지진동을 받는 중력식 안벽에 작용하는 하중산정 및 Newmark 변위해석

Evaluation of Force Components and Newmark Sliding Block Analysis of Quay Walls during Earthquake

김성렬* 하익수** 권오순*** 김명모****
Kim, Sung Ryul Ha, Ik Soo Kwon, O Soon Kim, Myoung Mo

Abstract

In this paper, new simple model is developed to evaluate the variation of the magnitude and the phase contrast of force components with the development of excess pore pressure in backfill soil. Also, Newmark sliding block analysis is performed inputting the calculated total force from new model. The applicability of new simple model and Newmark sliding block model is verified from the analyses of 1g shaking table test results.

1. 서 론

안벽에 작용하는 하중은 정토력, 동토력, 정수력 그리고 동수력이 있다. 일반적인 설계를 수행할 때 동토력과 동수력의 작용방향은 안벽의 관성력과 동일한 방향으로 작용한다고 가정한다 그러나, 최근 연구결과 배면 동적 작용력의 크기와 위상각이 배면 지반 내에 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 변화함을 관측하였다(Kohama,2000) 또한 배면 동적 작용력의 크기는 배면지반이 완전 액상화되면 배면지반이 단위중량이 흙의 포화단위중량과 동일한 점성유체와 동일하게 거동하므로 동수력을 산정할 때 일반적으로 이용되는 Westergaard 해에서 흙의 포화단위중량을 입력하여 산정할 수 있음을 밝혀내었다(Kohama, 2000; Masayuki Sato, 2000).

지진동안 안벽의 변위를 실시간으로 산정하는 간단한 방법에는 Newmark 변위 해석법(Masayuki Sato, 2000) 또는 기초지반의 저항력을 스프링으로 치환하여 시간적분법으로 변위를 산정하는 방법 등이 이용되고 있다.

그러나, 현재 배면 동적 작용력의 위상각 변화 메커니즘 규명과 과잉간극수압의 증가에 따른 정량적인 크기변화에 대한 연구가 부족하며, Newmark 변위해석을 수행할 때에도 과잉간극수압 증가에 따른 작용력 크기 변화를 고려하지 못하고 있다.

* 학생회원· 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정
** 학생회원· 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정
*** 정회원· 한국 해양연구원 선임 연구원
**** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수

본 연구에서는 배면 작용력을 정토력, 동토력, 정수력 그리고 동수력 각 하중성분으로 분리한 후 배면 동적 작용력의 크기와 위상각 변화를 각 하중크기의 합으로 모사하는 간단한 모델을 제시하였다. 그리고 Newmark 변위법에서 제시된 모델을 이용하여 산정된 총 작용력을 입력하여 안벽의 실시간 변위를 산정하였다. 또한 1-g 진동대 실험을 수행하여 개발된 모델과 Newmark 변위법의 적용성을 검증하였다.

2. 과잉간극수압 증가를 고려한 안벽의 하중성분의 산정

2.1 하중성분의 구성 및 크기 산정

안벽에 작용하는 하중은 정토력, 동토력, 정수력 그리고 동수력 성분으로 분리할 수 있다. 지진하중이 가해질 때 배면지반에 주동파괴가 발생한다고 가정하면, 정토력 F_{ES} 은 일반적인 Coulomb 주동토압식으로 산정할 수 있으며 동토력 F_{ED} 는 Mononobe-Okabe 방법으로 구한 주동토력 F_D에서 F_{ES}를 빼서 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$F_{ED} = F_D - F_{ES} \quad (1)$$

그러나, 동토력의 경우에는 배면 지반의 투수성에 따라 물과 배면흙이 함께 진동하는 경우(Case 1)와 물과 배면흙이 따로 진동하는 경우(Case 2)로 구분하여 식 (2)와 같이 산정하는 방법이 달라진다(Eurocode, 1998).

