

웨이브렛 변환을 이용한 케이슨식 안벽의 동적응답해석
Dynamic response analysis of the caisson-type quay wall
using the wavelet transform

문 용* 김재권* 신현양* 석정우**
Moon, Yong Kim, Jae Kwon Shin, HyunYang Seok, Jeong Woo

ABSTRACT

During the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, many caisson-type quay walls in Kobe port moved several meters towards the seaside due to liquefaction and subsequent ground flow. To investigate the mechanism of quay wall damage, we carried out the numerical simulation using the 2-D effective stress analysis. Input earthquake motions used for the analyses are original Dip wave and the component wave in each compact support of wavelet transformation. The results suggested that the shear failure occurred in the foundation soil underneath the caisson type quay wall due to the deformation of the caisson type quay wall.

1. 서론

1995년에 발생한 일본 Hyogoken-Nambu 지진(M7.2)은 도시직하형 지진으로, 일본 Kobe 시내를 중심으로 매립지반에 발생한 광범위한 액상화에 의해 건물의 침하⁽¹⁾, 말뚝기초의 손상⁽²⁾, 호안·방파제의 변형⁽³⁾ 등 각종 구조물에 많은 피해를 발생시켰다. 특히, 케이슨식 안벽은 배후지반에서 발생한 액상화 및 유동현상에 의하여 바다쪽으로 수m 이상 변형하였고, 그 범위는 수백m에 이르는 막대한 피해를 입었다⁽⁴⁾. 이러한 케이슨식 안벽의 변형 및 파괴특성은 많은 연구자들에게 주목을 받게 되었으며, 그 메카니즘에 관한 각종 연구가 수행되어져 왔다. 또한, Hyogoken-Nambu 지진에서 발생한 거대한 피해사례가 계기가 되어, 현재 일본에서는 각종 토목구조물에 대한 내진설계기준의 재검토가 이루어지고 있다.

본 연구는 이러한 케이슨식 안벽의 지진시 안정성 및 변형특성을 파악하기 위하여, 일본

* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 토목기술팀
** 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

Hyogoken-Nanbu 지진에서 실제로 피해를 입은 육각아일랜드 남측의 수심 14m의 대형 케이슨식 안벽을 대상으로 하여, 2차원 유효응력해석 코드 LIQCA-2D를 이용하여, 케이슨식 안벽의 천단부의 변위 및 케이슨식 안벽 직하의 치환사의 응답에 대하여 검토를 실시하였다. 한편, 본 해석에서 사용한 입력파는 일본 지반공학회 「토목구조물의 설계용 입력지진동에 관한 연구위원회」에서 작성한 토목구조물의 설계용 입력파⁽⁵⁾-역단층에 의한 내륙직하형 지진파-(이하, Dip파로 명칭함.) 및 그 Dip파를 웨이브렛 변환하여 얻은 각 서포트 구간 $j=5\sim 9$ 의 성분파를 사용하여 주파수 특성이 케이슨식 안벽의 변형에 미치는 영향에 대하여 검토를 실시하였다.

2. 웨이브렛 변환을 이용한 입력 지진파의 작성

시계열 데이터의 해석을 실시함에 있어 푸리에 변환은 가장 일반적이며, 강력한 해석수법 중의 하나로 여겨지고 있지만, 그 기저함수가 $\exp(i\omega t)$ 이라는 정상진동이기 때문에 변환을 실시함에 있어 시각에 대한 정보가 그 스펙트럼에 반영되어지지 않는다. 즉 시계열 상의 몇 개의 같은 정보가 있더라도, 푸리에 스펙트럼에서는 하나로 모아지는 정보로 취급되어지기 때문에 언제 그 정보가 발생했는가를 알기에는 곤란하다. 한편 웨이브렛 변환은 시계열 데이터의 시간-주파수 영역에서의 변환으로, 그 기저함수가 되는 모 웨이브렛(mother wavelet)이 시간과 진동수의 양방의 영역에 있어서 국소화된 함수로 되어 있기 때문에, 시간과 진동수의 정보를 불확정성함수로부터의 제한적인 범위내에서 구하는 것이 가능하다. 또한, 웨이브렛 변환은 주어진 입력신호에 대해 웨이브렛 함수와 스케일 함수를 각각 곱하여 고주파와 저주파로 신호의 주파수 대역을 나누어 원하는 주파수 대역에서의 변화된 신호를 분석할 수 있기 때문에 시간-주파수 국부성이 매우 우수한 특징을 갖는다.

