

지반-구조물의 동적 상호작용 해석법(II)

Method for soil-structure dynamic interaction analysis(II)

황 성 춘*

강 보 순**

오 병 현***

박 성 진****

Hwang, Seong-chun

Kang, Bo-soon

Oh, Byung-hyun

Park, Sung-jin

ABSTRACT

Comparison of results from two different methods of soil-structure dynamic interaction analysis is presented. Two methods include **transformed static** and seismic response analyses. In seismic response analysis, the difference in result of total stress analysis relative to effective stress analysis is investigated.

1. 서론

현재 국내에서 지진에 대한 설계나 검토가 다각적으로 이루어지고 있지만, 해석적으로 접근하는 데 있어서 많은 기술자들이 「어떤 방법으로 진행할 것인가?」 또 「어떤 해석법으로 실시할 것인가?」 그리고 「해석방법에 따라 결과에 어떤 차이를 보이는가?」에 대한 문제에 자주 봉착하는 것 또한 사실이다. 지진에 대한 설계시, 지진력을 고려하여 해석을 실시하는 방법으로는 동적하중을 정적하중으로 변환하여 고려하는 유사정적해석과 동적하중을 그대로 적용하는 동적해석법이 있다. 그러나 동적 하중 즉, 지진 하중에 대한 사면의 응답도 당연히 동적으로 반응하기 때문에 지진 하중에 대해서 동적 응답 해석법이 내진 해석에 가장 적합한 방법이라고 할 수 있을 것이다. 그러나, 해석 이론의 복잡성, 적용 방법의 다양성, 입력 데이터 및 출력 데이터의 방대함, 경제적 및 시간적 비용의 팽대화 등으로 인해 비교적 간단히 수행되어질 수 있는 여러 가지 방법의 의해서 지진 하중을 고려하는 것이 가능하도록 한 정적 해석법에 의해 사면의 내진 평가를 수행하는 경우가 대부분이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 유사정적해석법인 진도법과 수정진도법으로 해석을 실시하고, 이것을 동적 응답 해석의 결과와 비교하여 보았다. 그리고 동적 응답해석에서 전응력해석법과 유효응력해석법을 비교하여 어떤 차이를 보이는가에 대하여 고찰하여 보았다.

2. 해석의 고려사항

지진력이 구조물에 작용하는 것은 시공도중이나 시공직후가 아니라 시공완료하고 임의 시간인

* 경주대학교 토목공학과 조교수, 정회원
** 경주대학교 토목공학과 전임강사, 정회원
*** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원
**** 경남대학교 토목공학과 박사과정

경과한 후에 지진에 대한 영향을 받게될 것이다. 따라서 동적해석을 실시하기 위해서는 정적인 상태에서의 안전성에 대한 평가를 먼저 실시하고 난 후 동적해석을 실시하는 것이 타당할 것이다. 여기서 주의해야 할 것은 각 해석법에 따른 경계 조건의 설정이다. 정적FEM해석시에는 측방경계를 $x=$ 고정, $y=$ 자유로 하고 저면경계는 $x=$ 자유, $y=$ 고정으로 하지만 유사정적FEM해석시에는 측방경계를 $x=$ 자유, $y=$ 고정으로 하고 저면경계를 $x=y=$ 고정으로 하였다. 그리고 지진응답해석에서는 측방경계를 전달경계(점성경계)로 하고 저면경계를 완전고정으로 하였다.

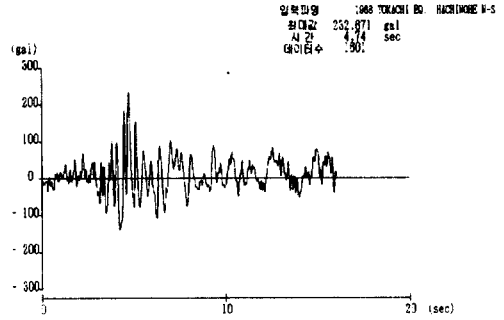


그림 1 지진동의 원파형

본 해석에서 적용한 지진파는 Hachinohe파(그림 1)를 적용하였으며, 그 크기는 적용 대상에 따라 조정하여 사용하였다.

