

수치해석을 이용한 우물통 기초의 관성력과 동적토압의 위상관계 분석

Analysis on Phase Relation between Inertia Force and Dynamic Earth Pressure of Caisson by Numerical Analysis

김성렬¹⁾ · 장학성²⁾

Kim, Sung-Ryul · Jang, Hak-Sung

국문 요약 >> 지진시 구조물에 작용하는 동적토압은 구조물 관성력과 동적토압의 위상관계에 따라 구조물의 변위에 대한 하중 또는 저항력으로 발휘될 수 있다. 본 연구에서는 위상관계를 고려한 동적토압 산정 절차를 제안하고, 이 절차에 따라 교량 우물통 기초에 대한 수치해석을 수행하여 구조물 관성력과 동적토압의 위상관계를 분석하였다. 그 결과, 지반강성이 작아서 지반의 변위진폭이 구조물의 변위진폭보다 큰 경우에는 동적토압이 구조물의 변위를 증가시키는 하중으로 발휘되며, 지반강성이 커서 지반의 변위진폭이 구조물의 변위진폭보다 작은 경우에는 동적토압이 구조물의 변위를 감소시키는 저항력으로 발휘되는 것으로 나타났다.

주요어 동적토압, 관성력, 내진설계, 위상관계, 우물통 기초

ABSTRACT >> Dynamic earth pressure acting on geotechnical structures can be driving force or resisting force for the displacement of the structure according to the phase relation between the dynamic earth pressure and inertia force of structures. In this research, the evaluation procedure of the phase relation between the dynamic earth pressure and the inertia force was proposed. According to the procedure, numerical analyses on caisson foundation of bridges were performed and the phase relation was analyzed. The analysis results showed that the dynamic earth pressure becomes the driving force, which increases the displacement of the structure, if the displacement amplitude of ground is larger than that of structure due to the low stiffness of the ground, and the dynamic earth pressure becomes the resisting force against the displacement of the structure if the displacement amplitude of ground is smaller than that of structure due to the high stiffness of the ground.

Key words dynamic earth pressure, inertia force, aseismic design, phase relation, caisson foundation

1. 서론

지진이 발생하면 지반구조물에는 정적토압 외에 토압의 진동성분인 동적토압이 발생한다. 이 동적토압의 크기와 작용방향은 구조물과 지반의 진동특성에 따른 지반-구조물 상호작용에 의해 영향을 받는다. 동적토압은 지진시 추가적으로 발생하는 수평하중으로서 구조물의 내진성능을 저하시키는 주된 요인이므로, 지진 및 지반특성을 고려하여 동적토압을 적절히 산정하는 것이 매우 중요하다.

일반적인 내진설계 절차에서는 이론식으로 산정한 동적

토압을 구조물의 관성력과 정적토압 등에 더한 후 구조물의 안정성을 평가하므로 동적토압이 항상 구조물의 내진 안정성을 저해하는 것으로 고려하여 왔다. 그리고, 기존의 연구를 살펴보면 수치해석 또는 모형실험을 이용하여 산정한 동적토압과 기존의 이론식으로 산정한 동적토압의 크기를 비교하는 연구가 주로 수행되어 왔다.

그러나, 최근에는 동적토압의 크기 뿐 아니라 구조물의 관성력과 동적토압의 위상관계를 고려하여 동적토압을 산정하는 연구가 수행되고 있다¹⁻⁶⁾. 이러한 연구는 구조물의 관성력과 동적토압이 동일한 방향으로 작용해야만 동적토압이 구조물의 변위를 증가시켜 구조물을 불안정하게 하는 하중이 되며, 만일 관성력과 동적토압이 서로 반대 방향으로 작용한다면 동적토압이 구조물의 변위를 감소시키는 저항력으로 발휘될 수 있다는 것이다. 특히 국내 중약진 지진 규모에서는 동적토압을 유발하는 지반의 변위가 작게 발생

¹⁾ 정회원·동아대학교 토목공학부 조교수
(대표저자: sungryul@dau.ac.kr)

²⁾ (주)유신 코퍼레이션 지반본부 전문

본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 1. 17 / 심사종료일 : 2008. 3. 28)

되므로 이러한 연구는 경제적인 내진설계기법을 개발하는데 매우 중요하다.

Kohama⁽⁵⁾, 김성렬 등⁽¹⁾, 윤석재 등⁽³⁾은 중력식 안벽 및 옹벽에 대한 1-g 진동대 모형실험을 수행하여 구조물의 관성력과 동적토압의 위상관계를 분석한 바 있다. 그 결과, 구조물의 관성력과 동적토압의 작용방향에는 위상차이가 존재하며 이 위상차이는 배면지반과 구조물의 강성, 지진크기, 포화지반의 과잉간극수압 발생 등에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나, 이들 연구는 소규모 모형시험에 한정되어 수행되었기 때문에 이 연구결과의 적용성을 분석하기 위해서는 수치해석 등의 방법을 적용하여 실제 구조물 조건에 대한 연구수행이 필요해지게 되었다.

그러므로, 본 연구에서는 교량 우물통 기초를 대상으로 수치해석을 수행하여 우물통 기초에 작용하는 동적토압과 구조물 관성력의 위상관계를 분석하고자 한다. 우물통 기초는 장대교량 기초에 사용되는 중요구조물이며, 해안 연약점토층을 포함한 다층지반에서의 동적토압 분석에 적합하다. 그리고, 일반적인 기초구조물의 등가정적 설계는 동적토압 및 동적수압의 영향을 무시하지만 우물통 기초 등은 지반 및 유체와의 접촉면이 넓어서 동적토압이 구조물의 지진거동에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구의 해석대상으로 선정하였다.

2. 관성력-동적토압 위상관계의 분석 방법

지진동이 발생하면 지반 및 유체에 의해 동적토압과 동적수압이 추가로 발생한다. 동적토압과 동적수압은 구조물, 지반, 유체의 동적 특성에 따른 구조물의 관성력과 위상차이에 의해 구조물의 변위를 유발하는 하중으로 작용할 수도 있고 구조물의 변위를 감소시키는 저항력으로 작용할 수도 있다.

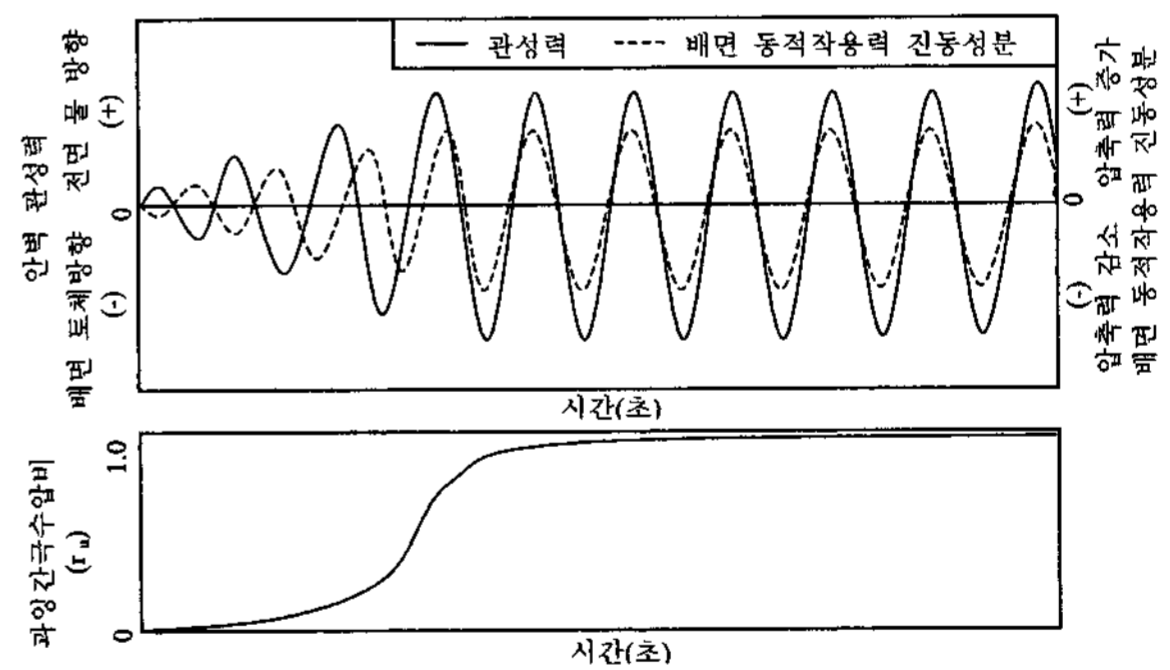
Kohama⁽⁵⁾와 김성렬 등⁽¹⁾은 그림 1에 보는 바와 같이 진동대 실험결과를 토대로 항만의 중력식 안벽구조물의 관성력과 배면 동적토압(동적작용력)간의 위상관계를 분석하였다. 그 결과, 배면 뒤채움 지반의 과잉간극수압 크기가 작은 경우에는 관성력과 동적작용력이 서로 반대의 방향으로 작용하며, 과잉간극수압 크기가 점차 커져 지반이 액상화되면 관성력과 동적작용력이 서로 동일한 방향으로 작용하는 것을 발견하였다. 즉, 배면지반내에 과잉간극수압 크기가 작아 지반강성이 감소하지 않는 경우에는 관성력과 동적토압이 서로 반대방향으로 작용하므로 동적토압이 벽체를 밀어주는 하중성분이 아니라 기존 정적토압을 감소시키는 저항력으로 작용하게 된다.

윤석재 등⁽³⁾도 건조 사질토 뒷채움재를 가진 옹벽에 대하여 1-g 진동대 모형실험을 수행한 후 그림 2의 결과를 얻었다. 이 결과를 보면 입력가속도의 수평진폭이 0.2g보다 작은 경우에는 동적토압이 감소하며 수평진폭이 0.4g 이상으로 증가되면 Mononobe-Okabe 방법으로 구한 동적토압의 크기와 유사해지는 것을 관찰하였다.