본 연구에서는 Sasaki et al.(1992)에 의하여 제안된 완전정규직교변환인 이산 웨이브렛 변환⁽⁶⁾을 이용하여 Dip파를 각 서포트 구간별로 분해하여 성분파를 얻었으며, 이 성분파를 이용하여 2차원 유효응력해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 이산 웨이브렛 변환·역변환은 식 (1)과 식 (2), 그리고 각 j 차 서포트 구간은 식 (4)와 같다.

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{j,k}(t) \cdot x(t) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_j \sum_k a_{j,k} \cdot \varphi_{j,k}(t) \quad (2)$$

$$\varphi_{j,k} = 2^{-j/2} \cdot \varphi(2^j t - k) \quad (3)$$

$$\{f \mid 2^j/3T \leq f \leq 2^{j+2}/3T\} \quad (4)$$

여기서, T 는 지진파의 지속시간을 나타낸다. 한편, 위 식에서 웨이브렛 변환의 역변환이 존재하기 위한 조건을 만족할 경우, 식 (3)의 $\varphi_{j,k}$ 를 모 웨이브렛(mother wavelet)이라 하는데, 본 연구에서는 Y. Meyer⁽⁷⁾에 의한 구성법을 적용하였다.

Dip파(원형파) 및 이산 웨이브렛 변환을 실시한 후의 각 성분파를 그림 1에 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 Dip파(원형파)에 대하여 각 서포트 구간별($j=5\sim 9$)로 각각 다른 주파수 영