$$F_{ED} = \frac{1}{2}\gamma^{*}(1 \mp Kv)(K_A - K_{AS})H^2 \quad (2)$$

불침투성 흙의 경우: $\gamma^{*} = \gamma_{sub}$, $\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat}-\gamma_w}\frac{k_h}{1-k_v}\right)$, $F_{WD} = 0$

침투성 흙의 경우: $\gamma^{*} = \gamma_{sub}$, $\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{sat}-\gamma_w}\frac{k_h}{1-k_v}\right)$, $F_{WD} = \frac{7}{12}k_h\gamma_w H^2$

여기서, γ_{sub}, γ_{sat}: 배면흙의 수중단위중량과 포화단위중량

K_{as}, K_A: 정적 Coulomb 주동토압계수, Mononobe-Okabe 식으로 구한 주동토압계수

H, H' : 안벽의 높이와 수위

k_h, k_v : 각각 수평방향과 수직방향 지진계수

2.2 과잉간극수압의 증가에 따른 하중성분의 크기 및 위상 변화 모델

(1) 초기 과잉간극수압 발생 전

실제 안벽과 배면토체간의 작용력은 안벽과 토체의 상대적인 변위에 의하여 발생하게 되지만 본 연구에서는 배면력의 크기와 위상 변화를 힘의 합력으로 구현하고자 하였다. 그림 1 을 보면 동토력과 동수력은 가속도 작용방향과 동일한 방향으로 작용하는데, 이 때 안벽의 변위가 억제된다면 배면 작용력은 동토력 및 배면 동수력과 동일한 위상(동토력 및 배면 동수력이 증가할 때 배면작용력 증가)을 가지게 될 것이다. 반면에 배면토체의 변위가 억제된다면, 배면

작용력은 관성력 및 전면 동수력과 반대의 위상(동토력 및 배면 동수력이 증가할 때 배면작용력 감소)을 가지게 되나. 즉, 안벽이 전면 물쪽으로 움직일 때 동토력 및 배면 동수력은 배면 작용력을 증가시키려는 경향을 가지는 힘의 성분이고, 관성력과 전면 동수력은 배면 작용력을 감소시키려는 경향을 가지는 힘의 성분이 된다.

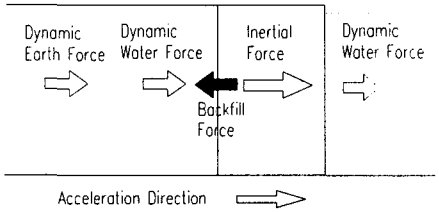


그림 1. 힘의 합력에 의한 위상각 변화모델(과잉간극수압 발생전)

진동 초기 배면 동적 작용력 F_{DI} 의 크기와 위상은 앞서 주어진 식으로 구한 동토력 F_{ED}, 안벽 관성력 F_I, 배면 동수력 F_{WD}, 그리고 전면 동수력 F_{FWD} 를 이용하여 다음 식 (3)과 같이 모사할 수 있다.

$$F_{DI} = + F_{WD} + F_{ED} - F_I - F_{FWD} \qquad (3)$$

여기서, $F_{WD}+ F_{ED} > F_I+F_{WD}$: F_{DI}는 관성력과 같은 위상

$F_{WD}+ F_{ED} < F_I+F_{WD}$: F_{DI}는 관성력과 반대의 위상

(2) 과잉간극수압이 발생하는 경우

배면 지반내에 과잉간극수압이 발생하는 경우 배면 작용력의 크기와 위상이 변하게 된다. 과잉간극수압이 증가함에 따라 배면토체는 점차 물과 같이 거동하게 되므로 토력성분은 감소하고 수력성분은 증가하게 되며, 완전 액상화가 발생하면 수력 성분만 남게 된다. 정토력 F_{ES} 과 배면 정수력 F_{WS}은 다음 식 (4)와 (5)를 이용하여 배면지반의 과잉간극수압비 r_u를 고려하여 산정할 수 있다. F_{WS}의 경우 초기에는 물의 단위중량 γ_w를 입력하지만 완전 액상화가 발생할 때(즉 r_u=1 인 경우) 뒤채움 토체를 단위중량이 γ_{sat}을 가진 점성유체로 고려할 수 있다.