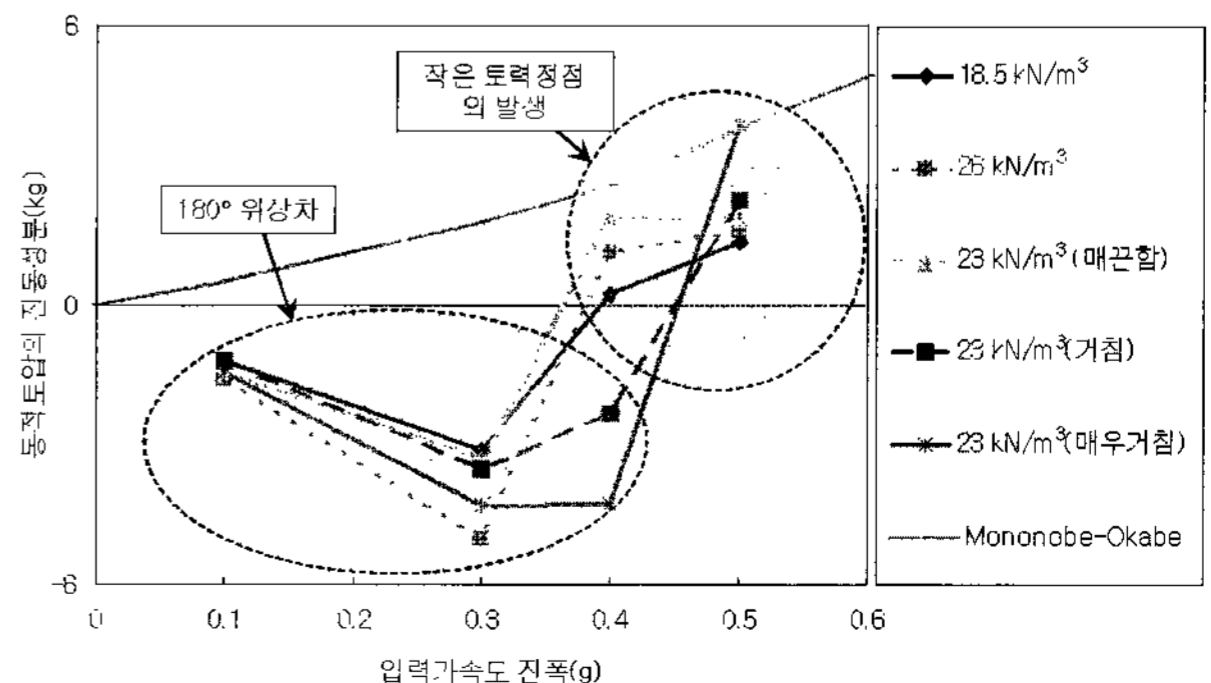
앞서 관찰된 이러한 경향은 지진동시 벽체와 배면 지반 사이의 상대변위 차이 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 지반강성에 비해 지진동 크기가 작은 경우에는 뒷채움 지반의 변위진폭보다 구조물의 변위진폭이 크므로 동적토압이 감소하고, 진동가속도가 증가하면 지반강도가 감소하여 지반 변위진폭이 구조물의 변위진폭보다 커지기 때문에 동적토압이 증가하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 입력가속도의 진폭크기가 작은 국내 중약진 지진규모에서는 동적토압이 구조물의 변위를 감소시키는 저항력으로 발휘될 수 있다는 것을 보여준다.

본 연구에서는 동적토압과 관성력의 위상관계를 수치해석적 방법으로 분석하기 위하여 다음과 같은 분석절차를 제안하였다. 그리고, 수치해석을 수행한 후 제안된 절차에 따라 위상관계 및 그 발생원인을 분석하였다.

- ① 구조물의 관성력과 구조물의 변위 방향은 서로 동일하다.
- ② 그림 3(a)와 같이 지반강성이 작아서 지반변위가 구조물



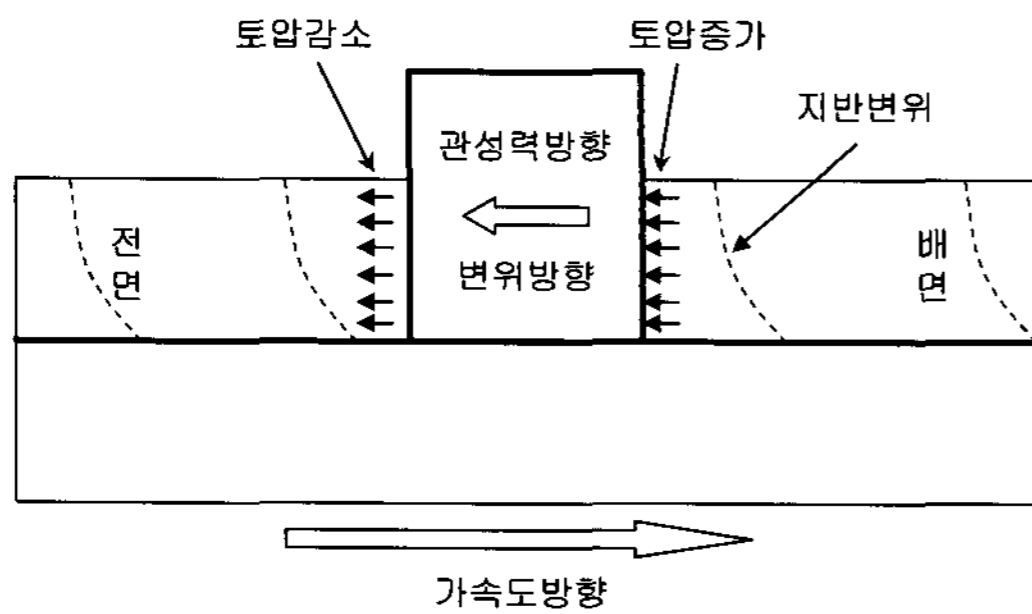
〈그림 1〉 관성력과 배면 동적토압간의 위상관계(김성렬 등, 2003)



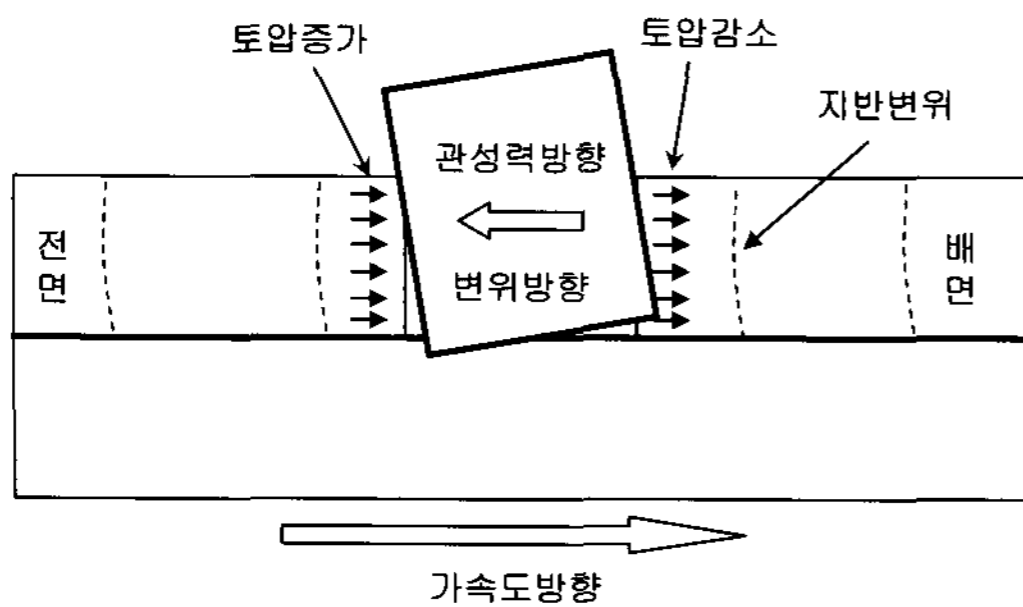
〈그림 2〉 입력가속도 진폭에 따른 동적토압의 변화(윤석재 등, 2005)

의 변위보다 크게 발생한다면 구조물 전면의 토압은 감소하고 배면의 토압은 증가하게 된다. 즉, 동적토압의 작용방향과 벽체 관성력의 방향이 일치하므로 토압은 하중으로 작용하게 된다.

- ③ 그림 3(b)와 같이 지반강성이 커서 지반변위가 구조물의 변위보다 작게 발생한다면 구조물 전면의 토압은 증가하고 배면의 토압은 감소한다. 즉, 동적토압의 작용방향과 벽체 관성력의 방향이 반대방향이므로 토압은 저항력으로 작용하게 된다.



(a) 지반변위가 구조물의 변위보다 큰 경우



(b) 지반변위가 구조물의 변위보다 작은 경우
(그림 3) 구조물 관성력과 동적토압의 위상관계

다. 우물통이 연암에 약 3m 근입된 경우에 대하여 상부의 연약토층에 의해 구조물에 작용하는 동적토압의 위상 및 크기관계를 분석하고자 하였다. 수위는 지표면으로부터 9.5m 높이에 위치한다.