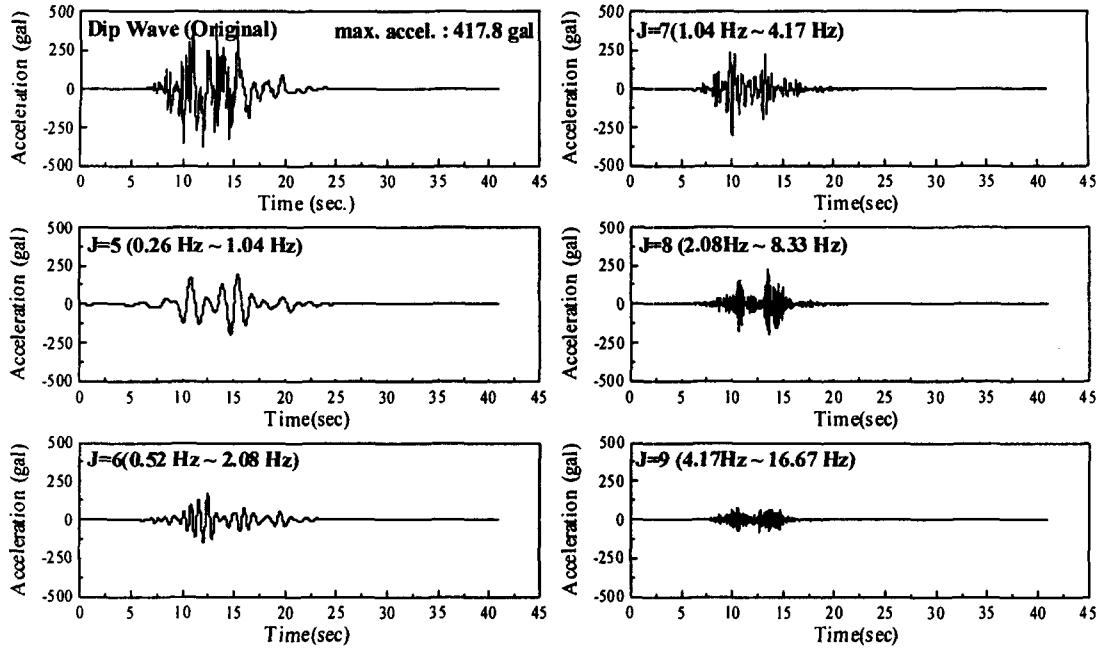


그림 1. Dip파(원형파) 및 웨이브렛 변환에 의한 각 서포트 구간 j의 성분파형

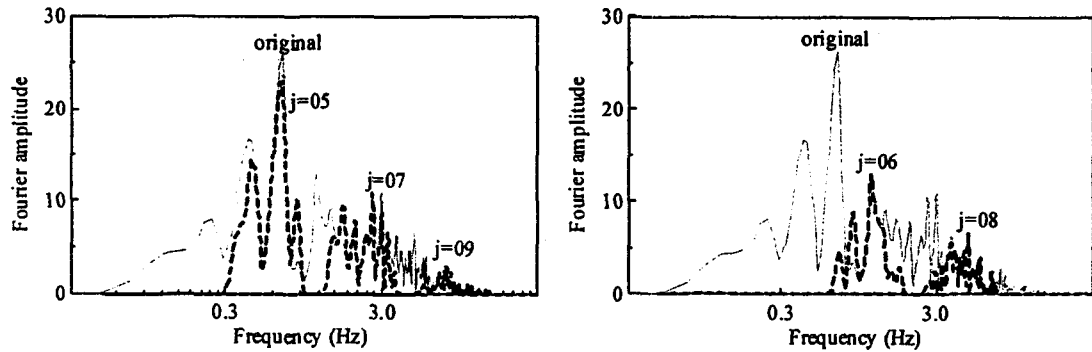


그림 2. 각 서포트 구간 j의 성분파형에 대한 푸리에 진폭 특성

역별로 분해된 파형을 얻을 수 있었다. 한편 Dip파(원형파) 및 각 성분파에 대한 푸리에 스펙트럼을 그림 2에 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 각 성분파는 Dip파(원형파)의 각 서포트 구간별로 약간 중첩이 되어 있으나 Dip파(원형파)의 스펙트럼과 잘 대응되고 있으며 주파수 영역별로 분해가 되었음을 알 수 있다.

3. 케이슨식 안벽의 해석 방법 및 모델

본 연구에서 사용한 LIQCA-2D⁽⁸⁾는 Biot의 2상 혼합체이론⁽⁹⁾에 기초하여 U-P formulation에 의하여 지배방정식을 정식화한 후, 공간적으로는 FEM과 FDM에 의하여 이산화하고, 시간적으로는 Newmark- β 방법에 의하여 이산화한 2차원 유효응력 해석코드이다.

해석대상의 케이슨식 안벽은 Hyogoken-Nanbu 지진에서 피해를 입은 육각아이랜드 남측 수심 14m의 대형 케이슨식 안벽이며, 수평변위 4~5m, 침하 1.5~2m, 경사각 4°의 피해가 보고되어져 있다⁽¹⁰⁾. 본 연구의 해석 대상이 되는 케이슨식 안벽의 지반조건을 그림 3에, 해석 대상 케이슨식 안벽에 대한 유한요소해석 모델은 그림 4에 나타낸다. 2차원 유한요소 모델의 설정에 있어서, 모델의 측방 경계조건은 폭 500m의 요소를 설치하였고, 그 양단을 등변위 경계조건으로 설정하여 모델의 측방에 대한 자유지반적인 거동을 모사하도록 하였다. 또한, 해석모델의 저면은 고정 경계조건으로, 지하수위면 및 해수면을 배수경계조건으로 설정하였다.