3. 해석결과

3.1 유사정적해석

지진 하중에 의해 사면의 활동면에 발생되어지는 거동은 지반움직임의 가속도에 의해 그 사면의 활동면의 각 부분에 생기는 관성력을 고려하는 것이 가능하다. 사면에 작용하는 관성력은 가속도에 질량을 곱하는 것으로 되고, 이 가속도를 중력가속도로 나누어 준 것을 진도라 부른다. 사면의 활동면에서 발생하는 진도는 시간과 함께 변동하는 지반움직임의 가속도를 무차원화하는 것이 아니고, 지반움직임에 대한 사면의 활동면의 가속도 응답값을 무차원화한 것으로서, 이들도 시간력에 따라서 변동하게 된다. 그러나, 실제의 내진 해석에 있어서, 이들을 어느 일정 값으로 고려하여 해석하는 경우가 대부분이며, 이런 방법들을 정적해석이라 한다.

위에서도 언급한 바와 같이, 진도법은 가장 간단한 방법의 하나로서 사면의 활동면의 어느 부분의 중량에 활동면의 특성에 관계되지 않은 진도를 곱한 것을 그 부분의 지진 하중으로 한다. 현재에도 실무에서는 대부분이 이 방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러나, 지진 하중은 사면의 특성, 특히 강성과 감쇠에 의해 지배되는 것이 명확한 사실이기 때문에, 그 특성을 도입한 방법으로 이루어진 것이 수정 진도법이다. 진도법은 강성이 높고 고유주기가 짧은 사면 내진 해석에, 수정진도법은 비교적 강성이 낮고 고유주기가 긴 사면의 내진 해석에 주로 이용된다.

3.1.1 한계평형법에 의한 결과

한계상태평형법을 이용한 댐사면의 원호활동에 대하여 평상시와 수평진도를 0.12g와 0.18g를 적용한 경우에 대하여 진도법, 수정진도법으로 계산을 실시하였다. 그리고 댐이 완성된 이후 많은 시간이 소요되었으므로 압밀, 침투 등에 의해 초기의 설계 단면에 비해 어느 정도의 차이는 있을 것이다. 따라서 먼저 압밀해석과 침투류해석을 실시하여 댐체의 단면과 침윤선 등을 규명하였고, 이 것으로 진도법과 수정진도법을 적용하여 보았다.

표-1 한계상태평형법에 의한 안전율

구분	한계평형해석		유한요소해석
	상시만수위	압밀침하고려	상시만수위
정상시	1.73	1.76	1.71
진도법	0.12g	1.53	1.24
	0.18g	1.31	1.23
수정진도법	0.12g	1.24	1.22
	0.18g	1.06	1.09

표-2 댐마루에서의 수평방향변위

단위:(cm)

위 치	시공적후	상시만수위	적용진도	진도법	수정진도법	동적해석
전면 끝점	-0.01	1.30	0.12g	10.95	11.86	-6.28
			0.18g	58.73	66.69	-9.42
중앙점	-0.58	0.74	0.12g	10.60	11.55	-6.42
			0.18g	60.18	68.62	-9.63
배면측 끝점	-1.24	0.09	0.12g	10.16	11.13	-6.43
			0.18g	60.64	69.00	-9.64

3.1.2 유한요소해석에 의한 결과

댐의 동적 해석을 수행하기 위해서는 물과 구조물의 상호작용에 대한 고려가 필요하게 된다. 즉 동수압에 대한 고려가 있어야 한다. 본 해석예에서는 Westaatgard의 방법에 기초하여 동수압을 부가질량으로 물에 접하는 요소에 부가하는 방법을 사용하였다.