본 연구에서는 QUAKE/W⁽¹⁰⁾ 프로그램과 FLAC 2D⁽¹¹⁾ 프로그램을 이용하여 동일한 모델에 대한 동적 수치해석을 수행하였다. FLAC 프로그램은 유한차분 범용해석 프로그램으로서 지반의 탄소성 모델을 고려할 수 있고 구조물과 지반 Interface 거동의 모사가 가능하기 때문에 탄성모델만을 적용하는 QUAKE/W보다 정밀한 해석결과를 줄 것으로 판단하였다. 그러므로, 주로 FLAC의 해석결과를 이용하여 관성력과 동적토압의 위상관계를 분석하였다. 그리고, QUAKE/W는 등가선형해석 모델을 적용한 2차원 해석프로그램으로서 FLAC해석에 입력되는 동적 지반물성값의 산정과 지반과 구조물의 변위관계 분석에 이용하였다.

FLAC 해석에서 구조물은 탄성모델을 적용하였고, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 또한, 구조물과 지반의 경계부에 Interface 요소를 적용하여 경계부에서 발생하는 흙과 구조물의 미끄러짐 또는 분리현상을 모사하도록 하였다. Interface 요소에서는 ‘Coulomb shear strength’와 ‘tension bond’를 적용하였다. ‘Coulomb shear strength’의 경우 흙과 구조물의 경계면에서 발생하는 전단력(F_s)의 크기가 식 (1)로 정의되는 경계면에서의 전단강도(F_{smax})보다 커지면 미끄러짐이 발생한다. 그리고, ‘tension bond’의 경우 경계면에 발생하는 인장응력(tensile normal stress)이 사용자가 입력한 인장강도(tensile normal strength)보다 커지면 경계면의 분리가 발생한다. Interface의 전단강도를 산정할 때, C_b 값은 0 그리고 경계면 마찰각 ϕ_b 값은 인접 풍화토층의 내부마찰각 값의 2/3인 20도를 적용하여 산정하였다. 일반적으로 ϕ_b 값은 흙 내부마찰각의 1/2~2/3값을 적용하며 ‘mass concrete’와 흙 사이의 ϕ_b 값은 흙종류에 따라 17~31도 범위에 존재하는데⁽¹²⁾ 상부 연약점토층의 마찰각이 작은 것을 고려할 때 적용된 값은 합리적으로 판단된다. 인장강도는 0을 적용하여 접촉면에 인장력이 발생할 경우

3. 수치해석 조건

본 해석에서 가정한 우물통 기초의 제원은 지름 16m, 높이 21m이다. 표 1은 우물통 기초가 근입된 지반의 지층구성 및 해석에 이용된 지반물성값을 보여준다. 해석지반은 상부로부터 연약점토층, 풍화토층, 연암근입층으로 구성된

〈표 1〉 우물통 기초의 지층구성 및 해석물성값

구분	두께 (m)	구성모델	$G/G_{max}-\gamma$ D- γ 곡선	전단파속도 (m/sec)	전단탄성계수 (kPa)	단위중량 (kN/m^3)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)
연약점토층	5.5	Mohr-Coulomb	Sun et al. ⁽⁷⁾	100	2.97×10^4	15.4	0.48	10	0
풍화토층	2.2	Mohr-Coulomb	Seed&Idriss ⁽⁸⁾	400	8.13×10^5	20.0	0.40	15	30
연암층	10.0	Mohr-Coulomb	Schnabel et al. ⁽⁹⁾	1300	1.11×10^7	24.0	0.35	80	35
구조물	-	Elastic	-	-	2.72×10^7	23.7	0.15	-	-

구조물과 지반이 서로 분리되도록 하였다.

$$F_{smax} = C_b L + \tan\phi_b F_n \quad (1)$$

여기서, C_b =경계면 점착응력; L =유효접촉길이; ϕ_b =경계면 마찰각; F_n =법선력

해석지반의 탄성계수는 흙의 전단변형률(γ)에 따른 전단탄성계수(G) 및 감쇠비(D)의 변화를 고려하여 지반의 변형률 수준에 적합한 값을 산정하여야 한다. 그러므로, QUAKE/W 프로그램을 이용하여 동일한 지진하중 하에서 최종적으로 수렴된 전단변형률에 해당하는 지반 탄성계수 값을 산정한 후 FLAC 해석에 적용하였다. 그 결과, 최대 전단탄성계수에 대하여 전단변형률 발생에 의해 감소된 전단탄성계수의 평균비율은 점성토 지반의 경우 64%, 풍화토 지반의 경우 89%, 암지반의 경우 100%로서 탄성계수값의 감소정도가 작은 것으로 나타났다.

그림 4는 해석에 이용된 수치 해석단면을 보여준다. 경계 조건의 영향을 배제하기 위하여 해석영역의 좌우경계에 자유경계조건(free field condition)을 적용하고 구조물과 좌우 경계면의 거리를 지반두께의 3배 이상이 되도록 하였다. 구조물과 지반이 맞닿은 좌우면에서 동적토압을 분석하였다.

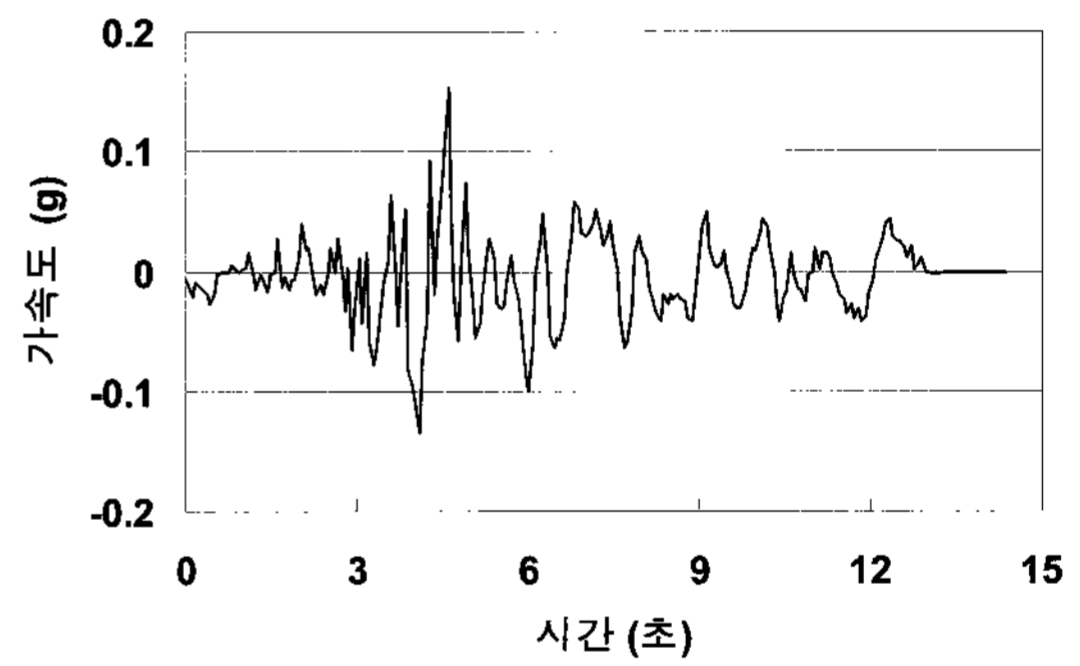
입력지진파는 그림 5와 같이 Hachinohe 지진파, Elcentro 지진파 그리고 인공지진파의 3가지 지진파를 이용하였다. 인공지진파는 항만 및 어항시설기준⁽¹³⁾에 따라서 지진 I구역, 재현주기 1000년에 대한 기반암(S_B 지반)에서의 표준설계 응답스펙트럼을 만족하도록 SIMQKE 프로그램⁽¹⁴⁾을 이용하여 작성하였다. 이 기준에 따르면 기반암 노두에서의 최대가속도는 0.154g가 된다.

4. 위상관계를 고려한 동적토압 분석

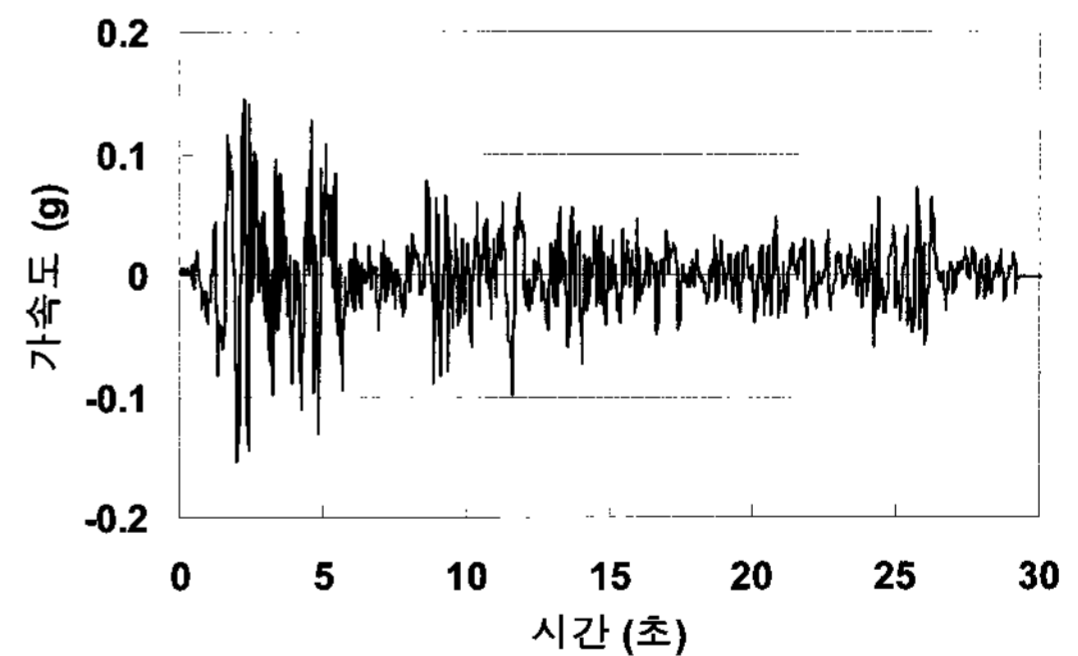
동적토압과 관성력의 위상관계를 분석하기 위해 가속도와 크기는 같고 작용방향이 반대인 관성가속도를 산정하였다. 그림 6은 각 지진파에 대한 구조물 중앙부에서의 관성가속도(inertial acceleration) 시간이력으로서, 구조물 왼쪽 하단과 오른쪽 상단 모서리에서의 값을 평균하여 산정하였다. 관성 가속도의 (+)값은 구조물의 관성력과 변위가 오른쪽

방향으로 발생하며, (-)값은 왼쪽방향으로 발생하는 것을 의미한다. 구조물의 관성가속도가 (+)와 (-)방향으로 최대가 될 때가 관성력이 최대가 되어 구조물이 가장 불안정해지는 시점이다. 그러므로, 이 시점에서의 구조물에 작용하는 동적토압의 크기와 작용방향을 분석하였다. 구조물의 관성 가속도가 최대가 되는 시점은 Hachinohe 지진파의 경우 각각 $t=4.76$ 초와 $t=5.26$ 초, Elcentro 지진파의 경우 각각 $t=2.05$ 초와 $t=2.44$ 초, 그리고 인공지진파의 경우 각각 $t=5.12$ 초와 $t=8.28$ 초로 나타났다.