$$F_{ES} = \frac{1}{2}\gamma_{sub} \times K_A \times H^2 \times (1 - r_u) \qquad (4)$$

$$F_{WS} = \frac{1}{2}(\gamma_w (1 - r_u) + \gamma_{sat} \times r_u) \times H^2 \qquad (5)$$

배면 동수력과 배면 동토력의 경우 초기 과잉간극수압이 발생하기 전에는 식 (2)를 이용하여 산정할 수 있으며, 완전 액상화가 발생한 후에는 배면 동토력의 크기는 0 이 되고 배면 동수력의 크기는 Westergaard 해에서 물의 단위중량 γ_w 대신 포화단위중량 γ_{sat} 를 입력하여 산정할 수 있다. 그러므로 동토력과 배면 동수력을 합한 배면 동적 작용력의 크기는 과잉간극수압 발생 전 식 (3)으로 계산한 F_{DI} 에서 완전 액상화가 발생한 후 Westergaard 해에서 후 흙의 포화단위중량 r_{sat} 를 입력하여 계산한 F_{DF} 가 된다. 과잉간극수압이 증가하는 중간단계의 배면 동적 작용력 F_D 의

크기는 과잉간극수압비 r_u 에 따라 다음 식 (6)과 같이 계산할 수 있다. 여기서, F_{DI} 는 관성력과 반대의 위상을 가지므로 (-)부호이며, F_{DF} 는 안벽 관성력과 동일한 위상을 가지므로 (+)부호로 정의한다.

$$F_D = - F_{DI} \times (1-r_u) + F_{DF} \times r_u \qquad (6)$$

2.3 Newmark 변위법을 이용한 안벽의 변위산정

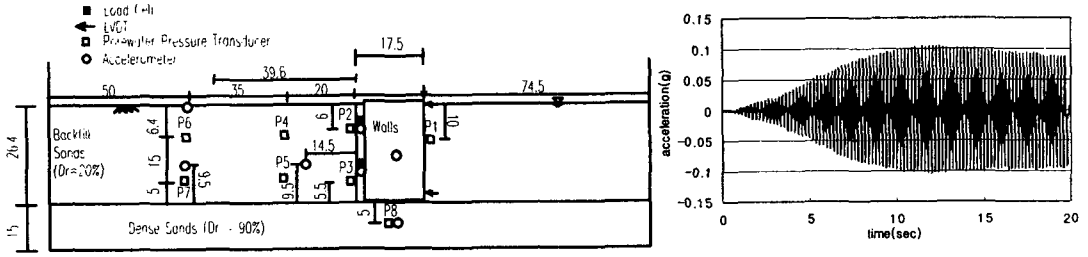
본 연구에서는 앞서 제시된 방법으로부터 과잉간극수압을 고려하여 산정한 하중을 Newmark 변위법에 적용하였다. 안벽에 작용하는 총하중을 안벽의 질량으로 나누어 작용가속도로 정의하고 안벽 저면 마찰력을 안벽의 질량으로 나누어 안벽이 미끄러지기 시작하는 항복가속도로 정의한 후 Newmark 개념을 이용하여 작용가속도 성분중 항복가속도를 초과하는 부분을 두 번 적분하여 안벽의 미끄러짐 변위를 산정하였다.