표-1의 결과에서 볼 수 있듯이 응력변형해석(FEM)에 의한 점안전율의 결과가 한계상태평형법에 의한 안전율과 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나 변위량으로 평가할 때, 진도법에 의한 변위 결과보다 수정진도법을 적용한 경우가 더 위험한 것으로 나타나고 있다. 그러나 (그림 2)와 (그림 3)에서 보듯이 댐체의 안전율이 기초지반과 접하는 부분에서는 수정진도법에 의한 결과가 높게 나타나고 있으나, 댐체 상부에서는 수정진도법에 의한 결과가 낮게 나타나고 있다.

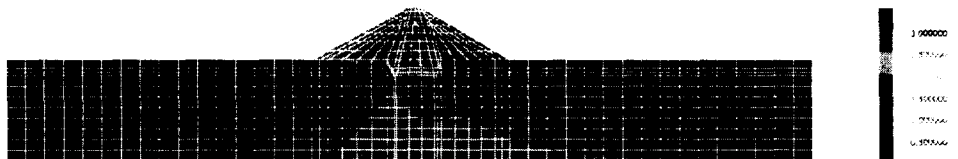


그림 2 진도법에 의한 점안전율도

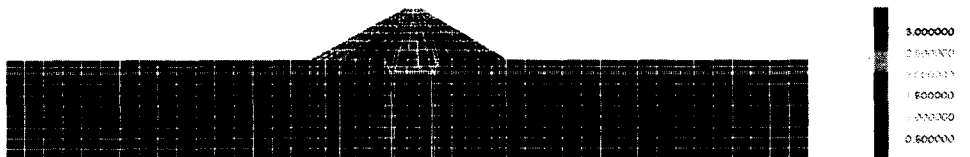


그림 3 수정진도법에 의한 점안전율도

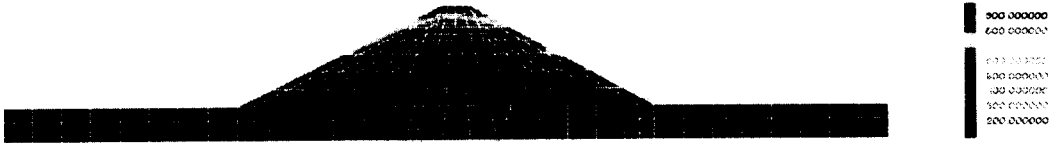


그림 4 지진동 0.18g일 때의 X방향 가속도

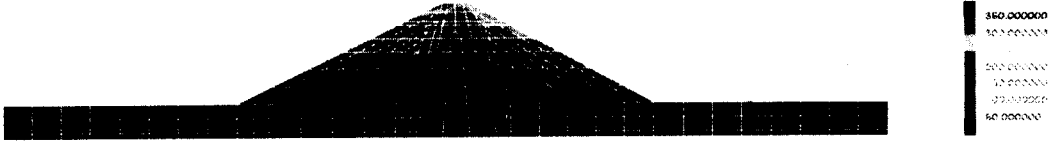


그림 5 지진동 0.18g일 때의 Y방향 가속도

3.2 동적해석(지진응답해석)

위 (그림 4)와 (그림 5)에서 보는 바와 같이 시간이력에 따른 최대 Y방향 가속도는 그 분포가 뎀의 천단에 집중되어 있으며 중앙의 코어부에 비하여 록재료에서 더 큰 최대 Y방향 가속도가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이런 경향을 정적해석으로 구현한 것은 진도법보다 수정진도법에 의한 결과가 보다 더 유사하게 나타났다.

위 (그림 4)와 (그림 5)의 결과는 배면의 수압을 Westaatgard의 방법에 기초하여 동수압을 부가 질량으로 물에 접하는 요소에 부가하는 방법으로 사용하였는데, 이것은 전응력해석 프로그램상에서 동수압을 고려하는 방법인데 실제 유효응력해석에 의한 결과와 어떤 차이가 있는지 비교해 보았다.

(그림 6)과 같은 항만 구조물에 대하여 전응력해석과 유효응력해석을 실시하였다.