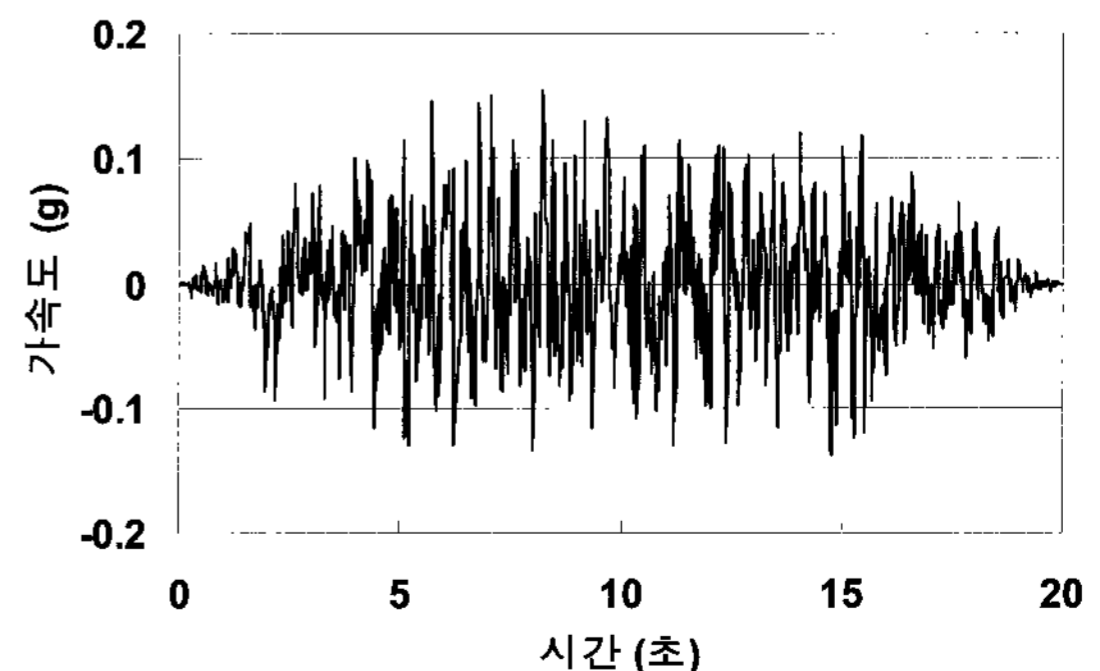
그림 7은 Hachinohe 지진파에서의 (+) 방향 관성력이 최대가 되는 $t=4.76$ 초에서의 구조물에 작용하는 동적토압을 보여준다. 동적토압의 (+)값은 압축력의 증가, (-)값은 압축력의 감소를 의미한다. 그리고, (+) 관성력은 구조물이 오른쪽으로 움직이는 것을 의미한다. 구조물 왼쪽면의 동적토압