3. 진동대 시험

3.1 시험개요

본 1g 진동대 시험에 이용된 토조의 크기는 길이 194cm, 폭 44cm 그리고 높이 60cm 이다. 그림 2 는 진동대 실험 단면과 계측기 배치 그리고 입력지진파를 보여준다. 실험에 이용된 계측기는 간극수압계 9 개, 가속도계 8 개, LVDT 3 개 그리고 3 개의 Load Cell 이며, Load cell 은 모형안벽 본체와 배면판 사이에 설치하여 안벽 배면 작용력을 측정하는데 이용하였다. 입력 진동은 진동수 5hz 의 sin 파를 초기 10 초간은 최대 진폭크기까지 선형적으로 증가시키고, 나머지 10 초 동안에는 진폭크기를 일정하게 유지하였다. 최대진폭크기는 0.10g 와 0.20g 로 변화시켰다.

모형지반을 조성할 때 사용된 모래는 바다 모래로서 평균 유효입경 D_{50} 은 0.32mm, 균등계수는 1.53 그리고 최대 건조밀도(γ_{max})와 최소 건조밀도(γ_{min})는 1.66t/m^3 과 1.40t/m^3 이다. 안벽은 철로 제작하였고 단위중량은 2.57 t/m^3 이다.



(a) 진동대 실험단면과 계측기 배치 (b) 진동대 입력파

그림 2. 진동대 실험단면과 입력파

3.2 실험결과

과잉간극수압 발생량이 작은 경우(입력가속도 최대진폭: 0.10g)와 큰 경우(입력가속도

최대진폭: 0.20g)로 나누어 배면 작용력의 크기와 위상변화를 분석하였다.

(1) 과잉간극수압 발생값이 작은 경우 (입력가속도 진폭 =0.1g)

입력가속도 진폭이 0.1g 인 경우 배면지반에 발생한 과잉간극수압은 매우 작았다. 그림 3 은 배면 작용력을 정적 성분과 동적 성분으로 분리하여 정리한 그림이다. 과잉간극수압의 발생량이 작아서 배면 정적 작용력의 증가량이 작은 것을 알 수 있다.

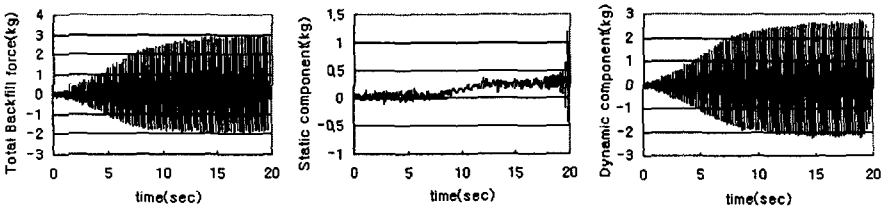
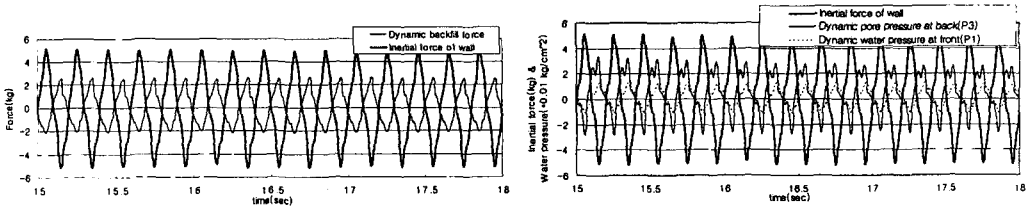


그림 3. load cell 로 계측한 배면 정적 작용력과 동적 작용력

그림 4 는 안벽 관성력과 배면 동적 작용력, 안벽 관성력과 배면-전면 동수압간의 위상차를 보여준다. 안벽 관성력과 배면 동적 작용력 그리고 안벽 관성력과 전면-배면 동수압은 180° 의 위상을 가진다. 전면수력이 감소하면 안벽에 작용하는 하중이 증가되고, 배면수력이 감소하면 안벽에 작용하는 하중이 감소된다. 안벽 관성력과 배면 수력이 반대의 위상을 가지는 이유는 흙의 투수성이 낮아서 배면 흙과 물이 함께 움직이기 때문으로 판단된다.