표-3에서 보듯이 전응력해석에 비해 유효응력해석은 변위의 크기도 크고 응답시간도 빠르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

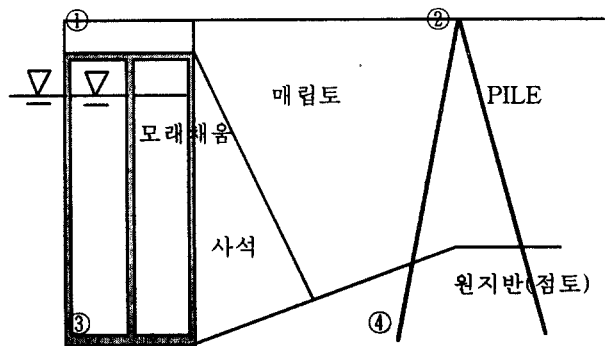


그림 6 해석대상물의 개략도

표-3 x방향 최대변위와 발생 시간

위 치	전응력해석 결과		유효응력해석 결과	
	x방향 최대변위	시 간	x방향 최대변위	시 간
①	3.5226 cm	4.50 sec	5.7760 cm	12.73 sec
②	3.9332 cm	4.66 sec	1.7380 cm	12.67 sec
③	3.4075 cm	4.50 sec	5.5310 cm	12.83 sec
④	2.5847 cm	4.47 sec	0.1150 cm	4.25 sec

유효응력해석에서 과잉간극수압비는 케이슨 내의 축체음 모래의 경우, 가진(加振)과 동시에 과잉간극수압비가 일시적으로 증대하였다가 감소한 후 2초 내외에서 다시 증가하는 것으로 보여진다. 케이슨이 위치한 곳과 파일의 중간부근의 위치에서 매립토에 과잉간극수압이 서서히 증대되는 것으로 나타났다.

(그림 7)에서 보듯이 케이슨에서 떨어진 파일이 설치된 위치에서는 최대 과잉간극수압비가 0.8 정도로 액상화하지는 않는 것으로 나타나고 있다. 하지만 전용력해석(그림 8)에서는 최소 FL치가 파일이 설치된 부근에서 0.7이하의 값을 가지는 것으로 나타나 액상화하는 것으로 나타나고 있다. 즉, 전체적인 경향에서는 전용력해석이나 유효응력해석에서 비슷하게 나타나지만, 그 값의 크기에서는 전용력에서의 결과가 유효응력해석에 비해 크게 산출되는 것으로 나타났다.

3.2.1 유효응력 해석결과로 얻은 과잉간극수압비

과잉간극수압비는 다음 식과 같이 나타내어 진다.

$$(1 - \sigma'_m) / \sigma'_{mo} \quad (1)$$

여기서 σ'_m 는 현재의 최대유효응력, σ'_{mo} 는 정적상태에서의 최대유효응력이다. 이 값이 1.0 이상이면 액상화 한다.

3.2.2 액상화 안전율 (FL)

액상화안전율은 다음 식과 같이 나타내어 진다.

$$FL = \frac{\tau_1 / \sigma'_v}{\tau_d / \sigma'_v} \quad (2)$$

여기서 τ_1 / σ'_v 는 진동 전단응력비, τ_d / σ'_v 는 액상화 전단저항응력비이다. 이 값이 1.0 이하이면 액상화한다.