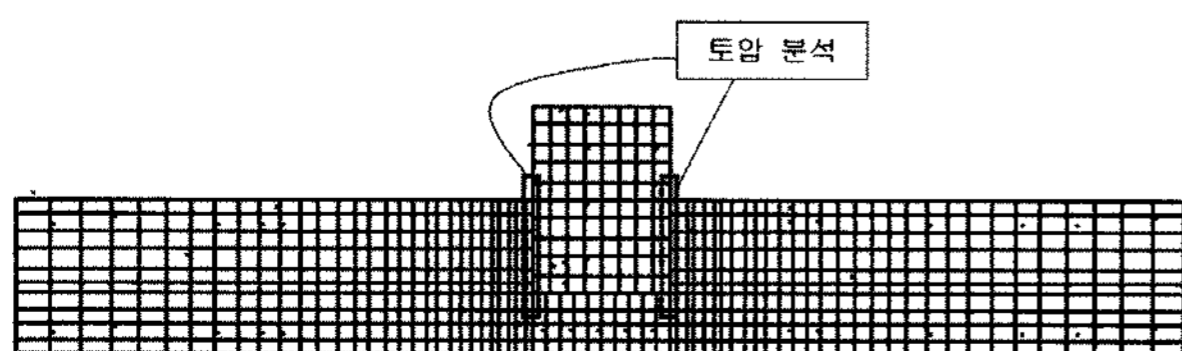
(a) Hachinohe 지진파



(b) Elcentro 지진파

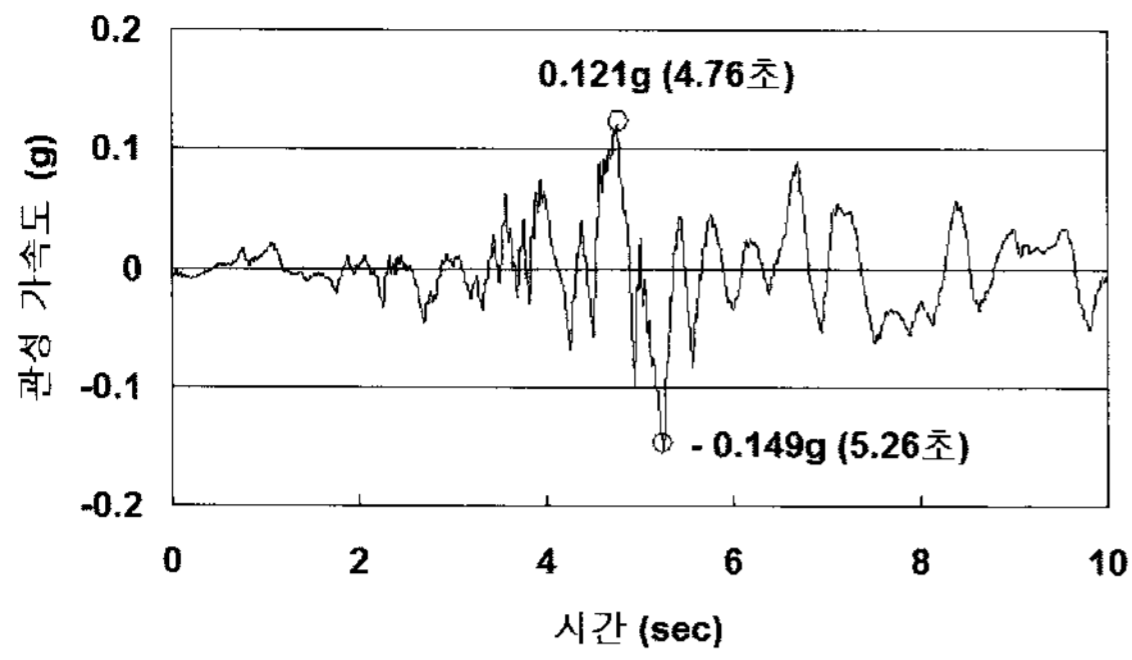


(c) 인공지진파

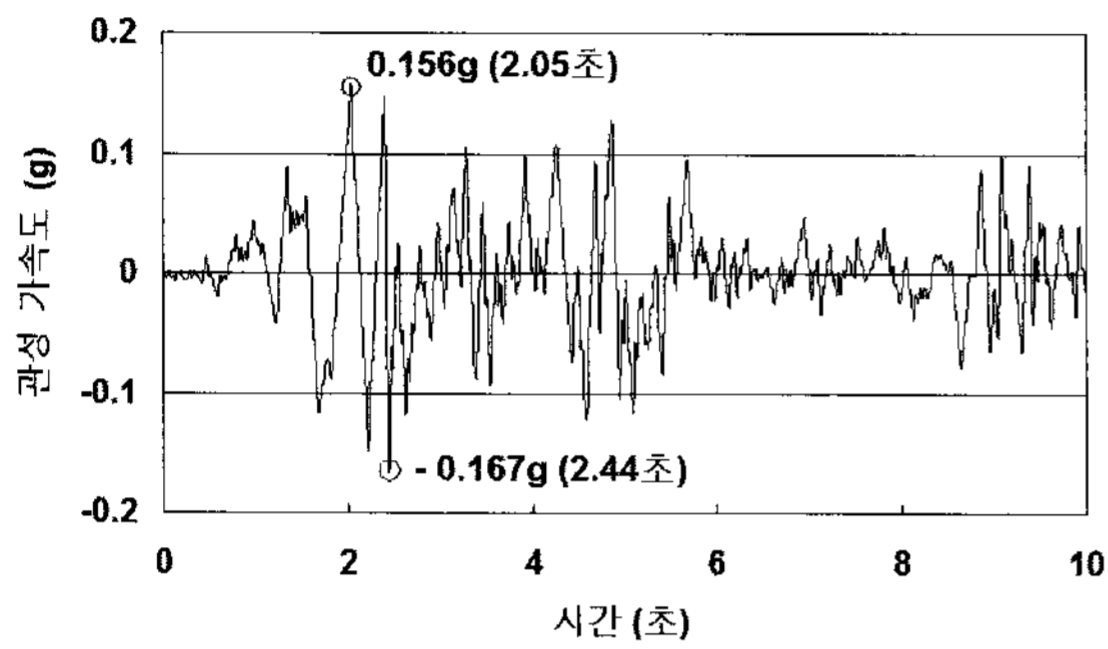


〈그림 4〉 우물통 기초에 대한 FLAC 해석단면

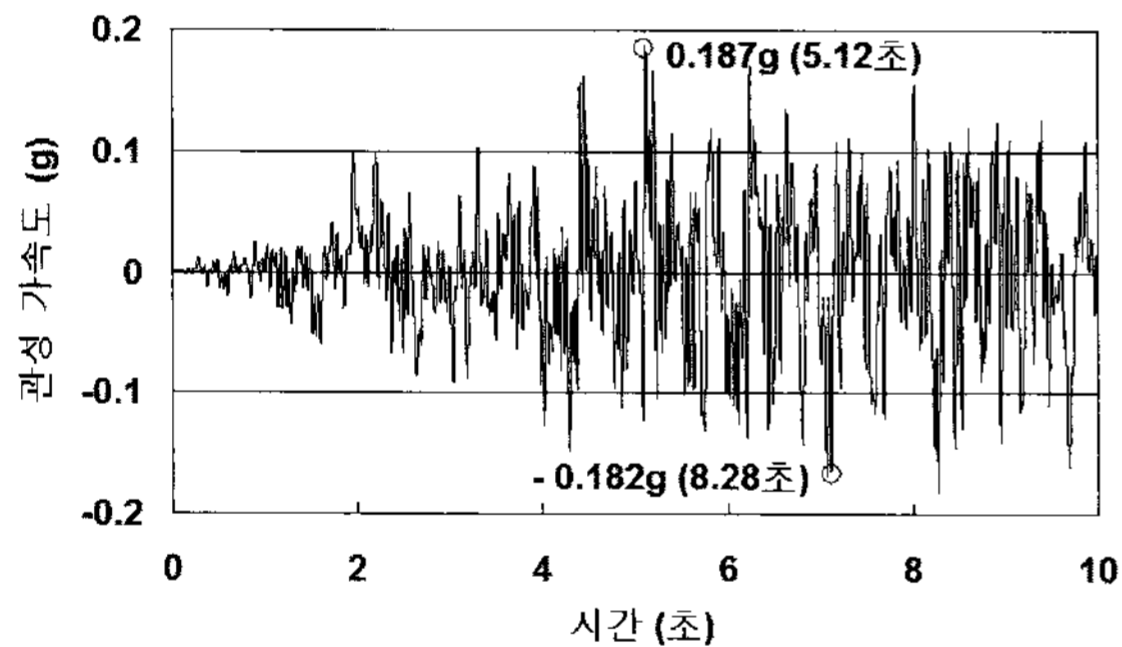
〈그림 5〉 입력지진파의 시간이력곡선 (최대 가속도 크기 0.154g)



(a) Hachinohe 지진파



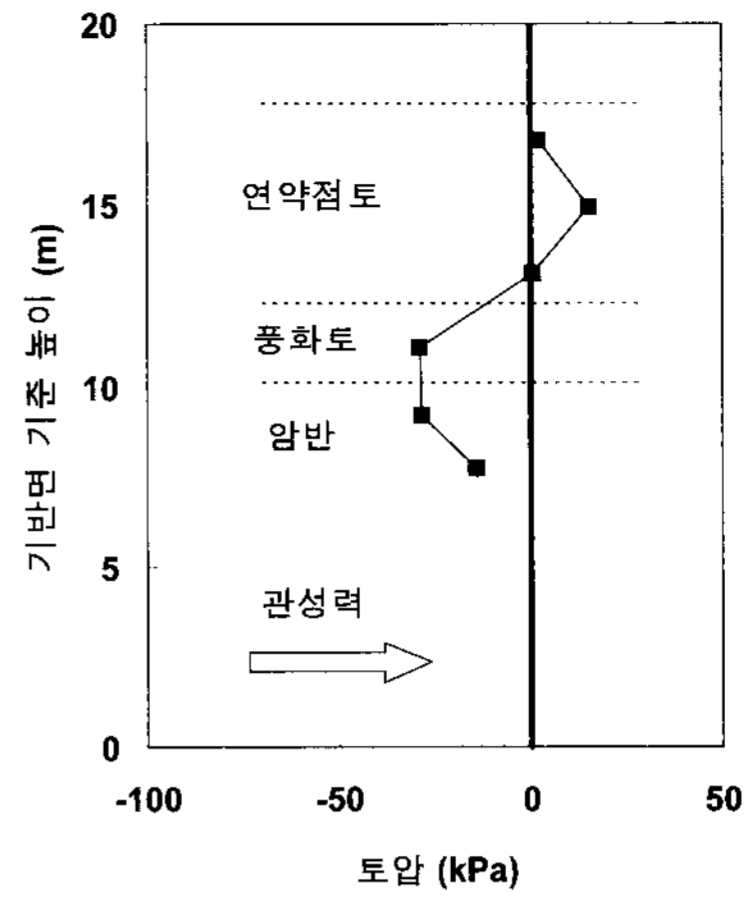
(b) Elcentro 지진파



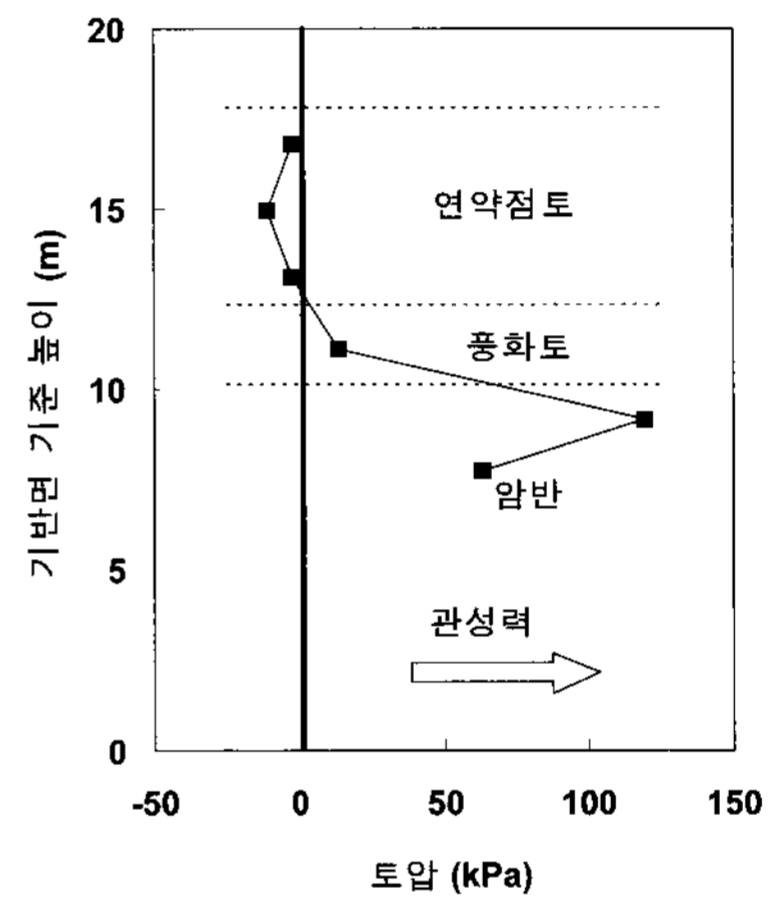
(c) 인공지진파

〈그림 6〉 구조물 중앙부의 관성 가속도 시간이력

을 살펴보면 점성토층에서는 (+)의 동적토압이 발생하고, 풍화토층과 암반층에서는 (-)의 동적토압이 발생하였다. 이때, (+)의 동적토압은 구조물이 오른쪽으로 움직일 때 같은 방향으로 구조물을 미는 토압이 증가하는 것을 의미하므로 동적토압이 구조물의 변위를 증가시키는 하중으로 작용하며, (-)의 동적토압은 구조물을 왼쪽에서 밀어주던 정적토압이 감소하는 것을 의미하므로 동적토압이 구조물의 변위를 감소시키는 저항력으로 작용하게 된다. 오른쪽면의 동적토압을 살펴보면 점성토층에서는 (-)의 동적토압이 발생하였고, 풍화토층과 암반층에서는 (+)의 동적토압이 발생하였다. 이때, (-)의 동적토압은 구조물을 왼쪽으로 밀어주는 토압이 감소하는 것을 의미하므로 동적토압이 변위에 대한 하중으로 작용하는 것과 동일하며, (+)의 동적토압은 구조물을 오른쪽에서 밀어주는 정적토압이 증가하는 것을 의미하



(a) 왼쪽면



(b) 오른쪽면

〈그림 7〉 우물통에 작용하는 동적토압(Hachinohe 지진파, t=4.76초)

로 동적토압이 변위에 대한 저항력으로 작용하는 것과 동일하다. 왼쪽면과 오른쪽면의 저항과 하중성분을 더한 결과, 우물통에 작용하는 전체 동적토압은 373kN/m으로 구조물 변위(관성력)에 대하여 반대방향으로 작용하여 저항력으로 발휘되었다.