(a) 안벽 관성력과 배면 동적 작용력 (b) 안벽 관성력과 배면 동수압, 전면 동수압

그림 4. 안벽 관성력, 배면 동적 작용력, 배면 동수압, 전면 동수압간의 위상차

(2) 과잉간극수압이 크게 발생하는 경우 (입력가속도 진폭 =0.2g)

입력가속도 진폭이 0.2g 인 경우 배면 지반에 액상화가 발생하였다. 그림 5 는 배면 작용력을 정적 성분과 동적 성분으로 분리하여 정리한 그림이다. 과잉간극수압의 정적성분과 배면 정적 작용력의 발생경향이 일치하며, 배면 동적 작용력의 경우 과잉간극수압이 증가함에 따라 진폭이 작아졌다가 다시 증가하는 경향을 보여준다.

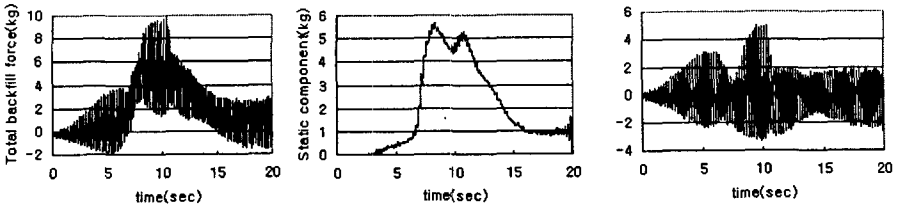
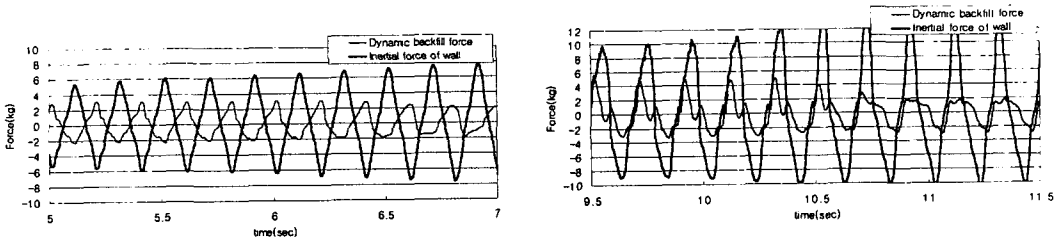


그림 5. load cell로 계측한 배면 정적 작용력과 동적 작용력

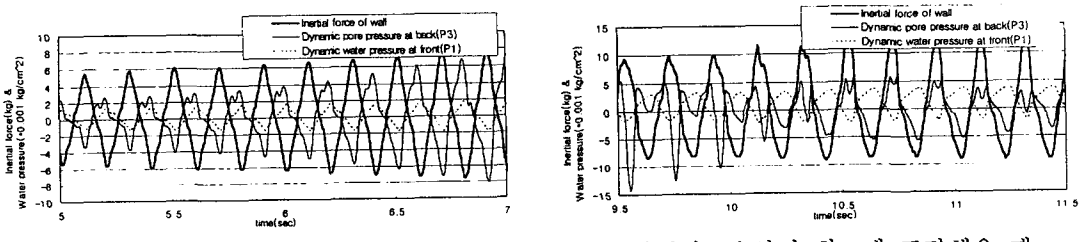
그림 6 은 안벽 관성력과 배면 동적 작용력을 과잉간극수압 발생초기와 과잉간극수압 최대값 도달 후로 나누어 표시하였다. 과잉간극수압 발생초기에는(그림 6(a)) 안벽 관성력과 배면 동적 작용력이 180° 의 위상차를 가지며, 과잉간극수압이 증가하여 최대값에 도달하였을 때에는(그림 6(b)) 안벽 관성력과 배면 동적 작용력이 동일한 위상으로 움직인다. 이렇게 안벽 관성력과 배면력 동적성분의 위상각이 변화하는 것은 과잉간극수압이 증가하여 어느 일정한 값에 도달하게 되면 뒤채움 토체의 유효응력이 감소하여 토체가 물과 같이 움직이려는 경향을 가지기 때문이다.