그림 7 과잉간극수압비의 분포

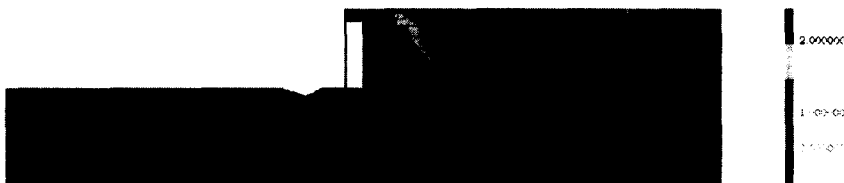


그림 8 액상화 발생에 대한 안전율의 분포

4. 결론

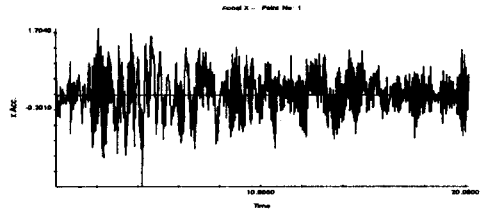
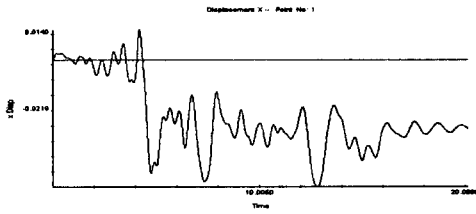
본 논문에서는 지진동을 정적하중인 진도로 고려하여 진도법과 수정진도법으로 내진해석을 실시하였다. 그리고 동적해석결과와 비교하기 위한 지진응답해석을 실시하였다. 또 지진응답해석시 물과 접하는 부분의 거동을 전용력해석과 유효응력해석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 높이가 높은 사력댐(72m)에 대해 진도법과 수정진도법으로 해석한 결과, 수정진도법에 의한 결과가 진도법보다 안정성이 낮게 평가 되었다. 진도 0.12g를 적용한 경우, 진도법에서는 안전율이 1.53, 압밀 후에는 1.45였지만, 수정진도법에서는 1.24와 1.26으로 13%~19%정도 낮게 나타났다. 유한요소법으로 해석한 결과에서도 수정진도를 적용한 경우가 낮게 나타났다. 즉, 높이가 높고 강성이 낮은 댐, 제방, 성토체 등의 내진설계에서는 진도법보다 수정진도법을 적용하는 것이 안정성확보에 유리한 것으로 나타났다.
- 2) 지진응답해석에서 전용력해석과 유효응력해석을 실시하여 나타난 결과는 유효응력에 의한 결과가 전용력해석에 의한 결과보다 크게 나타났다. 이것은 수정진도법으로 적용하는 것이 지진응답해석의 결과와 더 유사함을 알 수 있었다.
- 3) 전용력해석과 유효응력해석을 비교해 볼 때, 응답결과는 유효응력해석이 크게 나타났으나 액상화 가능성에서는 전용력해석에 의한 결과가 더 높은 가능성이 있는 것으로 나타났다. 해석결과 크기의 차이는 있으나 경향은 거의 비슷하게 나타났다. 즉, 전용력해석으로도 유효응력해석의 결과를 예상하여 설계에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

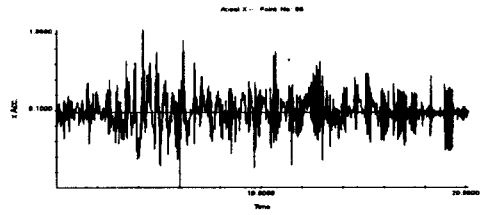
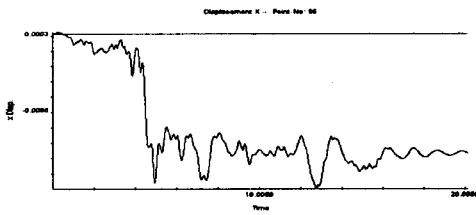
참고문헌

1. 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계, 구미서관
2. 도덕현, 고재만(1999), 내진공학, 도서출판효성
3. 坂本忠彦(1998), ロックフィルダムの力學舉動と安定性評價に関する研究
4. 一井康二, 井合進, 森田年一(1997), 兵庫南部地震におけるケーソン式岸壁の舉動の有効應力解析, 港灣技術研究所報告 第36卷 第2号
5. 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二(1997), 液狀化により構造物被害豫測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法, 運輸省港灣技術研究所
6. 井合進(1997), 大地震時の地盤・構造物系の變形解析, 運輸省港灣技術研究所

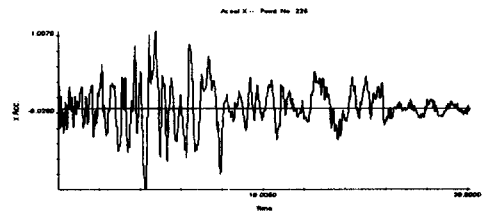
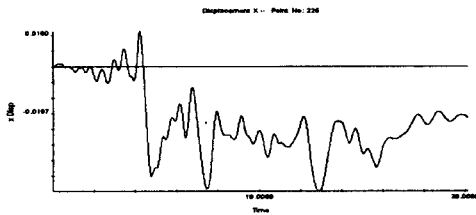
①번 위치에서 응답변위 및 응답가속도(유효응력해석;FLIP)