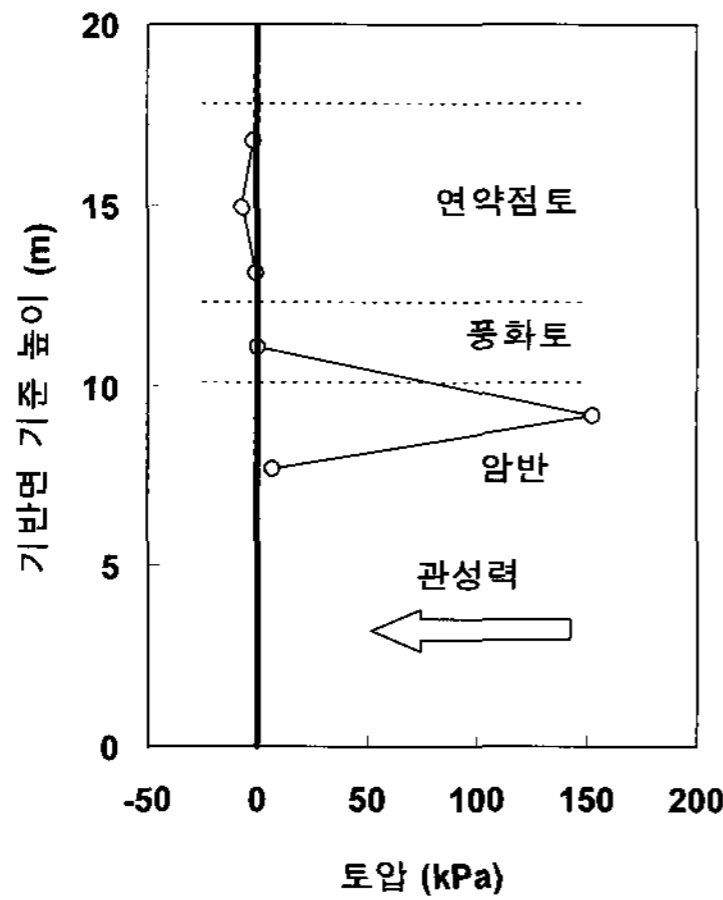
그림 8은 Hachinohe 지진파에서의 (-) 방향 관성력이 최대가 되는 t=5.26초에서의 구조물에 작용하는 동적토압을 보여준다. (-) 관성력이 발생하므로 구조물은 왼쪽으로 움직인다. 왼쪽면의 동적토압을 살펴보면 점성토층에서는 토압이 매우 작게 발생하였는데, 이것은 이 시점에 구조물과 점토의 변위크기가 비슷하기 때문으로 판단된다. 암반부에서는 (+)의 동적토압이 발생하므로 구조물이 왼쪽으로 움직일 때 동적토압이 변위에 저항하는 역할을 한다. 오른쪽면의 동적토압의 경우 점성토층에서는 점토와 암반의 경계부에서 (-)의 동적토압이 크게 발생하여 구조물을 밀어주는 정적토압이 감소하므로 마찬가지로 변위에 대한 저항력으로 발휘된다. 우물통에 작용하는 전체 동적토압은 282kN/m으로서 구조물 변위(관성력)에 대하여 반대방향으로 작용하여

저항력으로 발휘되었다.

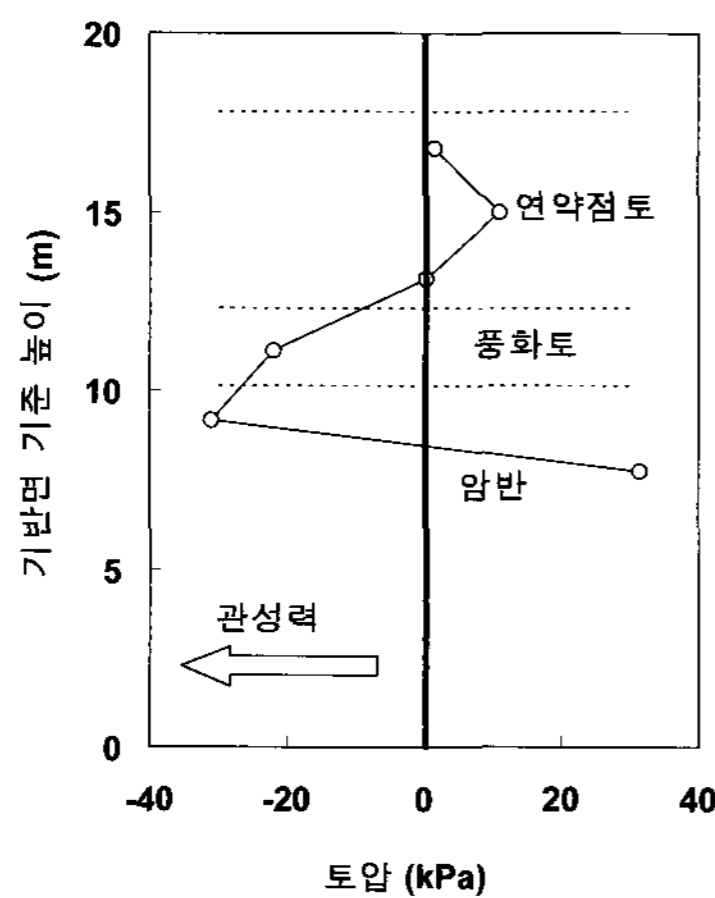
표 2는 동일한 방법을 적용하여 각 지진파에 대하여 산정한 동적토압을 요약하여 보여준다. Elcentro 지진파와 인공지진파의 동적토압도 Hachinohe 지진파가 작용하였을 때와 동일한 경향을 보이며 전체 동적토압이 저항력으로 발휘

되었다. 진동전의 정적토압은 267kN/m로 나타났는데, 표의 동적토압 감소값은 모두 정적토압보다 작았다. 즉, 정적토압이 계속 압축력으로 가해지고 있는 상태에서 동적토압에 의해 압축력이 증가하거나 감소하였다. 구조물이 움직이는 방향의 경계면의 동적토압은 245~333kN/m의 압축력이 증가하며, 반대쪽의 경계면에 작용하는 동적토압은 -37~-103kN/m로 압축력이 감소하였다. 즉, 구조물 진행방향의 경계면에는 수동토압에 의해 압축력이 크게 증가하며 반대쪽 경계면에는 정적토압이 감소하여 주동토압 상태가 되는 것으로 판단된다. 즉, 수동토압에 의해 증가되는 동적토압은 구조물의 변위를 억제하는데는 도움을 주지만 벽체의 구조적 안정성에는 불리하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

그림 9는 Hachinohe 지진파에 대하여 점토층과 암반층에서 구조물 왼편에 작용하는 동적토압과 구조물 관성가속도의 시간이력을 보여준다. 점토층의 경우 구조물 왼편의 동적토압과 관성가속도의 작용방향이 일치한다. 즉, 구조물의 관성가속도가 (+)가 되어 구조물이 오른쪽으로 움직일 때, 구조물 왼편의 동적토압이 증가하므로 동적토압은 변위에 대해 하중으로 작용한다. 암반층의 경우 구조물의 관성가속도와 동적토압의 작용방향이 서로 반대방향이다. 즉, 구조물의 관성가속도가 (+)가 되어 구조물이 오른쪽으로 움직일 때, 구조물 왼편의 동적토압이 감소하므로 동적토압이 변위에 대해 저항으로 작용한다.



(a) 왼쪽면



(b) 오른쪽면

〈그림 8〉 우물통에 작용하는 동적토압(Hachinohe 지진파, t=5.26초)

