의 매개변수

a : 토질의 매개변수

4. SIMBAT 시험법의 실시예

SIMBAT 시험법은 유럽, 미국 등에서 널리 사용되고 있으며, 국내에서도 적용이 되고 있다. SIMBAT 시험법은 수직의 직항말뚝은 물론, 경사진 사향말뚝에서도 적용이 가능하다.

4.1. 수직 현장타설 말뚝의 SIMBAT 시험의 예

사진 1은 국내 K현장 직항말뚝에서 실시된 SIMBAT 시험의 전경이다. 말뚝은 직경이 1500mm, 말뚝의 길이가 23.7m의 현장타설콘크리트 말뚝이다. 말뚝의 주변 지질상황은 상부로부터 매립토(3.22m), 점토(9.6m) 그리고 하부에 전석과 풍화토(9.2m)가 존재한다. 말뚝의 설계지지력은 평상시 446ton, 지진시 383.7ton이다.

본 말뚝은 사용말뚝이기 때문에 시험에서는 설계지지력의 보유능력의 판단이 가능한 재하량까지의 시험을 실시하였다. 시험을 통해 취득된 동적 하중-침하량의 관계와 시뮬레이션을 통한 추정된 정적 하

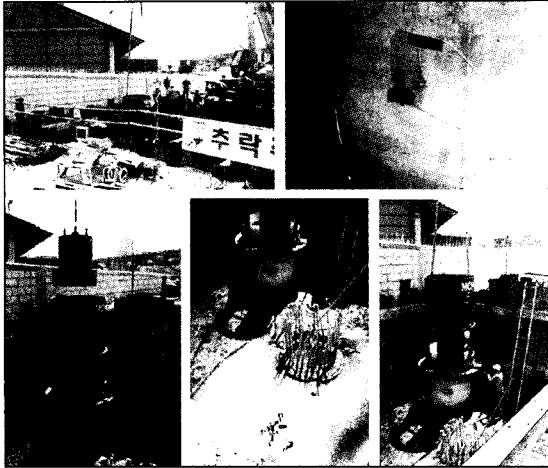


사진 1. K현장 SIMBAT 시험 사진

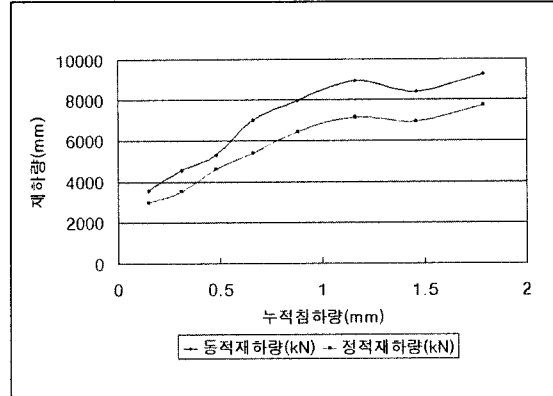


그림 9. K현장의 SIMBAT 시험의 하중-침하량 관계

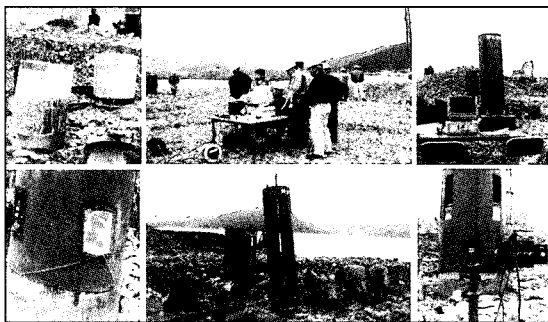


사진 2. D현장의 경사 말뚝에 대한 SIMBAT 시험 사진

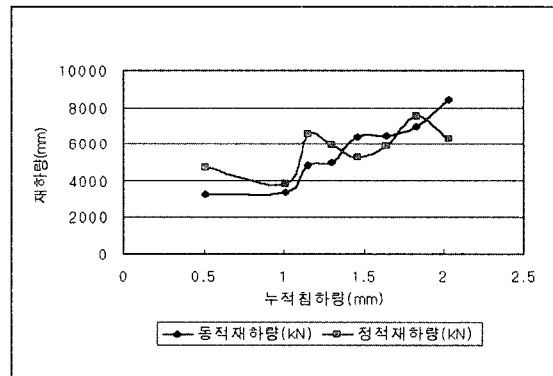


그림 10. K현장의 SIMBAT 시험의 하중-침하량 관계

중-침하량 관계는 그림 9와 같다. 최종적으로 최대 동적재하능력은 1620ton으로 이때 주변 토질의 마찰력은 약 286ton이고 말뚝의 선단에서의 반력은 약 1334ton으로 측정되었다. 추의 낙하고는 점진적으로 증가 시켰으며 각 타격의 자료는 SIMBAT 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 정적 하중-침하량의 관계의 결과를 도출하였다. 시험의 결과 최대 정적재하능력은 약 1420ton으로 계산되었다.

4.2. 경사 현장타설말뚝의 SIMBAT 시험의 예

사진 2는 국내 D현장 사향말뚝에서 실시된 SIMBAT 시험의 전경이다. 이 현장은 항만 구조물을 위

한 현장타설말뚝이다. 말뚝은 해저 지반에 타설하여 시공하고 해저면부터 말뚝의 두부까지 사석이 투하되어 말뚝을 감싸고 있다. 또한 말뚝과 지면의 각도는 약 80°로 약 10°의 각도로 기울어져 시공되었다. 경사 현장타설말뚝에서 추의 자유낙하를 위해 특별히 고안된 유도관을 사용하였으며, 말뚝 두부의 변위 데이터의 자료는 테오드라이트의 설치시 말뚝의 지면과의 각도를 고려하여 테오도라이트를 설치하여 각도에 따른 보정을 선행하였다. 이러한 응용성이 SIMBAT 시험이 경사를 가진 말뚝의 재하능력의 측정에서 정확한 말뚝 변위의 측정을 가능하게 한다. 시험 말뚝인 경사 현장타설말뚝의 길이는 35.3m, 직경은 1200mm이다. 말뚝의 설계지지력은 542.88ton

이다. 시험을 통한 최대동적 지지력은 1537ton이었고, 말뚝 주변 상황을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션 결과 정적지지력은 895ton으로 측정되었다. 시험을 통해 취득된 동적 하중-침하량의 관계와 시뮬레이션을 통한 추정된 정적 하중-침하량 관계는 그림 10과 같다.

5. 결론

SIMBAT 시험법은 현장타설말뚝의 재하능력의 측정을 위해 개발된 최근의 시험법이다. 말뚝 정재하 시험의 시간과 비용의 측면의 문제점을 보완한다. 또한 기존의 항타분석(PDA)에 의한 시험은 현장타설 말뚝의 적용에는 한계가 있으며 이러한 한계를 보완할 목적으로 개발된 시험법이 SIMBAT 시험법이다.

이 시험법은 타격높이의 변화를 통한 말뚝의 동적

재하능력을 시험하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 정적재하능력을 측정하는 말뚝재하시험의 방법으로 시험에 대한 신뢰성은 개발의 과정중 실제 말뚝에서의 검증을 통해 입증되어 T.G.V 고속철도 공사에서 적용되었다. 이 시험법은 유럽, 미국 등에서 그 적용이 활발히 이루어지고 있으며 국내에서도 적용되고 있다.

이 시험법은 주변 토질의 반응에 대한 영향이 중요한 변수가 된다. 그러므로 향후 실시되는 시험의 자료는 지속적으로 축적되어 체계화 되어야 하며 국내 지반조건에서의 적용을 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 하겠다.

6. 감사의 글

본 고의 작성을 위해 지원을 하여 주신 미승씨엔에스검사(주) 관계자 분들께 깊은 감사를 드립니다.

회비 납부 안내

학회 사무국에서는 연중 수시로 학회비를 수납하고 있어오니 회원여러분의 적극적인 협조를 부탁드리며, 문의사항이 있으면 사무국으로 연락하여 주시기 바랍니다.

- ① 은행 무통장(타행) 입금
한국주택은행
계좌번호: 534637-95-100979
예금주: 한국지반공학회

※ 입금시 보내시는 분의 성명, 회원번호, 송금명세를 기입해서 납부하시기 바랍니다.