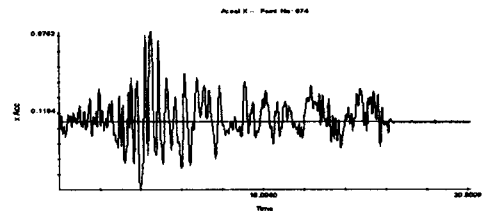
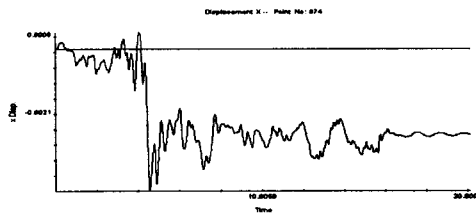
②번 위치에서 응답변위 및 응답가속도(유효응력해석;FLIP)



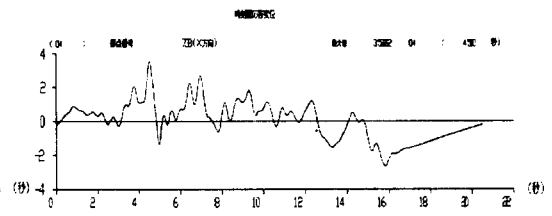
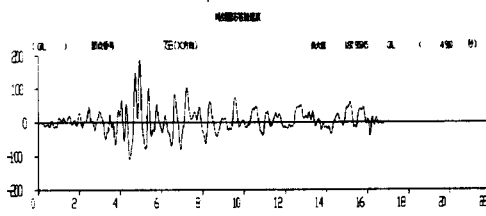
③번 위치에서 응답변위 및 응답가속도(유효응력해석;FLIP)



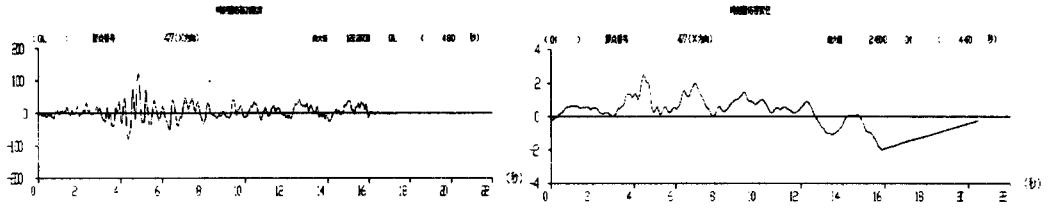
④번 위치에서 응답변위 및 응답가속도(유효응력해석;FLIP)



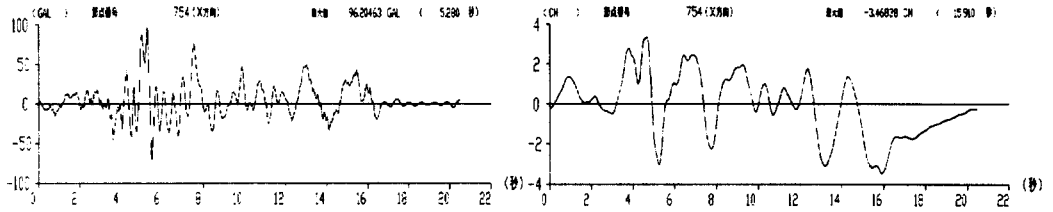
①번 위치에서 응답가속도 및 응답변위(전응력해석;FLUSH)



②번 위치에서 응답가속도 및 응답변위(전응력해석;FLUSH)



③번 위치에서 응답가속도 및 응답변위(전응력해석;FLUSH)



④번 위치에서 응답가속도 및 응답변위(전응력해석;FLUSH)