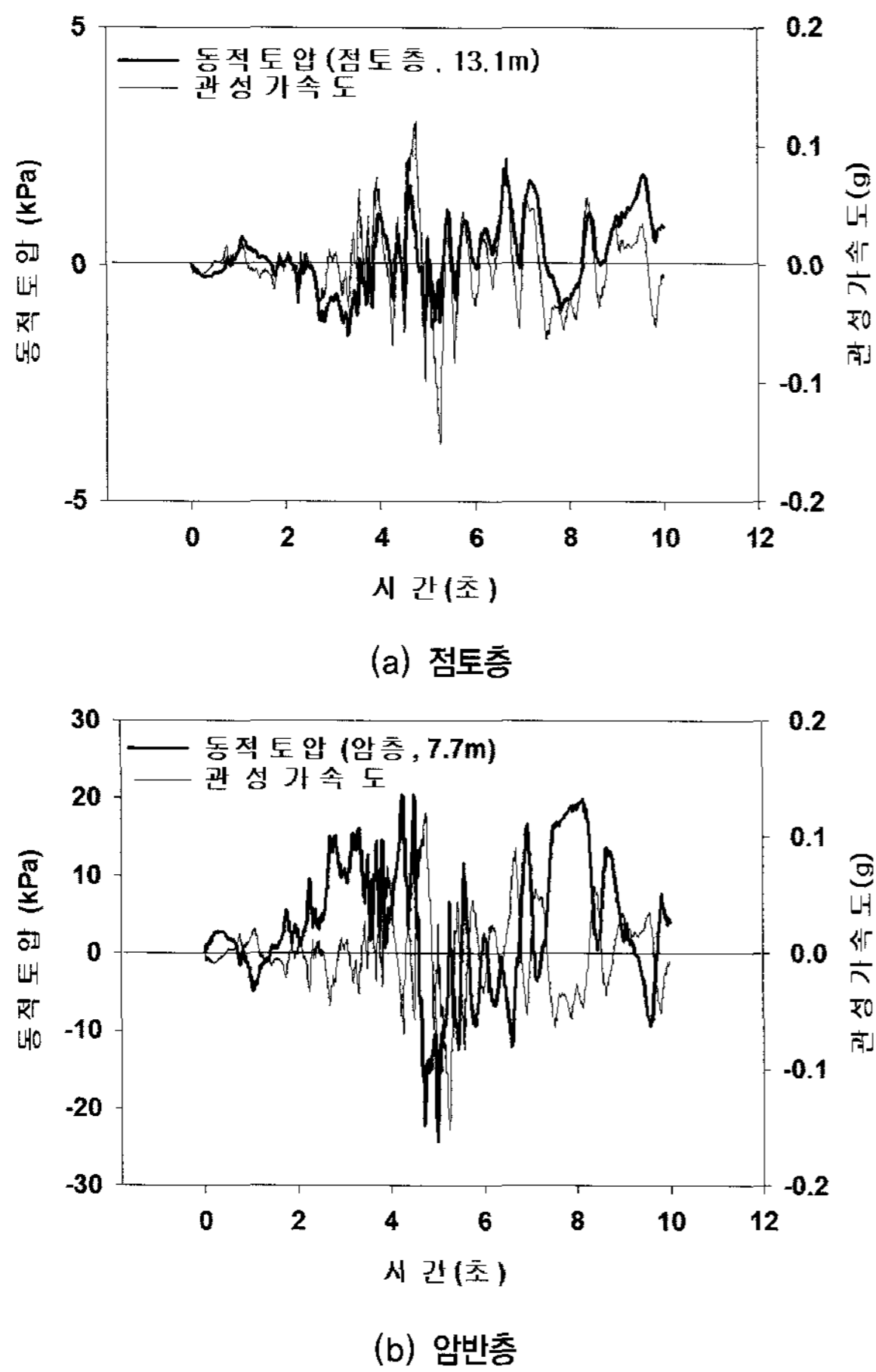
5. 관성력-동적토압 위상차 발생 원인

동적토압과 관성력의 위상 차이는 지반과 구조물간의 상대변위 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다. FLAC해석의 경우 구조물과 지반의 상세한 변위 분포결과를 얻기 어려워 동일한 우물통 기초에 대하여 수행한 QUAKE/W 해석

〈표 2〉 각 지진파에서의 우물통에 발생하는 동적토압(FLAC 해석)

지진파	관성가속도*	왼쪽면 작용 동적토압(kN/m)	오른쪽면 작용 동적토압(kN/m)	전체합력 (kN/m)
Hachinohe 지진	0.121g (4.76초)	-95 (저항)	+278 (저항)	373 (저항)
	-0.149g (5.26초)	+245 (저항)	-37 (저항)	282 (저항)
Elcentro 지진	0.156g (2.05초)	-103 (저항)	+251 (저항)	354 (저항)
	-0.167g (2.44초)	+195 (저항)	-41 (저항)	236 (저항)
인공지진	0.187g (5.12초)	-76 (저항)	+283 (저항)	359 (저항)
	-0.182g (8.28초)	+333 (저항)	-83 (저항)	416 (저항)

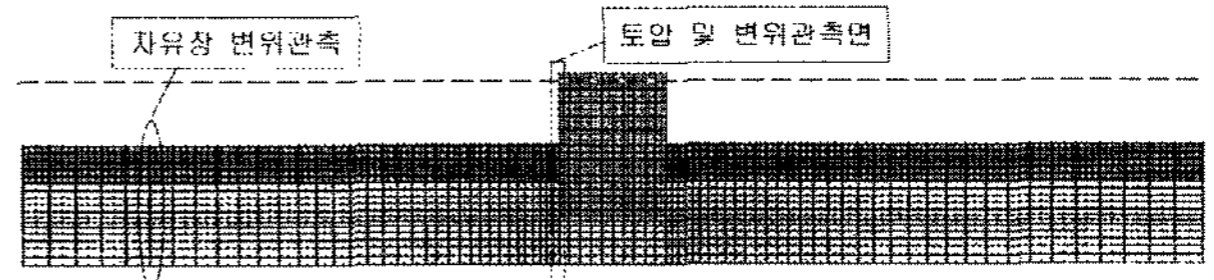
* 관성가속도가 (-)값 : 구조물이 왼쪽으로 움직임 (+) 값 : 구조물이 오른쪽으로 움직임



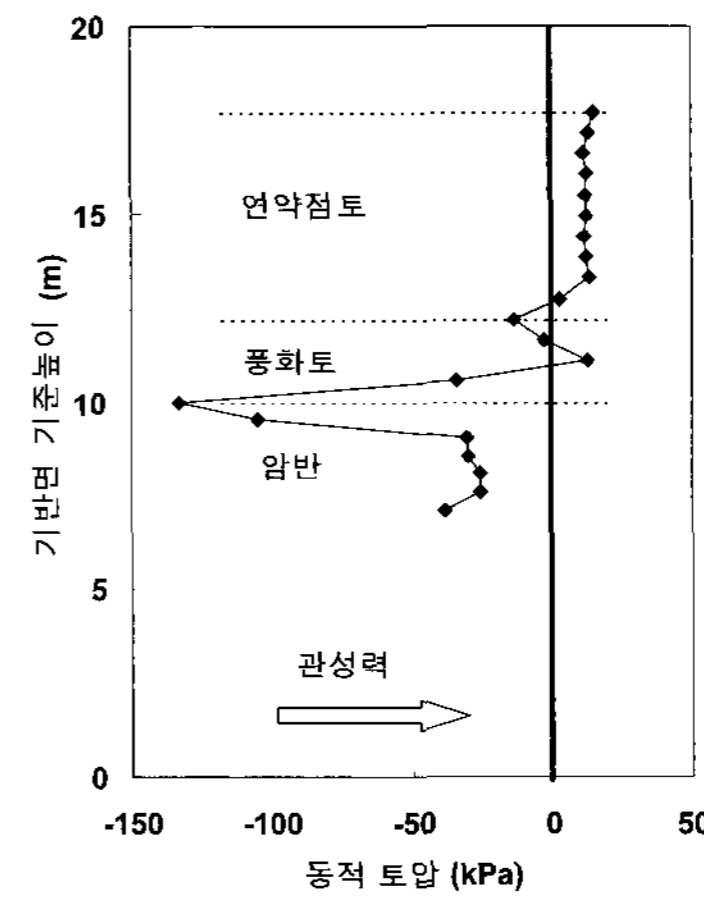
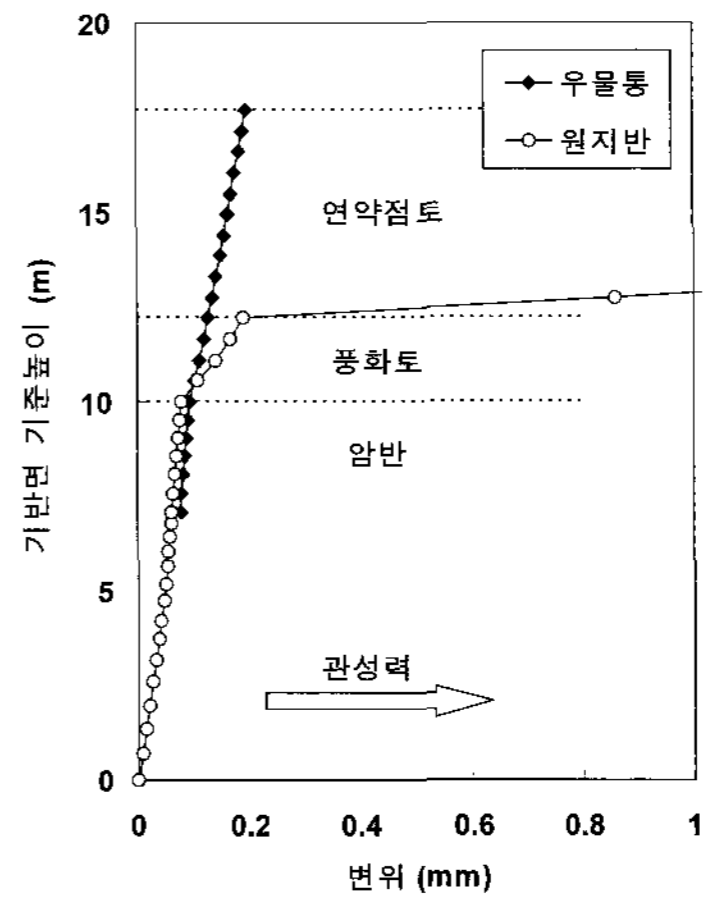
〈그림 9〉 구조물의 관성가속도와 동적토압의 시간이력 비교(Hachinohe 지진파)

결과를 이용하여 구조물과 지반의 변위관계를 분석하였다. 그림 10은 해석단면을 보여준다. 구조물의 왼쪽면에 작용하는 동적토압과 자유장과 구조물의 변위를 관찰하였다.

그림 11과 그림 12는 Hachinohe 지진파가 작용하였을 때, 자유장 지반과 구조물의 변위 및 구조물 왼편에 작용하는 동적토압 관계를 보여준다. 관성력이 오른쪽으로 최대가 되었을 때(그림 11) 연약점토층에서는 구조물에 비하여 지반 변위가 크게 발생하여 동적토압이 증가하게 되며, 압반층에서는 지반의 변위보다 구조물의 변위가 더 커서 동적토압이 감소하게 된다. 관성력이 오른쪽으로 작용할 때 왼편에서의 동적토압이 증가하는 것은 하중증가와 동일한 효과를 유발하며 동적토압이 감소하는 것은 저항력 증가와 동일한 효과를 유발한다. 그리고, 연약점토층에서 구조물과 지반 간의 변위차이는 크지만 지층의 강성이 작으므로 증가되는 토압은 작으며, 압반층에서는 큰 지층강성으로 인하여 감소되는 토압이 큰 것으로 나타났다. 결론적으로, 전체 동적토압이 구조물의 변위에 대하여 저항력으로 발휘되었다. 그림 12는 관성력이 왼쪽으로 최대가 되었을 때의 변위와 동적토압 관계로서 동일한 원리에 의해 전체 동적토압이 구조물의



〈그림 10〉 우물통기초에 대한 QUAKE/W 해석단면



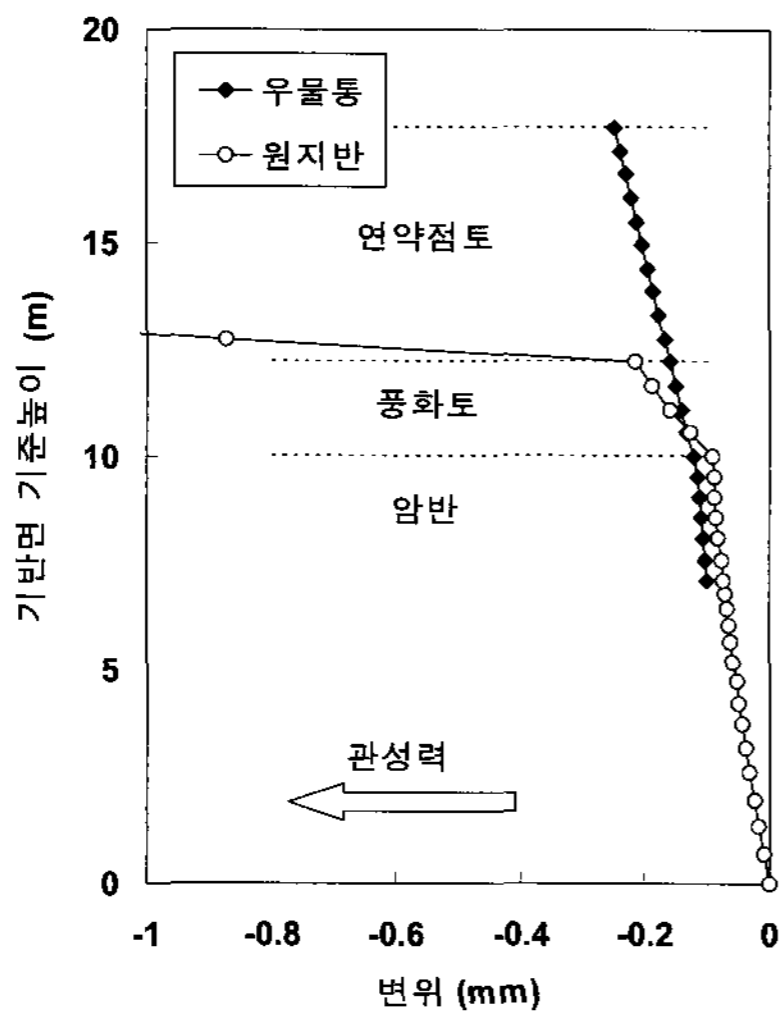
〈그림 11〉 우물통과 원지반의 변위와 동적토압(Hachinohe 지진파, t=4.80초)

변위에 대하여 저항력으로 발휘되었다.

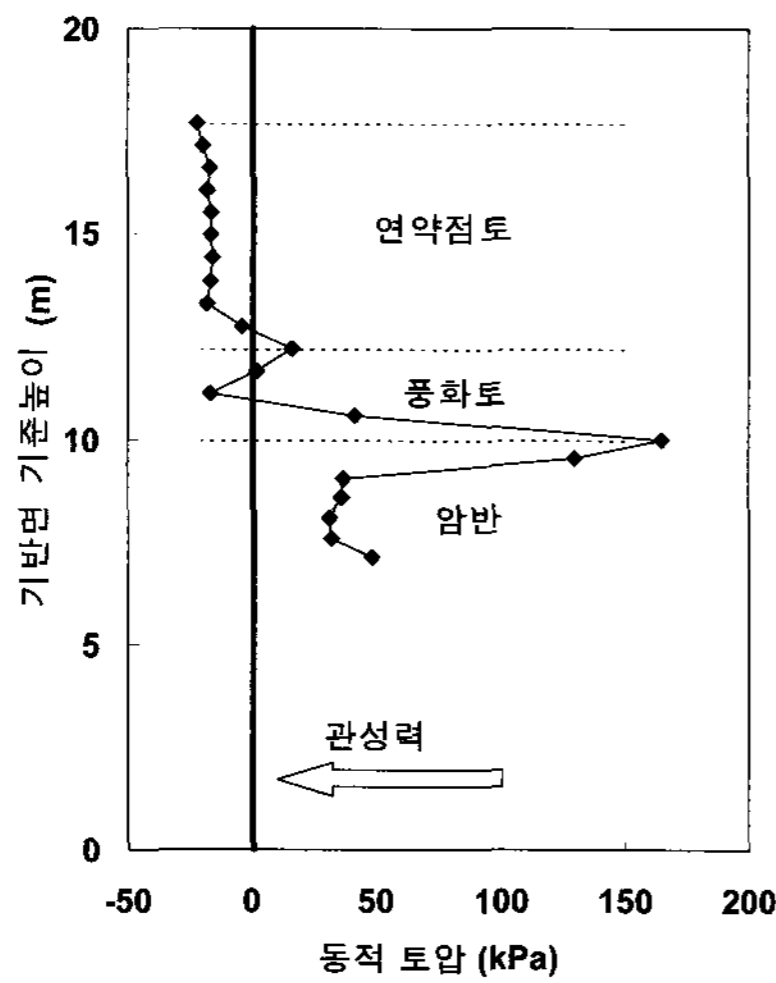
즉, 동적토압과 관성력의 위상차이는 구조물과 지반간의 상대변위 차이가 원인이 되어 발생하게 된다. 지층의 강성이 작아서 진동중 지반변위가 구조물 변위보다 크게 발생하면 그 층의 동적토압은 하중으로 작용하며, 지반변위가 구조물 변위보다 작다면 그 층의 동적토압은 저항력으로 작용하게 되는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 범용 수치해석 프로그램을 이용하여 지진시 우물통 기초의 관성력과 동적토압의 위상관계를 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) 변위



(b) 동적토압

〈그림 12〉 우물통과 원지반의 상대변위와 동적토압(Hachinohe지진파, t=5.30초)

1. 지진동시 구조물의 관성력과 동적토압의 위상관계를 고려하여 동적토압이 구조물에 하중으로 가해질지, 저항력으로 작용할지 판단하는 것이 중요하다. 동적토압이 관성력과 동일한 방향으로 작용하면 동적토압은 구조물의 변위를 증가시키는 하중으로 고려되며, 관성력과 반대방향으로 작용하면 토압은 구조물의 변위를 억제하는 저항으로 발휘된다.
2. 구조물의 관성력이 최대가 되어 구조물이 가장 불안정해지는 시점에서의 동적토압을 분석하였다. 그 결과, 상부 연약점토층에서는 동적토압이 하중으로 발생하였고, 풍화토층과 암반층에서는 동적토압이 저항으로 발휘되었다. 그 이유는 지반의 강성이 작은 연약점토층의 경우 지반변위가 구조물의 변위보다 더 커져서 하중으로 작용하며 지반의 강성이 큰 풍화토층 및 암반층의 경우에는 지

반변위가 구조물의 변위보다 작아서 저항으로 작용하기 때문이다.

3. 구조물과 지반간의 상대변위는 상부 점토층에서 크고, 암반층에서 작았지만 상부 점토층은 지층 강성 및 구속압이 작기 때문에 동적토압이 상대적으로 작았다. 결과적으로, 동적토압의 전체합력은 구조물의 변위에 저항하는 저항력으로 발휘되었다.
4. 내진설계를 수행할 때 동적토압이 지배적인 설계인자로 작용하여 구조물의 설계를 좌우하는 경우가 있다. 이 경우 국내 중약진 지진특성을 감안할 때 매우 비경제적인 설계가 되는 경우가 발생하기도 한다. 그러므로, 경제적인 설계 또는 중요 구조물의 안정성을 판단하기 위해서는 수치해석 등의 방법을 적용하여 동적토압의 크기 뿐 아니라 구조물의 동적토압과 관성력과의 위상관계를 고려하여 설계할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2005학년도 동아대학교 학술연구비(신진과제)의 지원 하에 연구되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 김성렬, 권오순, 김명모, “지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링”, 한국지반공학회 논문집, 19(2), 2003, pp. 107-121.
2. 김동현, 윤길림, 박우선, “지진토압의 위상차를 고려한 케이슨 안벽의 신뢰성해석”, 한국해양해양공학회지, 15(4), 2003, pp. 242-248.
3. 윤석재, 김성렬, 황재익, 김명모, “옹벽의 활동에 따른 배면 동적 토압의 변화”, 한국지반공학회 논문집, 21(8), 2005, pp. 55-61.
4. Watanabe K., Kobayashi Y., and Towhata I., “Shaking table tests on seismic earth pressure exerted on retaining wall model.” Proc., the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 1999, pp. 297-302.
5. Kohama, E., A study on the stability of gravity type quay wall during earthquake, PhD.Thesis, Hokkaido University, 2000.
6. Sato, M., Watanabe, H., Takeda, T., and Shimada, M., “Simplified method to evaluate caisson type quay wall movement”, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, paper No. 1440, 2000.
7. Sun, J.I., Golesorkhi, R. and Seed, H.B., “Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils”, Report No. EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1988.
8. Seed, H.B and Idriss, I.M., “Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses”, Report No. EERC

- 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
9. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, B.H., "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," EERC Report, no. 72-12, Berkeley, University of California, 1972.
10. Geo-Slope, QUAKE/W User's Guide, 2003.
11. Itasca Consulting Group, Inc., FLAC User's Manual, 1995.
12. Canadian Geotechnical Society, Canadian Foundation Engineering Manual, 4th Edition, 2006.
13. 해양수산부, 항만 및 어항설계기준, 2005.
14. Gasparini, D.A., and Vanmarcke, E.H., "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Evaluation of Seismic Safety of Buildings Report No. 2, MIT Dept. of Civil Eng., Cambridge, Massachusetts, January, 1976.