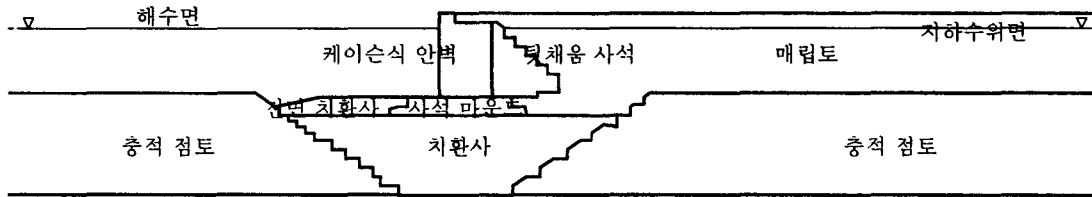


그림 3. 케이슨식 안벽의 지반조건

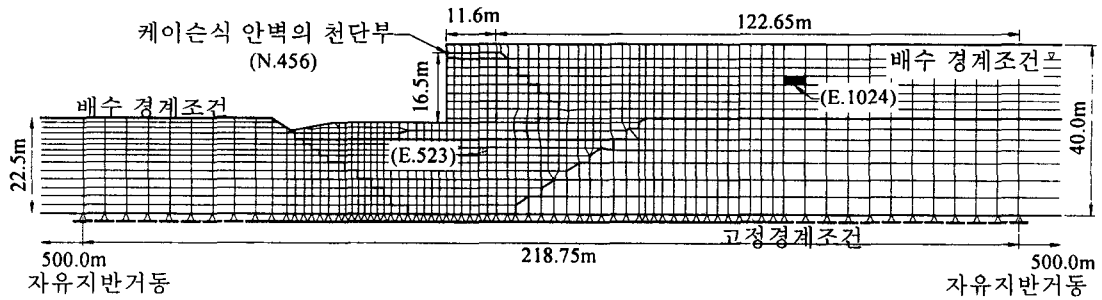


그림 4. 유한요소해석을 위한 모델

표 1. 2차원 유효응력해석에 필요한 재료정수

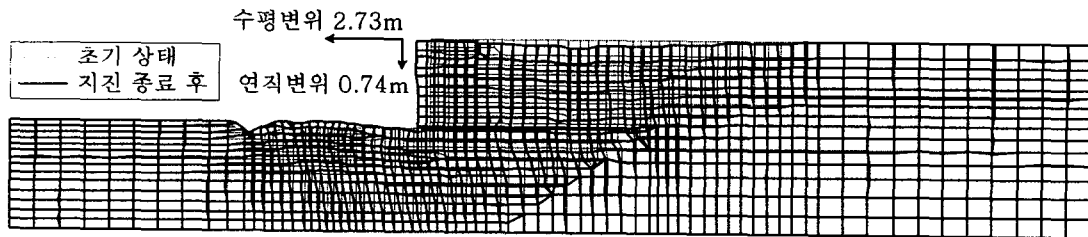
	치환사	매립토	충적 점토	뒤채움 사석
초기응력비(e_0)	0.315	0.448	1.75	0.40
압축지수(λ)	0.01	0.01	0.01	0.01
팽창지수(k)	0.0025	0.0025	0.0005	0.0005
초기전단계수비(G_0/σ'_m)	434.0	1195.0	524.0	1766.0
변상응력비(M_m)	0.909	0.909	0.98	1.336
파괴응력비(M_p)	1.229	1.194	0.98	1.336
경화함수 파라메타	(B_0)	1000.0	2400.0	3000.0
	(B_1)	50.0	60.0	100.0
	(C_p)	0.0	0.0	4000.0
다이레이탄시 계수	(D_0)	1.5	1.2	0.0
	(n)	4.0	1.0	0.0
소성기준변형률(γ_{ref}^p)	0.002	0.0005	9999.9	9999.9
탄성기준변형률(γ_{ref}^e)	0.02	0.005	9999.9	9999.9

해석에 사용된 구성방정식은, 케이슨식 안벽은 탄성으로, 점토지반은 탄소성 구성방정식을 적용하였으며, 케이슨식 안벽의 저면과 배면에는 조인트 요소를 설치하여 강성이 다른 두 물체 사이의 자유로운 미끄럼짐 거동이 표현 가능하도록 하였다. 특히, 케이슨식 안벽의 동적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 모래지반에 대해서는 탄소성이론에 기초한 과압밀 경계곡면, 비선형 이동경화법칙, 일반화한 비관련유동법칙, 전단강성 변형이력 의존성 등의 개념을 도입한 Oka et al.(1999)의 탄소성 구성방정식⁽¹¹⁾을 이용하였다. 해석에 이용한 재료 정수는 Tateisi et al. (1998)에 의해 설정된 값⁽¹²⁾을 참조하였으며, 해석에 필요한 재료정수를 표 1에 나타낸다.

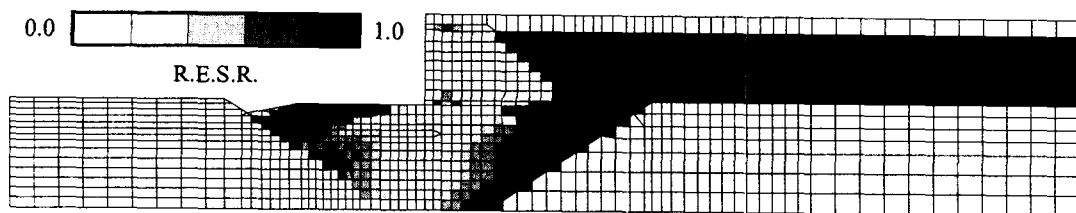
4. 해석 결과

Dip파(원형파)에 대한 지진종료시(30초)의 변위도 및 상대유효응력비(R.E.S.R.)의 분포도를 그림 5에 나타낸다. 그림 5(b)의 상대유효응력비(R.E.S.R.)의 분포를 보면, 케이슨식 안벽 배후 지반은 지진 종료시 거의 1.0에 도달하여 액상화가 발생하였지만, 케이슨식 안벽 직하 치환사는 상대유효응력비(R.E.S.R.)가 1.0에 도달하지 않아 액상화가 발생하고 있지 않음을 알 수 있다.

케이슨식 안벽 천단부의 수평변위 및 연직변위에 대한 시간이력을 그림 6에 나타낸다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 최대 변위는 Dip파(원형파)에서 수평변위 2.73m, 연직변위 0.74m가 발생하였으며, 고주파수 영역으로 갈수록(서포트 구간 j의 값이 증가할수록), 수평 및 연직 변위가 적어지고 있음을 알 수 있다.



(a) 변위도



(b) 상대유효응력비(R.E.S.R.) 분포도

그림 5. 지진종료시의 케이슨식 안벽의 변위 및 상대유효응력비(R.E.S.R.) 분포도

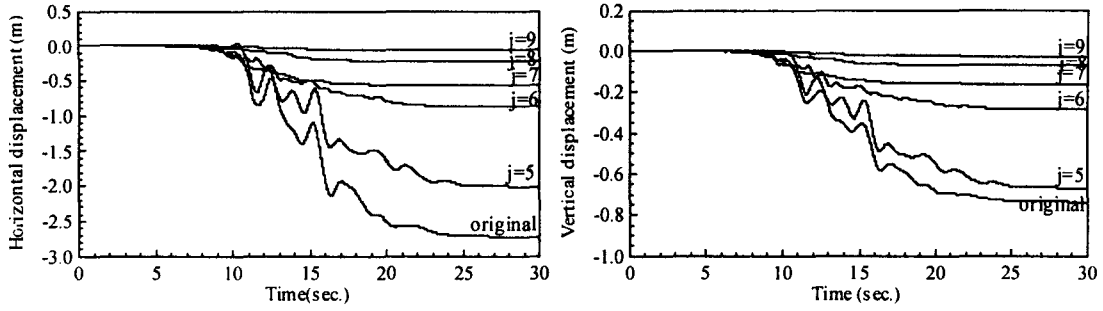


그림 6. 케이슨식 안벽 천단부에서의 수평변위 및 연직변위

케이슨식 안벽 직하 치환사의 Dip파(원형파) 및 각 성분파에 대한 유효응력 경로 및 과잉간극수압비의 시간이력을 그림 7과 그림 8에 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 주파수 영역에 상관없이 모든 경우에 치환사 부분에서 액상화가 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 한편, 그림 7에서 보이는 바와 같이 저주파수 영역에서는 응력반전이 크게 일어나 전단파괴가 일어나고 있는 반면에, 고주파 영역에서는 응력 반전은 적고 주로 평균유효주응력의 감소가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 영향에 의하여 그림 8에서 보이는 바와 같이 저주파 영역에서는 전단파괴로 인하여 과잉간극수압비의 시간적 변화가 큰 반면, 고주파 영역에서는 평균유효주응력의 감소로 인하여 과잉간극수압비가 빠르게 상승하는 경향을 나타내지만, 시간적 변화는 적음을 알 수 있다. 즉, 저주파수 영역에서는 케이슨식 안벽 직하 치환사의 전단파괴에 영향을 미치며, 고주파수 영역에서는 과잉간극수압비의 증가에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

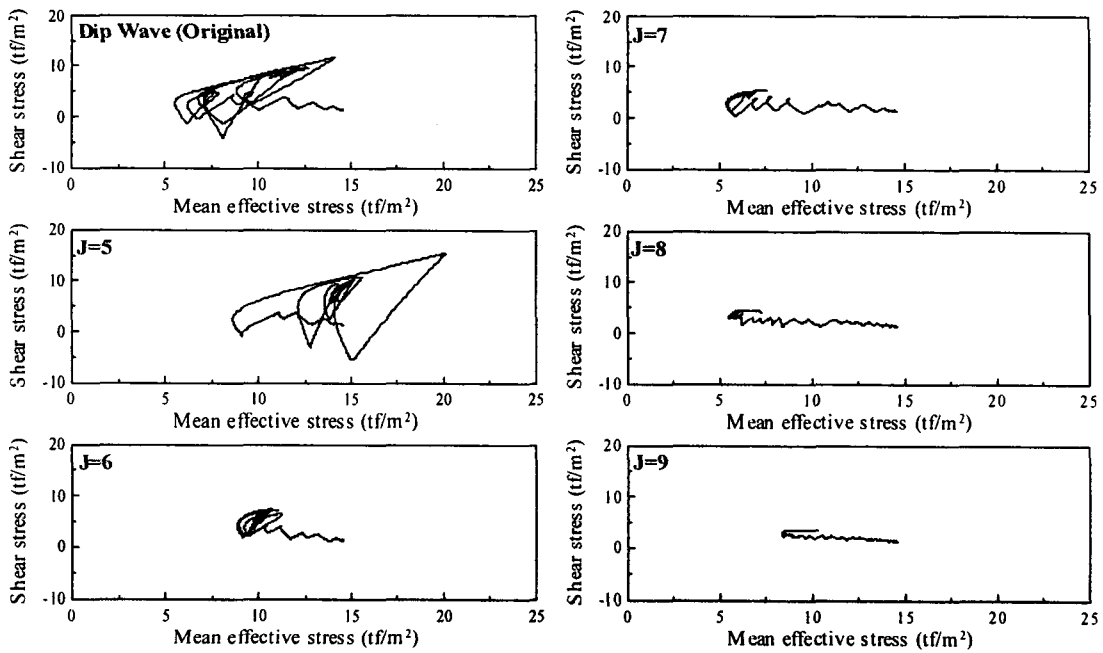


그림 7. Dip파(원형파) 및 각 성분파에 대한 유효응력 경로

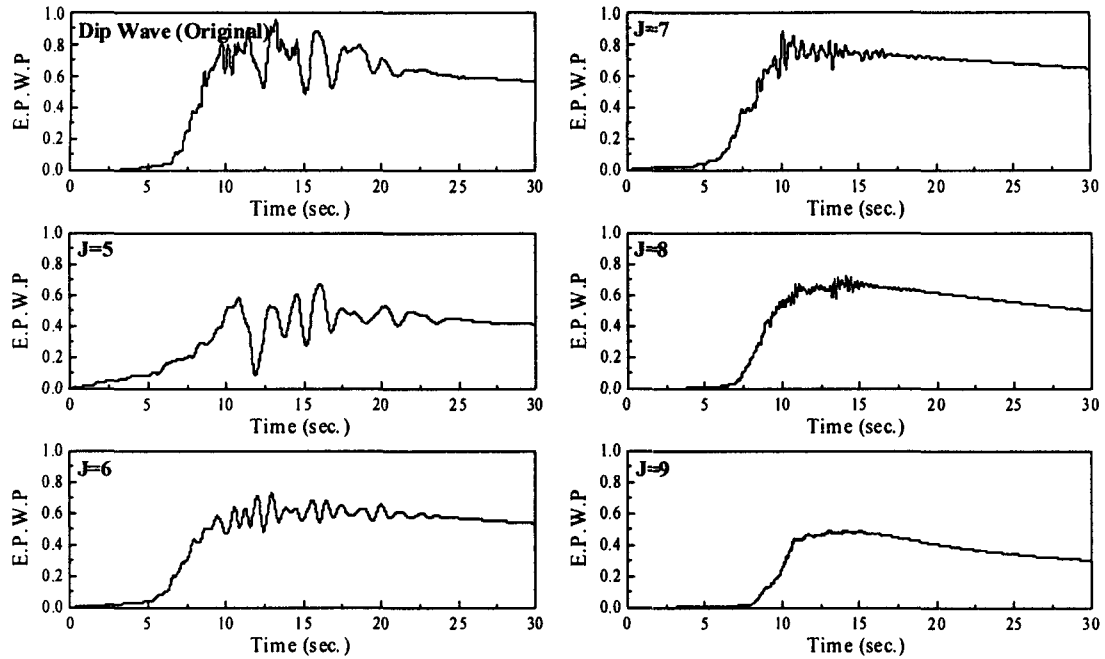


그림 8. Dip파(원형파) 및 각 성분파에 대한 과잉간극수압비의 시간이력

5. 결론

일본 Hyogoken-Nanbu 지진에서 피해를 입은 케이슨식 안벽을 대상으로 하여, 2차원 유효응력해석을 실시하여, 지진시 케이슨식 안벽의 안정성 및 변형 특성에 관하여 검토를 실시한 결과, Dip파(원형파)의 경우, 케이슨식 안벽 배후 지반에서는 액상화가 발생한 반면, 케이슨식 안벽 직하 치환사부에서는 액상화가 발생하지 않고 전단파괴가 발생하였다. 한편, 웨이브렛 변환한 각 성분파에 대한 케이슨식 안벽 직하 치환사의 변형특성은 저주파수 영역은 지반의 전단파괴에 영향을 미치며, 고주파 영역은 과잉간극수압비의 증가에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Tokimatsu, K., Mizuno, H., and Kakurai, M., "Building damage associated with geotechnical problems", Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.1, 1996, pp.219-234.
2. Tokimatsu, K. and Asaka, Y., "Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogoken-nambu earthquake", Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.2, 1998, pp.163-177.
3. Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T., "Performance of

- caisson type quay walls at Kobe port", Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.1, 1996, pp.119-136.
4. Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H., "Soil characteristics and ground damage", Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.1, 1996, pp.109-118.
 5. 香川敬生, 江尻讓嗣, "진원단층의 파괴과정을 고려한 진원근방 지진동의 계산", 지반구조물의 내진설계에 이용하는 레벨2 지진동을 생각하는 심포지움 발표논문집, 1998, pp.1-6. (일본어)
 6. Fumio Sasaki, Tatsuya MAEDA and Michio YAMADA, "Study of time history data using wavelet transform", Journal of Structural Engineering, Vol. 38B, 1992. (japanese)
 7. Meyer Y., "Orthonormal Wavelets", in wavelets, Springer, pp.21-37, 1989, pp.9-20.
 8. Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R., "FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model", Applied Science Research, Vol. 52, 1994, pp.209-245.
 9. Biot, M.A., "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media", Journal of Applied Physics, Vol.33, NO.4, 1962, pp.1482-1498.
 10. 稻富隆出他, "1995년 효고현 남부지진에 의한 항만시설등 피해보고", 항만기술연구소 자료, No.857, 1997. (일본어)
 11. Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S., "A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus", Geotechnique, Vol.49, No.5, 1999, pp.661-680.
 12. Akira Tateishi, Nakito Nago, Akinori Koike, "Seismic deformation analysis of caisson type quay wall using input seismic motion for aseismic design", Level2 Symposium, Japan Geotechnical Society, 1998, pp.81-88. (japanese)