(a) 과잉간극수압 발생초기 (b) 과잉간극수압이 최고에 도달했을 때

그림 6. 안벽 관성력과 배면 동적 작용력간의 위상차

배면 동수압의 경우에도 과잉간극수압이 증가함에 따라 배면 동적 작용력과 동일한 위상변화의 경향을 보여주며, 전면 동수압의 경우에는 과잉간극수압의 변화에 관계없이 안벽 관성력과 항상 반대의 위상을 가진다(그림 7).



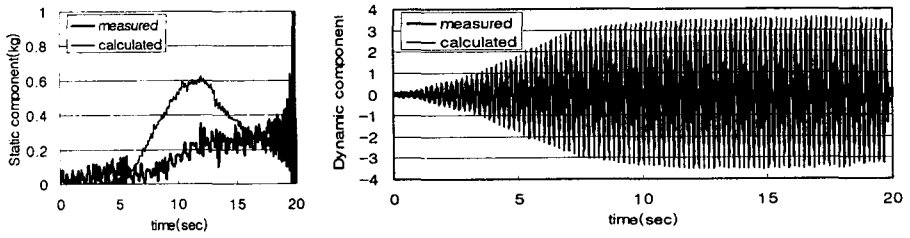
(a) 과잉간극수압 발생초기 (b) 과잉간극수압이 최고에 도달했을 때

그림 7. 안벽 관성력과 전면-배면 동수압간의 위상차

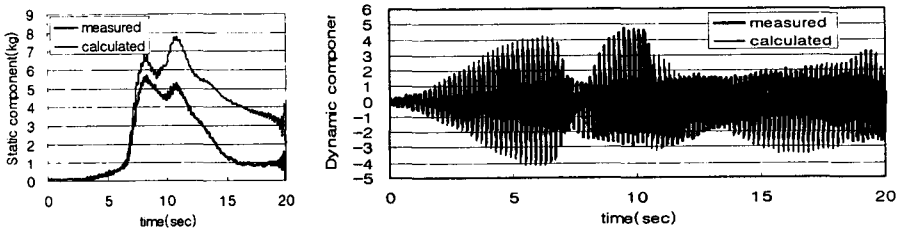
3.3 하중성분의 산정

배면 정적 작용력과 동적 작용력은 앞서 제시된 식에서 과잉간극수압과 입력 가속도 시간이력을 이용하여 산정할 수 있다. 본 실험의 경우 뒤채움 토체와 물이 함께 움직이므로 식

(2)에서 불침투성 흙인 경우의 식을 적용하였다. 배면 지반의 내부마찰각은 30°를 적용하였으며, 배면토력을 산정할 때에는 입력가속도를 이용하였고, 안벽 관성력 및 전면수력을 산정할 때에는 안벽 가속도를 이용하였다. 과잉간극수압 시간이력은 안벽배면에 설치된 2 개의 간극수압계 계측값의 평균을 적용하였다. 그림 8 은 입력가속도 진폭이 0.1g 와 0.2g 일 때 앞서 제시된 방법을 이용하여 배면력 동정석분을 계산한 값과 측정한 값을 비교하였는데, 발생경향 및 크기가 비슷함을 알 수 있다.



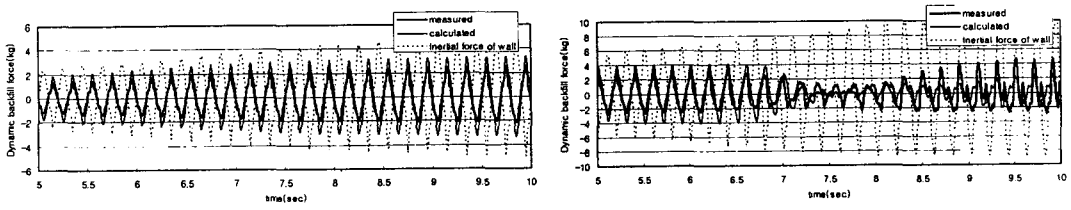
(a) 입력가속도 진폭 0.1g



(b) 입력가속도 진폭 0.2g

그림 8. 배면력 정적성분과 동적성분의 계산값과 측정값의 비교

그림 9 는 배면 동적 작용력의 측정값과 계산값을 확대하여 나타낸 그림이다. 입력가속도 진폭 0.1g 의 경우 계산값이 측정값과 동일하게 안벽 관성력과 반대의 위상을 가짐을 확인하였다. 입력가속도 진폭 0.2g 의 경우에는 배면 동적 작용력이 안벽 관성력과 반대의 위상을 가지다가 과잉간극수압이 증가함에 따라 안벽 관성력과 동일한 위상으로 변하는데, 계산값도 이러한 위상변화를 측정값과 동일하게 예측하였다.



(a) 입력가속도 진폭 0.10g　　(b) 입력가속도 진폭 0.20g

그림 9. 배면력 동적성분과 안벽 관성력의 위상각

3.5 Newmark 변위 해석을 이용한 안벽의 미끄러짐 변위산정

과잉간극수압 증가를 고려하여 계산된 배면 작용력을 이용하여 Newmark 변위해석을 수행하였다. 안벽 작용하중은 앞서 제시된 이론으로 계산된 값을 이용하여 과잉간극수압 증가에 따른 크기와 위상변화를 고려하였다. 안벽에 작용하는 작용하중과 마찰력은 안벽의 중량으로 나누어 안벽 작용가속도와 항복가속도로 표현하였다.

Newmark 변위법을 적용할 때 안벽과 기초지반간의 마찰각이 해석결과에 큰 영향을 미치므로 마찰각을 바꾸어가며 변위를 산정하였다. 그림 10 은 입력가속도 진폭 0.2g 인 경우 안벽변위 측정값과 예측결과를 보여준다. 본 방법으로 계산된 변위는 측정변위의 발생시점과 종료시점을 비교적 정확히 예측할 수 있었고, 바닥 마찰각 35° 를 적용할 경우 측정변위 시간이력과 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

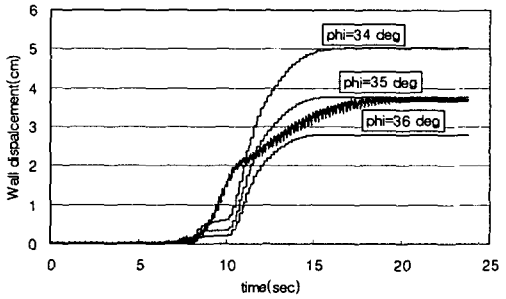


그림 10. Newmark 변위법에 의한 변위산정결과

4. 결 론

본 논문에서는 배면 과잉간극수압 증가에 따른 작용력의 크기와 위상변화를 힘의 합력으로 고려할 수 있는 단순한 모델을 개발하였으며, 이 모델을 이용하여 1g 진동대 실험결과를 분석한 결과 작용하중의 크기 및 위상 변화경향을 잘 모사하였다. 또 Newmark 변위법에서 과잉간극수압 증가를 고려하여 산정된 작용하중과 안벽 저면 마찰력을 가속도 항으로 나타내어 중력식 안벽의 변위를 산정한 방법을 제안하였으며, 이 방법으로 합리적인 변위예측이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2001 년 해양수산부에 지원한 ' 신형내진 안벽구조물 연구' 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 해양수산부에 감사드립니다.

참고문헌

1) E. Kohama(2000), " A study on the stability of gravity type quay wall during earthquake" , Ph.D.Thesis, Hokkaido Univerisity

2) M. Sato, H. Watanabe., T. Takeda. and M. Shimada(2000), " Simplified method to evaluate caisson type quay wall movement" , 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand