

V-2. 지반-구조물의 동적 상호작용 해석법

4. 해석사례

4.1 사면

일반적으로 지진 발생시 지반공학의 입장에서 공학적으로 문제가 되는 것으로서, 대표적으로 사면의 활동을 들 수가 있다. 본 강좌의 사면 예에서 주로 언급 하고자 하는 것은 진도법의 적용한계를 분명히 하고, 만약 그 간편성 때문에 진도법을 사용한 경우에는 어떠한 점을 유의해야만 하는가에 대해 서술한 것이다.

2차원 유한요소모델에 의해 평상시의 초기 응력을 구하고, 여기에 지진을 고려한 동적해석을 행하여 응력분포와 응답파형을 구하고, 가속도성분 등을 산출하였다. 또한, 동적해석에 의해 구한 활동토피에 대한 등가진도를 구하고, 이 결과를 이용하여 사면의 안정성을 평가하였다. 해석대상으로 하는 사면의 형상 및 토질구분은 그림 16과 같고, 각 지층의 물성값은 표 1에서와 같다.

*1 정희원, 경주대학교 건설환경시스템공학부 조교수

*2 정희원, 한국수자원공사 수자원연구소, 선임연구원

*3 정희원, 경남대학교 토목공학과, 박사과정

*4 정희원, 일본사토공업주식회사 중앙기술연구소 토목연구부

표 1. 각 지층의 입력 물성값

| 자료 번호 | γ (t/m^3) | E (t/m^2) | ν | C (t/m^2) | ϕ ($^\circ$) | γ (t/m^3) | G (t/m^2) | ν | h (%) |
|-------|-----------------------------|------------------------|-------|------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------|-------|---------|
| 1 | 2.50 | 100,000 | 0.2 | 100,000 | 40 | 2.50 | 41,667 | 0.2 | 2 |
| 2 | 2.00 | 50,000 | 0.2 | 50,000 | 35 | 2.00 | 20,833 | 0.2 | 3 |
| 3 | 1.90 | 5,000 | 0.3 | 2.60 | 37 | 1.90 | 1,923 | 0.3 | 3 |
| 4 | 1.70 | 3,000 | 0.3 | 0.00 | 30 | 1.70 | 1,154 | 0.3 | 3 |
| 5 | 1.70 | 700 | 0.35 | 3.00 | 20 | 1.70 | 259 | 0.35 | 4 |
| 6 | 1.70 | 3,000 | 0.3 | 0.00 | 30 | 1.70 | 1,154 | 0.3 | 3 |

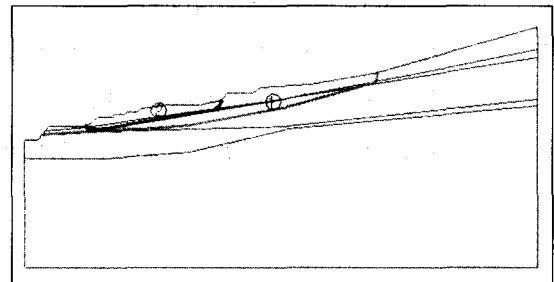


그림 16. 지층의 구분과 계산활동면

동적 F.E.M.에 의한 해석을 하기에 앞서 분할법에 대한 활동안전율을 계산하였다. 대상 활동면은 그림 16에 나타난 Line-1과 Line-2에 대하여 실시하였으며, Line-1은 실제 붕괴가 발생한 면이고, Line-2는 Bishop법과 Tschebotarioff법에 의해 구해진 활동면이다. 이 두 활동면에 대하여 0.12g의 수평진도를 적용하여 활동안전율을 계산하였다.

$$F_s = \frac{R \sum \{ (C l \cos \alpha + W' \tan \phi) / m_s \}}{\sum (W_x + K_b W_y + P a)} \quad (35)$$

여기서, $m_s = \cos \alpha + (\tan \phi' + \sin \alpha) / F_s$,

C^* : 흙의 점착력, (ϕ : 흙의 내부마찰각, l : 분할 절편의 주변장, W : 분할절편의 전중량, W' : 분할절편의 유효중량, K_b : 설계진도, R : 원의 반경(m), α : 분할절편 저면부의 경사각(도), x : 분할절편의 중심과 활동원 중심간의 수평거리(m), y : 분할절편의 중심과 활동원 중심간의 연직거리(m), P : 활동원내의 토괴에 작용하는 수압 (tf/m), a : P 가 작용하는 점과 활동원호의 중심을 통하는 수평선의 연직거리(m)이다.

활동안전율의 계산결과는 그림 16에서와 같은 활동면에 대하여 검토하였다. Bishop법에 의한 원호 활동면으로 가정하고 검토한 것은 평상시에는 최소 안전율이 3.65이지만, 지진시에는 2.05로 나타났다. Janbu법에 의한 비원호활동면으로 가정하고 검토한 결과, 평상시에는 안전율이 3.0 이었지만, 지진시에는 1.66로 나타났다.

가속도 파형을 입력한 지진응답해석을 행하여 활동안전율을 평가하였으며, 해석은 비선형해석으로 실시하였다. 또한 본 강좌에서는 해석에 사용한 지진동의 원파형은 그림 18과 같으나 실제 해석에 적용한 최대 가속도는 117.6 (Gal)로 조정하여 사용하였다. 지반은 탄-완전소성체로 보았고, 각 재료의 강성은 초기강성을 사용하였다. 경계 조건은 측방을 전달 경계(점성경계)로 하고 저면은 완전고정으로 하였다. 본 해석에서 지반과 구조물의 연성진동방정식은 식(36)과 같이 표현할 수 있다.

$$[M] = u[K]u = -m\ddot{y}(t) + T + B_b \quad (36)$$

여기서, $\{u\}$: 절점의 상대변위, y : 지반에서의 입력가속도, $\{m\}$: 각 좌표 성분방향에 대응하는 하중

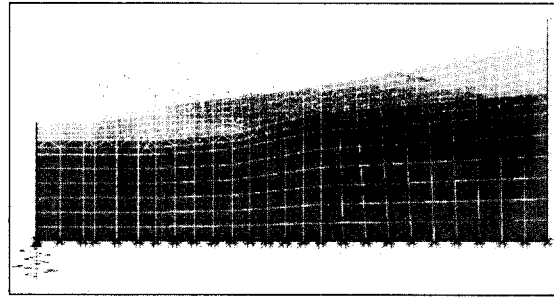


그림 17. 모델링도

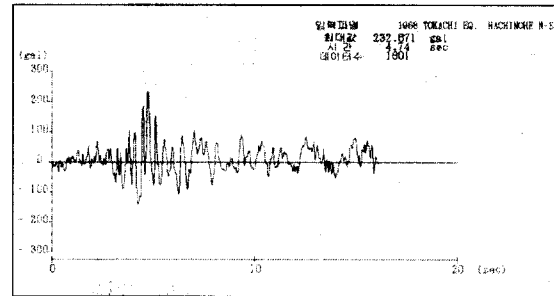


그림 18. 입력 지진파

배수, $[M]$: 질량매트릭스, $\{K\}$ $\{F\}$: 강성매트릭스, $\{F\}$: 자연지반에서의 구속, $\{T\}$: 반무한효과를 표시하는 경계력, $\{B_b\}$: 저면 점성경계력을 나타내고 있다.

단, $\{F\}$, $\{T\}$, $\{B_b\}$, 는 다음 식과 같다.

$$\{F\} = \{G\} \{u\}_r \quad (37)$$

$$\{T\} = (\{R\} + \{L\}) (\{u\} - \{u\}_r) \quad (38)$$

$$\{B_b\} = -C_b (u + u_b) \quad (39)$$

여기서, $\{G\}$: 복소강성매트릭스, $\{R\}$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(우변), $\{L\}$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(우변), $\{C_b\}$: 저면점성 경계 매트릭스이다.



그림 19. 정적해석의 점안전율도

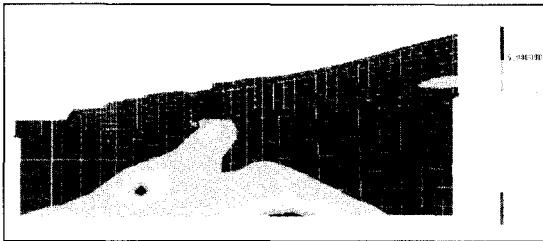


그림 20. 동적해석의 점안전율도

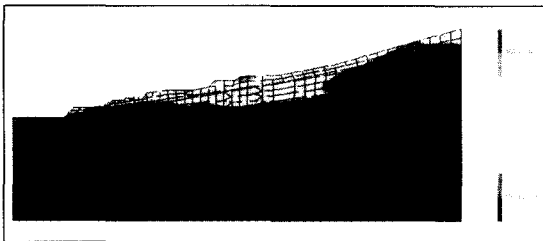


그림 21. 수평방향 가속도 성분

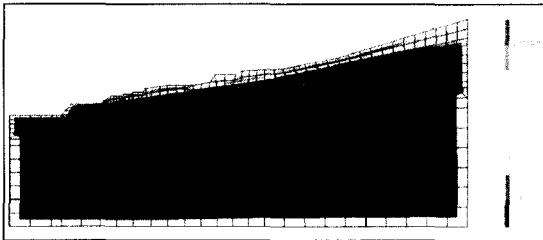


그림 22. 최대전단변형률

그림 22에서 가속도의 수평방향성분 최대값을 보여주고 있다. 맨 윗 층과 세 번째 층이 만나는 부분에서 응답이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 23의 전단변형률의 최대값의 분포에서 보듯이 전체적으로 0.01 ~ 0.07정도의 범위에 존재하며, 상부 표층 부근에서 응답값이 크게 나타나고 있음을

알 수 있다. 그림 22에서 보듯이 입력파가 최대값에 도달할 때 응답값이 최대가 되는 것이 아니고, 최대값 이후의 응답값이 최대가 됨을 알 수 있다.

본 해석에서는 지진시의 사면의 안정성을 평가 하

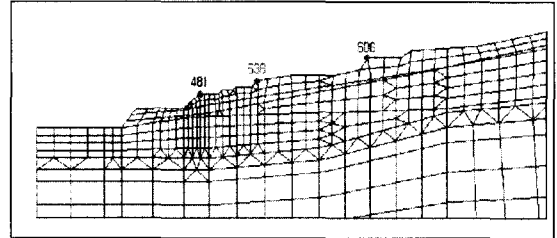


그림 23. 결과 추출 절점

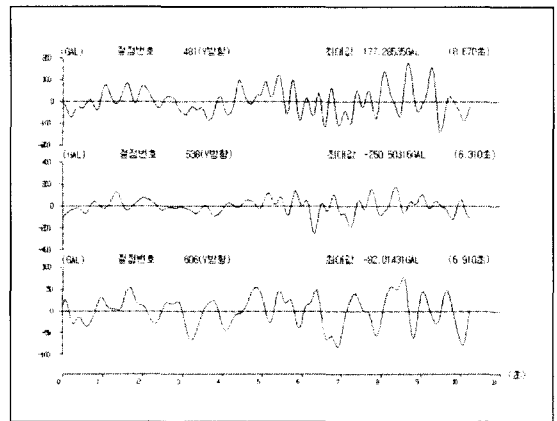


그림 24. 수평응답가속도

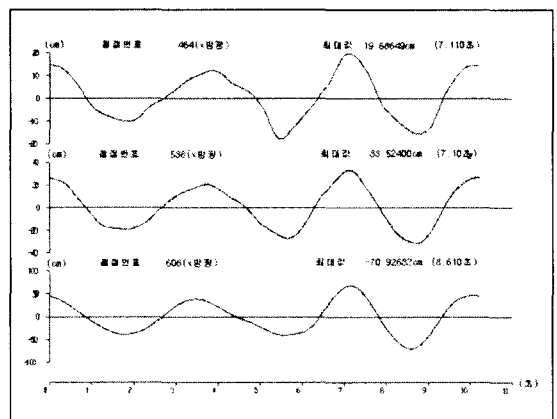


그림 25. 수평응답변위도

기 위하여, 지진력을 고려한 사면활동에 대한 안전율을 계산하였다. 먼저 분할법을 이용하여 최소안전율을 가지는 면과 실제 붕괴가 발생한 면에 대한 안전율을 산정하였으며, 정적FEM해석과 지진 응답해석을 실시하여 분할법에서 계산한 활동면에 대한 안전율과 비교하였다.

분할법에 의해 진도를 적용하여 계산한 결과, ①번 활동면에 대한 안전율은 1.66, ②번 활동면에 대한 안전율은 1.05이었다. 관성력을 적용한 정적 FEM에 의해 산출된 안전율은 ①번 활동면에 대한 안전율은 1.80, ②번 활동면에 대한 안전율은 1.49로 관성력을 적용하여 해석한 정적FEM의 해석 값이 더 크게 산출되었다. 지진응답해석으로 산출한 활동에 대한 안전율은 ①번 활동면이 0.52이고, ②번 활동면은 0.28이었다. 여기서 동적해석에서의 결과에서 나타난 안전율은 정적해석에 의한 결과보다 상당히 낮은 값으로 그 신뢰성에 문제가 있는 것으로 평가된다. 즉, 동적해석에서는 안전율에만 의존하여 구조물의 안전성을 평가하는 것보다 응답가속도와 응답변위 등을 이용하여 종합적 판단이 이루어져야 할 것이다. 또 응답값이 입력파의 최대값에서 가장 위험한 것이 아니라 최대값 이후에서 가장 위험함을 알 수 있었다. 즉, 입력파형에서는 3.7초 후가 가장 큰 힘으로 작용하지만, 응답값은 7.3초에서 최대값을 보여 주고 있음을 알 수 있었다.

4.2 댐

댐의 지진에 대한 안정성을 평가하는 문제는 저수지를 유지하는 제체의 사면붕괴와 지진시에 발생하는 진동에 대한 댐의 내진력으로 크게 분류할 수 있는데, 지금까지 일반적으로 사용되어 오던 댐의 정적 해석방법은 응력해석법, 지진력의 규모 및 동수압, 콘크리트의 허용응력과 댐의 활동 등을 조화있게 고려하였으나, 주로 경험을 토대로 하였다. 그러나 이러한 정적해석방법은 지진시의 댐의 거동을 나타내는데 한계가 있다. 그리고 과거, 지진시에 경미 하지

만 댐에 피해를 받아 왔을 것이다. 그 이유는 정적해석 방법으로 예측한 댐변위가 기본적으로 댐의 지진시의 거동에 대한 실험결과와 일치하고 있지 않기 때문이다. 그러므로 댐의 지진에 대한 안정성을 검토하는 방법으로 댐의 동적응답해석이 이루어져야 할 것이다.

본 해석에 적용된 댐은 우안부는 콘크리트 구조물로 축조된 콘크리트 중력식댐으로 이루어져 있고 좌안부 사력재료로 이루어진 록필댐으로 구성된 복합댐이다. 콘크리트 중력댐에 대한 지진시의 안정성 검토와 사력댐에 대한 지진시의 안정성검토와 함께 콘크리트댐과 사력댐의 지진시 상호작용에 의한 거동 특성을 분석하는 것이 필요하다. 그러므로 본 해석에는 ①록필댐부분과 ②록필댐과 콘크리트댐이 복합되어 있는 부분 그리고 ③콘크리트댐부분과 ④댐 전체의 종단면에 대한 해석결과를 보였다. 본 해석사례는 댐의 내진 안정성을 평가하기 위하여 일련의 작업을 다양한 프로그램을 이용하여 해석을 수행한 예로서 본 댐에 적용한 내진안정성 해석방법과 해석 코드는 다음과 같다.

- 1) 등가정적해석법 - AFIMEX (SANC)
- 2) 수정진도법 - AFIMEX (SANC)
- 3) 동적해석방법 - AFIMEX (SAMBA):FLUSH

본 해석 예에서 동적해석법을 이용한 댐의 내진 해석결과를 나타내었다. 적용한 지진원파형은 Hachi-nohe파이며 가속도의 최대크기는 0.18g로 적용하였다.

그림 26은 필댐의 동적해석을 적용한 단면의 모델

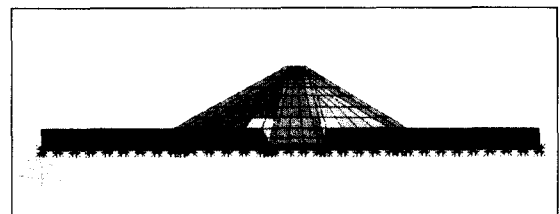


그림 26. 해석 대상 모델

도이다. 댐의 하부 기반암에서 직접적으로 파가 댐의 하부를 향해 입사되는 것으로 하였으며, 하부의 경계를 공학적 기반으로 설정하여 완전 고정으로 하였다. 또한 모델의 좌우측 지반을 에너지전달경계로 설정하였다. 위의 단면에서 최대 가속도 0.18g를 적용하여 동적해석법을 수행하였을 때의 록필댐 부분의 시간에 따른 변위와 가속도결과를 그림 29, 30과 같이 예시하였으며 표 2는 진도법과 수정진도법을 사용한 댐의 변위결과를 동적해석에 의해 산출된 최대변위와 비교한 것이다.

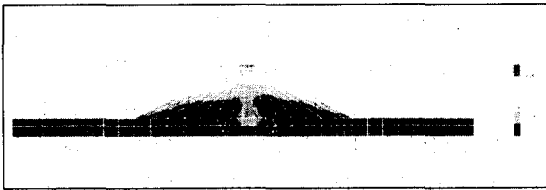


그림 27. 수평방향 응답가속도의 분포도

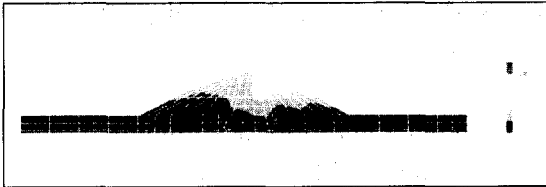


그림 28. 수직방향 응답가속도의 분포도

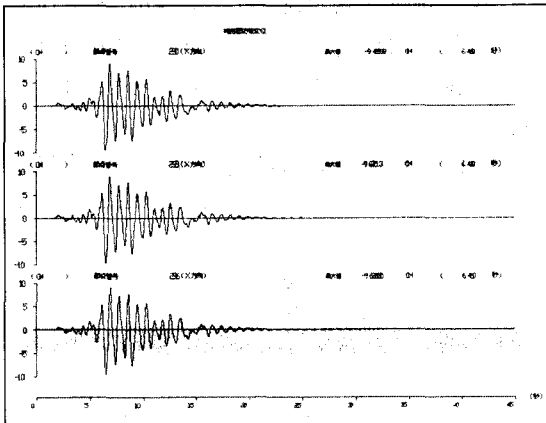


그림 29. 수직방향 응답가속도의 분포도

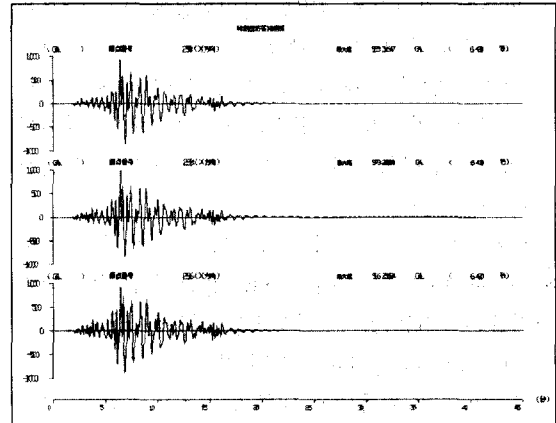


그림 30. 응답가속도

그림 27과 그림 28의 해석결과는 시간이력에 따른 동적해석을 하였을 때 임의의 시간에 록필댐에서 발생한 최대가속도를 보였다. 이 결과는 동적해석에 의한 록필댐의 가속도 분포의 전형적인 경향을 보이고 있다. 그림 27, 28과 같이 록필댐에서는 일반적으로 댐의 상단과 표면에서 가장 큰 응답가속도와 변위가 발생하는데 이것은 댐의 중앙부가 높은 압력으로 구속되어 있기 때문인 것으로 생각된다.

이때 같은 단면의 댐의 천단부에서 발생한 시간에 따른 응답변위와 응답가속도를 그림 29, 30에 나타내었다. 이 결과에 의하면 댐의 천단부에서 발생한 시간에 따른 변위와 가속도가 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 2. 해석결과(변위)

| 위치 | 사면 기울기 | 인수 계수 | 진도법 | | 수정진도법 | |
|--------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0.12g | 0.18g | 0.12g | 0.18g |
| 록필댐부 | -0.58 | 0.74 | 10.60 | 60.18 | -6.42 | -9.63 |
| 월림부 | -1.82 | -1.82 | 4.74 | 58.71 | -4.59 | -6.89 |
| 콘크리트담부 | -- | 0.18 | 0.24 | 0.50 | 1.32 | 1.98 |

콘크리트댐의 경우에는 댐과 저수가 접하는 부분에서 충분히 완만한 경사를 확보하고 있지 못하는 경우가 일반적이다. 그러므로 댐의 동적 해석을 수행하

기 위해서는 동적해석시에 물과 구조물의 상호작용에 대한 고려가 필요하게 된다. 즉 동수압에 대한 고려가 있어야 한다. 물과 구조물의 상호작용이 고려되는 동적해석코드의 경우에는 물요소를 직접입력하는 방법을 쓰게 되나 물에 의한 동적효과가 직접적으로 구현되지 않는 동적해석코드의 경우에는 동수압에 의한 영향을 무시하거나 Westaatgard의 방법에 기초하여 동수압을 부가질량으로 물에 접하는 요소에 부가하는 방법이 일반적이다. 본 해석에에서도 이 방법을 사용하였다. 그림 31, 32의 해석결과에서 댐 구조물의 동적 해석에서 일반적으로 보이는 것과 같이 댐의 상단부에서 최대가속도가 발생하는 경향을 보이고 있다.

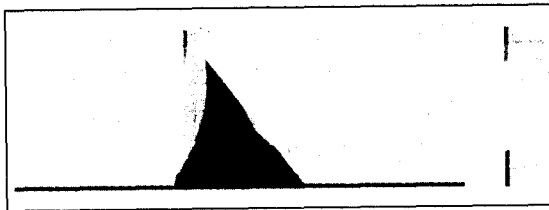


그림 31. 수평방향 응답가속도의 분포도

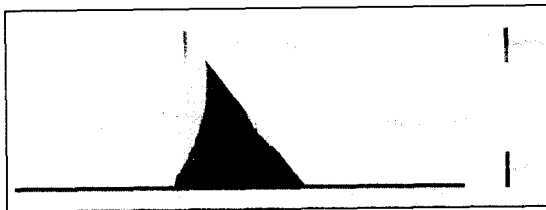


그림 32. 수직방향 응답가속도의 분포도

록필댐과 콘크리트 중력식댐이 복합되어 축조된 댐의 경우, 록필댐의 지진시의 거동과 콘크리트 댐의 지진시의 거동이 상이한 양상을 보이므로 록필 댐 부분과 콘크리트댐 부분이 접하는 부분에 대한 해석이 필요하게 된다. 본 해석의 경우 3차원 지반변형해석 프로그램을 이용하여 록필댐과 콘크리트댐이 만나는 부분을 3차원적으로 구현하여 유사정적해석에 의한 해석을 수행함과 동시에 댐의 종단면에 대한 동적해석을 하여 두 결과를 비교하였다.

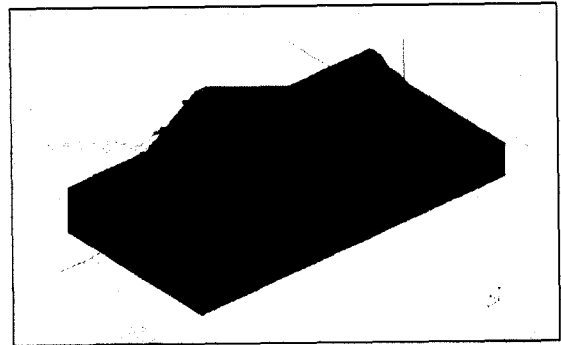


그림 33. 3차원해석 모델링

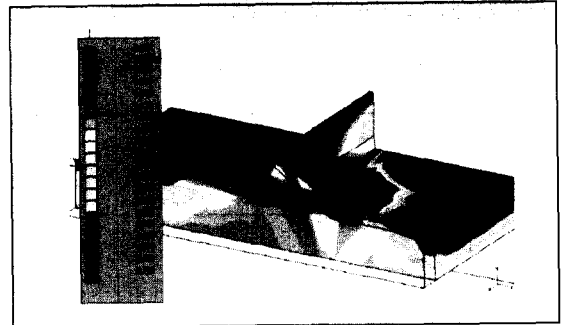


그림 34. 해석결과(x방향 응력도)

그림 33은 3차원적으로 복합댐을 모델링한 것을 보인 것이다. 그림 34는 3차원 지반변형 해석에 의한 응력결과를 이용하여 복합댐의 안전율을 보인 것이다. 해석결과에 의하면 상부의 사석 재료는 지진력의 적용에 의해 낮은 안전율을 나타내고 있지만 콘크리트댐의 경우는 높은 안전율을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 댐의 종단면에 대한 해석결과에 의하면 댐의 횡단면에 대한 해석결과와 유사한 값을 나타내고 있는 것으로 나타났다. 즉 복합댐의 경우에 댐을 구성하고 있는 댐의 형식에 따라 횡단면에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 댐의 형식을 모두 적용한 종단면을 해석하여 그 결과를 비교하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 2차원 해석으로 3차원의 효과를 구현하기 위하여 그림 35와 같이 종단으로 콘크리트 부분과 흙부분을 복합으로 모델링하여 해석하여 보았다.

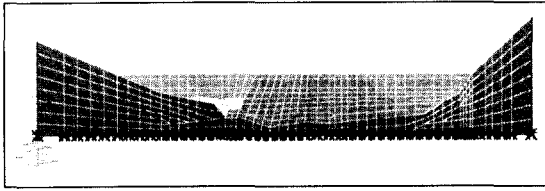


그림 35. 2차원해석 모델링

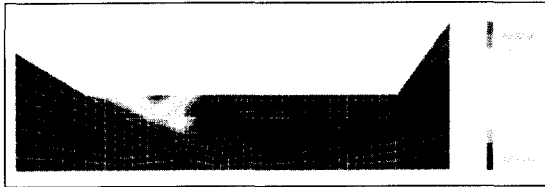


그림 36. 수평방향 응답기속도의 분포도

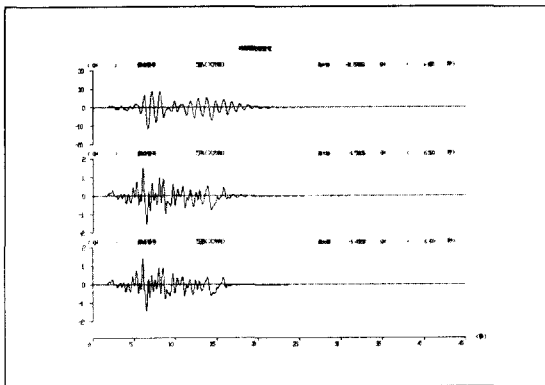


그림 37. 수평방향 응답변위

4.3 항만 구조물

4.3.1 유효응력해석

일반적으로 유효응력 해석에서는 중력 작용에 의한 지반-구조물계에 작용하는 응력상태를 구하고, 지진시에는 지진의 관성력과 지반의 액상화에 의한 영향을 더한다. 지반-구조물계의 유효응력 해석은 이들의 영향에 의한 시간에 따라 변화하는 역학적 현상에 바로 축일(逐一)해석에 의한 방법이 있다. 이 방법은 물에 포화된 흙을 입자골격과 간극수의 2가지의 연립방정식에 기초를 두고, 이것을 유한 요소법 또는 차분법을 사용하여 수치해석적인 해석도 있으며 이

것을 위한 수치해석 기술에 대해서는 이미 확정적인 단계에 있다. 그러나, 입자골격의 응력-변형을 관계를 어떻게 모델화 하는 것에 대해서는 아직도 여러 가지 제안이 있으며, 이 모델화의 우열이 유효응력 모델의 적용성의 우열을 좌우하는 결과로 된다. 지진시에는 지진에 의한 동적인 응력 변화 및 과잉간극수압의 상승에 따라 이것들의 초기응력상태서 응력 상태가 변화하고, 이것에 따라 흙의 변형이 발생 한다. 지반-구조물계의 변형은 이와 같이 흙의 변형에 대응하여 발생하는 것이 있다. 앞에서 논한바와 같이 유효응력해석에 있어서는 이와 같이 시각을 더해 변화하는 지반-구조물계의 역학적 상태를 축일해석하는 것이 있고, 그 잔류변형, 잔류내력도 이것들의 해석 결과의 일부로 구해진다.

간극수압의 영향을 고려한 해석을 수행하기 위해 다음과 같은 평형방정식, 적합조건식과 함께 간극수압이 고려되는 운동방정식과 간극수의 평형방정식 및 연속방정식을 만족하여야 한다.

$$\text{평형방정식: } \sigma_{ij,j} + \rho_b g_i = 0$$

$$\text{적합조건식: } \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i})$$

$$\text{운동방정식: } (\sigma'_{ij} - \sigma_{ij} - \delta_{ij}^{st} (p - p^{st}))_{,j} = \rho_t u_{i,t}$$

$$\text{간극수 평형방정식: } p - p^{st} = -\left(\frac{k_t}{n}\right) \epsilon_{ij}$$

(비배수조건)

$$\text{연속방정식: } \Delta q = 0$$

여기서, σ_{ij} : 응력텐서, ρ_b : 밀도, g_i : 중력가속도, n : 간극률, ϵ_{ij} : 변형률텐서, u_{ij} : 변위텐서, p : 간극수압, Δq : 유량변화, p^{st} : 정수압, ρ_t : 전체밀도, k_t : 투수계수이다.

4.3.2 설계지진하중

지진발생시 구조물의 거동에 영향을 미치는 지반 거동의 주요 요소는 지진의 강도, 주파수특성, 그리고 지속시간등이다. 관측점에서 이러한 지진의 특징은 단층의 진행, 지진파의 진행경로 그리고 국부적인 지반상태에 따라 달라진다. 왜냐하면 이러한 요소들은 과거의 많은 가속도 시간이력의 비교를 통하여 지진시 구조물의 거동을 결정짓는 중요한 역할을 했음을 알 수 있기 때문이다. 진동의 강도는 일반적으로 최대 가속도를 이용하여 나타낸다. 그러나 이러한 하나의 요소만으로는 구조물에 영향을 미치는 지반진동이 전체적인 에너지를 표현하기에 불충분하다. 이러한 이유로 RMS(root-mean-square) 가속도 또는 주기범위에서의 스펙트럼 크기를 이용하여 지진의 진동에너지를 표현하게 된다. 지반진동의 주파수 특성은 Fourier 스펙트럼 또는 좀 더 일반적인 경우 응답스펙트럼을 이용하여 특징 지을 수 있다. 강진시에 비탄성 거동을 보이는 구조물의 경우 지반진동의 지속시간은 특히 중요한 요소로 작용한다. 이러한 구조물에서 비탄성 거동과 손상이 발생할 가능성은 지진시의 강한 진동의 진동수에 크게 의존하기 때문이다.

4.3.3 모델링(2D-FREQ;FLIP(유효응력해석))

본 강좌에서 이용한 단면은 ○○지역 안벽 배후 매립지를 대상으로 연장 170m를 해석 대상범위로 하였다. 해석 대상영역이 좌우 경계에는 반무한으로 이루어진 수평성층지반(자유지반)으로 설정하여 지진 응답을 고려하고, 점성(단파)을 이중으로 파동투과 경계로 하였다. 본 해석에서는 hachinohe파를 사용하였다. 본 해석사례는 (그림 38)에서와 같이 케이슨이 설치된 안벽이다. 케이슨의 내부는 좌측에는 물이, 그리고 우측에는 모래가 채워져 있다. 그리고 배면에 말뚝이 2본 설치되어 있는 상태이다.

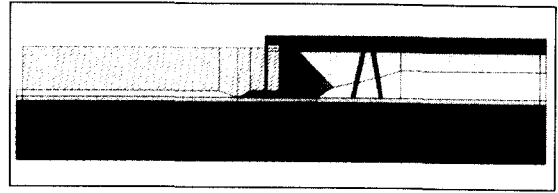


그림 38. 해석 대상 모델링

4.3.4 해석결과

느슨한 포화모래는 반복강진하에서 전단강도를 상실하여 액상화하게 된다. 따라서 지하수위가 높은 모래지반에서의 액상화현상은 강한지진시에 발생한다. 모래의 전단강도는 연직응력에 거의 비례하므로 모래의 전단저항력은 연직응력이 작은 지반표면부에서는 연직응력이 큰 지반심부 보다 작다. 또 연직응력이 큰 심부에서는 전단저항력이 크다.

지진동에 의한 지반내 전단응력은 지표면부에 비교적 가까운 곳에서 커지는 경향이 있으며 이때 연속적인 지진동과 함께 점차 지반의 심부로 이동하며 대개 액상화는 먼저 지표부가 가까운 곳에서 일어난다. 한편 이미 액상화한 위층의 모래는 조밀해져서 침하하며 공극수압은 정상으로 돌아와서 액상화는 끝나게 된다.

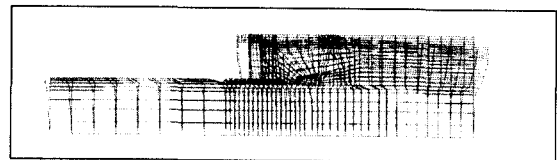


그림 39. 유효응력해석에 의한 변위도

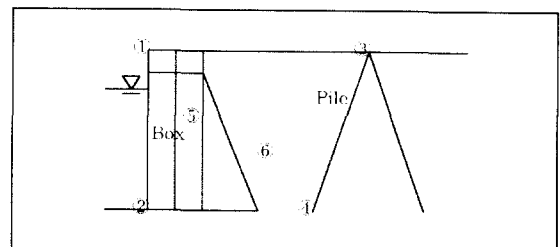


그림 40. 결과 산출 위치점

(1) ①번 위치에서 응답변위 및 응답가속도

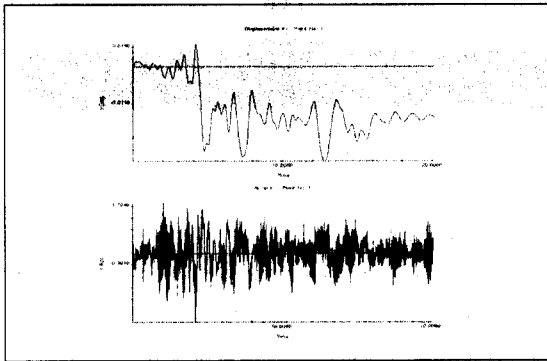


그림 41. 수평성분(육상쪽이 양의 방향)

(2) ②번 위치에서 응답변위 및 응답가속도

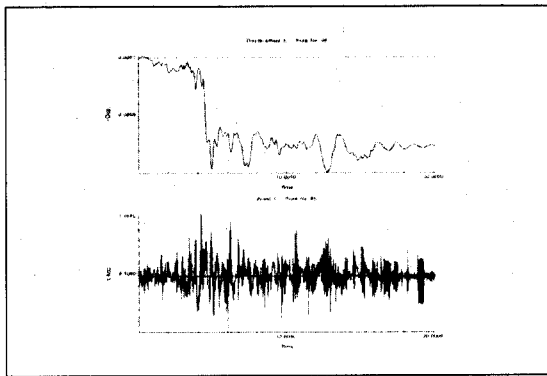


그림 42. 수평성분(육상쪽이 양의 방향)

(3) ③번 위치에서 응답변위 및 응답가속도

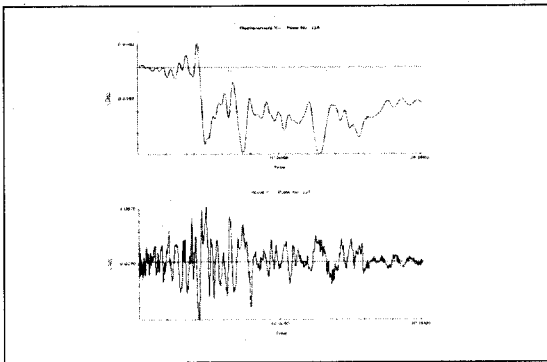


그림 43. 수평성분(육상쪽이 양의 방향)

(4) ④번 위치에서 응답변위 및 응답가속도

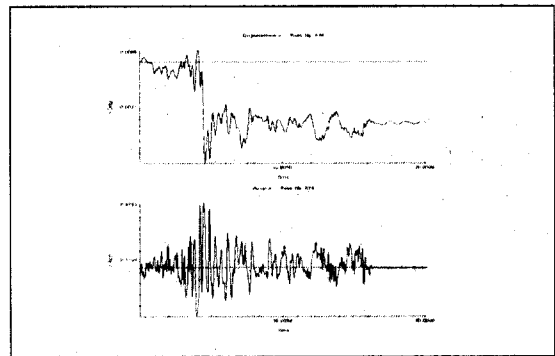


그림 44. 수평성분(육상쪽이 양의 방향)

케이슨 및 파일의 변위는 상하 수평으로도 다음 그림 41 ~ 44에 나타낸 것과 같이 가진(加振)과 동시에 천천히 증가한다. 케이슨에서의 가속도가 최대가 되는 시각에 4~5초 근처에서 변위의 증가는 뚜렷하게 나타났다.

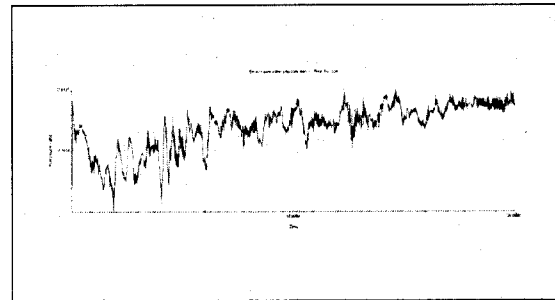


그림 45. ⑤번 위치의 파일간극수압비의 시각력

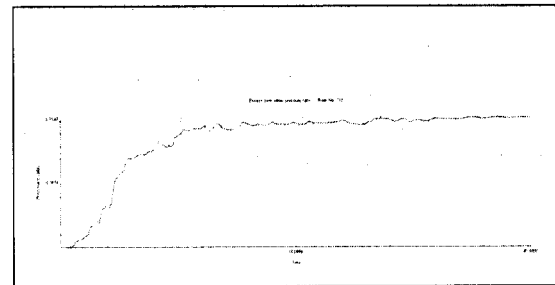


그림 46. ⑥번 위치의 파일간극수압비의 시각력

4.3.5 AFIMEX(SAMBA;FLUSH(전응력)) 해석결과

(1) ①번 위치에서 응답가속도 및 응답변위

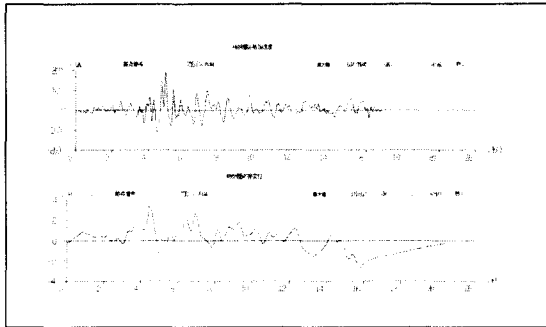


그림 47. 수평성분(육상쪽이 (+)방향)

(2) ②번 위치에서 응답가속도 및 응답변위

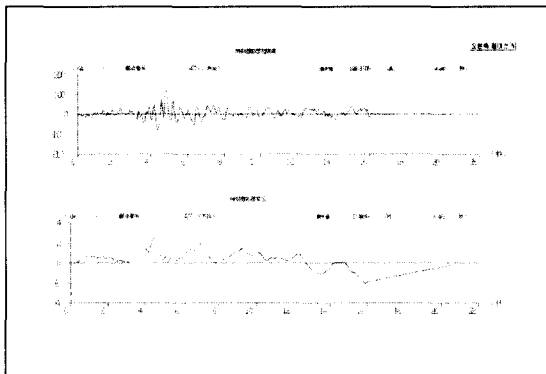


그림 48. 수평성분(육상쪽이 (+)방향)

(3) ③번 위치에서 응답가속도 및 응답변위

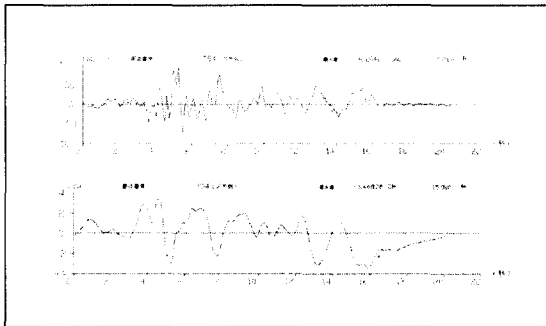


그림 49. 수평성분(육상쪽이 (+)방향)

(4) ④번 위치에서 응답가속도 및 응답변위

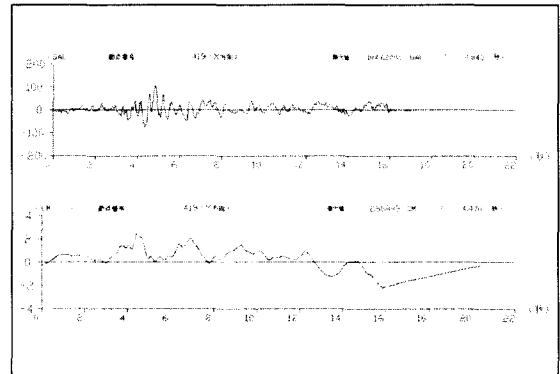


그림 50. 수평성분(육상쪽이 (+)방향)

4.3.5 액상화에 대한 해석결과

유효응력해석에서 과잉간극수압비는 케이슨 내의 속채움 모래의 경우, 가진(加振)과 동시에 과잉간극수압비가 일시적으로 증대하였다가 감소한 후 2초 내외에서 다시 증가하는 것으로 보여진다. 케이슨 직배면의 매립지와 파일의 중간부근에 과잉간극수압이 서서히 증대되는 것이 보여진다. 케이슨에서 떨어진 파일이 설치된 위치에서는 과잉간극수압비가 0.8 정도로 액상화하지는 않는 것으로 나타나고 있다. 하지만 전응력해석에서는 FL치가 파일이 설치된 부근에서 0.5이하의 값을 가지는 것으로 나타나 액상화하는 것으로 나타나고 있다.

전체적인 경향에서는 전응력해석이나 유효응력 해석에서 비슷하게 나타나지만, 그 값에서는 전응력에서의 결과가 유효응력해석에 비해 과대평가 되는 것으로 나타나고 있다.

(1) 유효응력 해석결과로 얻은 과잉간극수압비

$$(1 - \sigma'_m) / \sigma'_{mo} \quad (40)$$

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

(2) 액상화 안전율 (FL)

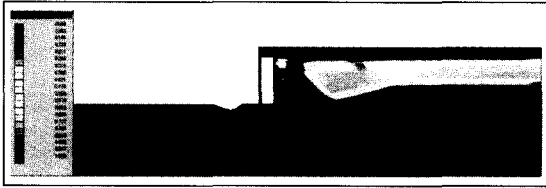


그림 51. 최대 과잉간극수압비

액상화안전율은 다음 식과 같이 나타내어 진다.

$$FL = \frac{\tau_i / \sigma'_v}{\tau_d / \sigma'_v} \quad (41)$$

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

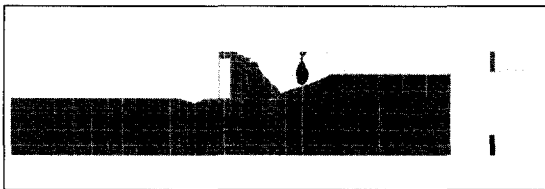


그림 52. 액상화 발생에 대한 안전율

4.4 원자력 구조물

원자로건물의 기초지반, 원자로건물 주변의 사면 안정성 평가에 있어서는 지반조사 및 시험결과를 기초로 하여 적절한 지반모델을 설정하고, 필요에 따라 활동면법 등의 관용법에 의한 해석, 유한요소법 등에 의한 정적 및 동적 해석을 실시 하였다. 하지만 외국 의 경우를 보면 지진응답해석을 모든 경우에 실시하 는 것은 아니며, 탁월한 이방성 혹은 현저한 불균질 성이 확인된 경우에는 응력적인 불균형이 발생할 가 능성이 있는 경우, 즉 연약대층에 대한 지반미끌림, 지지력, 침하 등을 상세히 검토하는 것이 필요한 경

우, 그리고 주변 사면의 경우에는 사면의 비탈 바닥 면과 원자로 건물의 이격거리가 약 50m 이내인 경 우, 또는 사면 높이의 약 1.4 배 이내의 사면인 경우 에 고려 된다. 지중 구조물의 지진시 안정성은 주변 지반의 안정성에 크게 의존하게 된다. 지중 구조물의 안정성이 손상되는 주요한 요인은 지하수나 지진시 액상화에 의한 부력, 양압력 등이다. 상기와 같은 이 유로 장대 구조물에서는 지진시 구조물 각 부분에서 상대 변위를 발생시키며 특히, 지반상태의 급변부나 형상, 강성이 다른 2개 구조물의 접속부에는 큰 상대 변위가 발생하기 쉽고 또한 상대 변위의 평가가 필요 하게 된다.

4.4.1 안정성 검토의 개요

(1) 안정성 해석

한계평형법, 정적해석, 동적해석의 순으로 기초지 반의 안정성을 검토하며 일본의 경우는 원칙적으로 각 해석단계의 안전계수가 기준치를 만족하는 경우 다음 단계의 해석은 수행하지 않는다.

(2) 관용법만으로 해석을 완료할 수 있는 근거

안정성 평가는 한계평형법, 유한요소법의 정적 및 동적 해석법 등의 순차적 해석을 의미하고 있으나, 각각의 단계를 만족할 경우 그 다음 단계는 생략해도 무방하다. 한계 평형법에 의한 전단력 혹은 모멘트 평형법에 의한 안전율과 유한요소법 즉, 점 안전율에 의한 값의 비교에 있어서 일반적으로 동일한 범위에서 값의 분포를 확인할 수가 있는데 이런 이유에서도 한계평형법의 최소 안전율의 설정값을 크게 한다면 다음 단계로 이행하지 않아도 무난하다고 본다.

(3) 활동에 대한 안정성 평가 기준치

- 한계평형법 = 2.0
- 정적FEM해석 = 2.0
- 동적FEM해석 = 1.5

4.4.2 모델링

안정성 해석을 위한 모델링 범위는 원자로 구조물 중심부를 기준으로 좌우 285m 그리고, 기초하부로는 160m 지점 까지 포함시켰다. 상부 구조물의 하중은 원자로와 보조건물의 경우 5.0 kg/cm^2 , 그 외의 건물은 3.0 kg/cm^2 을 적용하였다.

본 사례에서 실시한 한계평형법에서는 Bishop법에 의한 원호 활동에 대한 검토를 먼저 수행하였고, 복합활동면에 대해서는 FEM결과를 근거로 활동면을 결정한 후 복합활동면법인 Janbu법으로 안전계수를 산정하였다. 이상의 두 방법에 의해 최소안전율을 산출한 후, 대상 활동면에 대하여 진도범 (수평진도=0.2g, 연직진도=0.1g)를 이용하여 지진시의 안전율을 산정하였다.

지진계수 kh와 관성력의 방향을 입력하여 관성력을 고려한 해석을 수행함으로써 등가정적 해석법을 적용하였으며, 이때 수평진도 0.2g, 연직 진도 0.1g를 적용하였다.

경계조건은 수직방향의 관성력을 고려하는 경우에는 좌우측경계에서는 수평고정, 연직 로울러로 하고, 바닥면에서는 완전고정으로 하였다. 또 수평방향의 관성력을 고려하는 경우에는 좌우측경계에서는 수평 로울러, 연직 고정로 하고, 바닥면에서는 완전고정으로 하였다. 해석단계는 1단계 - 초기 응력 해석, 2단계 - 구조물 기초의 굴착, 3단계 - 구조물 자중과 수직방향의 관성력 고려, 4단계 - 수평방향의 관성력 고려의 순서로 해석을 실시하였다.

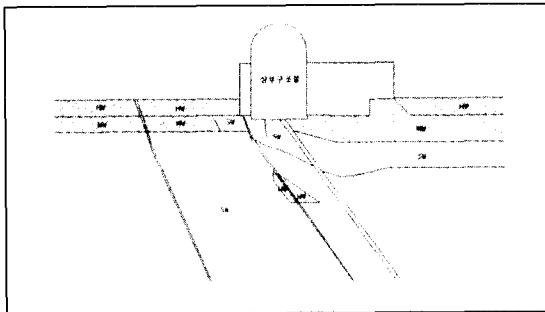


그림 53. 해석대상 지반의 개략도

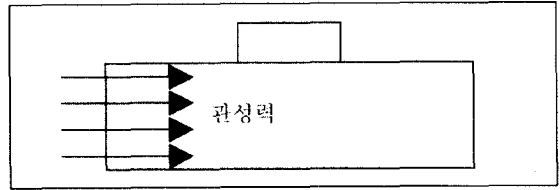


그림 54. 관성력의 고려 방법

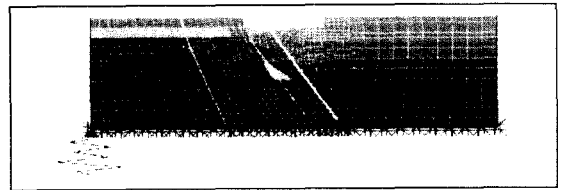


그림 55. 지진응답해석시 모델링도

4.4.3 해석 결과

(1) 유사정적해석 결과

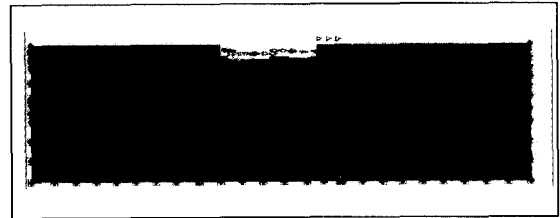


그림 56. 유사정적 해석에 의한 변위 결과도

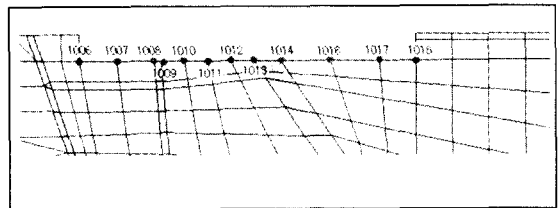


그림 57. 변위 산출 절점

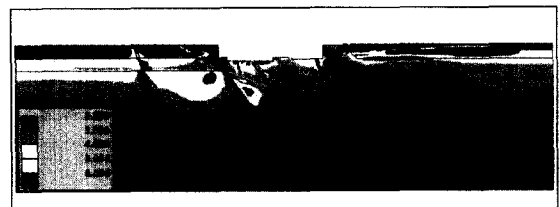


그림 58. 안전율 결과도

표 3. 유사정적 해석에 의한 절점 변위 (mm)

| 번호 | 절점 좌표 | | 변 위 | |
|------|---------|---------|-------|------|
| | x변위 | y변위 | x변위 | y변위 |
| 1007 | 227.669 | 142.000 | 19.49 | 2.88 |
| 1009 | 235.674 | 142.000 | 19.33 | 4.02 |
| 1010 | 239.975 | 142.000 | 18.71 | 3.62 |
| 1012 | 244.919 | 142.000 | 18.52 | 3.69 |
| 1014 | 251.792 | 142.000 | 18.99 | 5.67 |
| 1016 | 256.933 | 142.000 | 16.12 | 4.20 |
| 1017 | 266.573 | 142.000 | 15.98 | 2.60 |
| 1018 | 273.000 | 142.000 | 15.50 | 2.28 |

표 4. 안전율 산정 결과

| 번호 | 한계평형해석 | | FEM해석 |
|----|--------|-----|-----------|
| | 복합활동 | | |
| | 평상 | 지진 | |
| 3 | 9.6 | 5.8 | - |
| 4 | 8.6 | 5.5 | - |
| 5 | 6.8 | 4.5 | - |
| 6 | 4.5 | 3.0 | 3.0 ~ 4.0 |
| 7 | 9.4 | 5.9 | - |
| 8 | 8.3 | 5.4 | - |
| 9 | 6.4 | 4.4 | - |
| 10 | 4.0 | 2.8 | 3.0 ~ 4.0 |

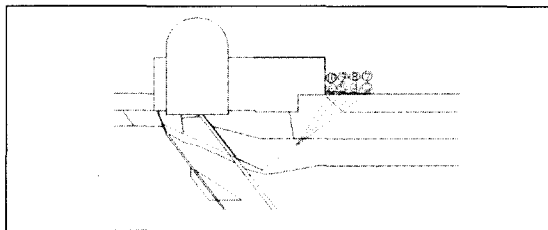


그림 59. 활동 예상면

FEM해석에서 안전율이 3.0 ~ 4.0정도 산출되었으나 한계평형에서 등방성으로 가정하여 원호 활동으로 계산한 경우 3.2이 산출되었으며, FEM 해석에서 산출된 활동면을 고려하여 한계평형 해석을 행한 경우는 최소안전율이 4.0으로 산출되었다. 또 지진력을 고려한 경우도 각각 3.0, 2.8로 기준안전율(2.0)을 초과하고 있다.

(2) 지진응답해석 결과

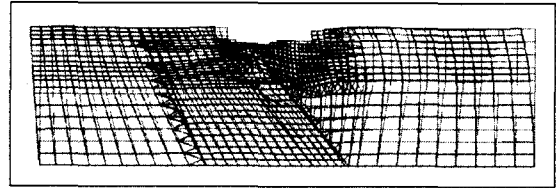
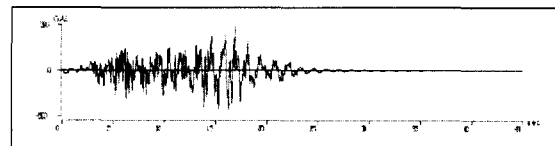


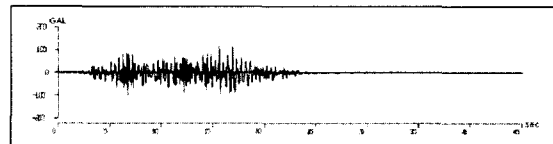
그림 60. 최대변위도

응답결과에서는 X방향 최대가속도와 Y방향 최대 가속도는 원자로 기초바닥의 가운데 단층대와 근접한 좌측에서 가장 크게 발생하였다. 그리고 응답변위는 원자로 기초바닥의 좌측 끝 지점에서 가장 크게 발생하였다. 입력한 EW Acceleration 크기의 X방향 응답가속도가 최대 484.170gal로 입력 가속도의 2.5배 정도 증폭된 응답가속도가 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 단층대의 약간 좌측에서 발생한 값으로 단층대에서 응답값 483.383gal과 거의 같은 값이다. 즉 단층대와 그 주변에서 큰 응답값을 나타내고 있다고 할 수 있다. 하지만 암반에서는 450gal정도로 단층대의 응답값과 약간의 차이는 나타나지만 극단적인 차이는 없는 것으로 단층대의 영향은 크지 않은 것으로 평가할 수 있다.

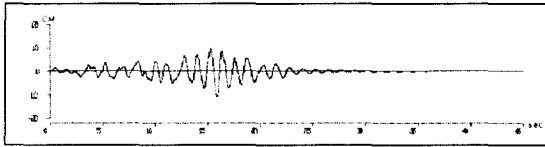
절점번호 1013 X방향 최대가속도
472.523 gal(16.920 sec)



절점번호 1013 Y방향 최대가속도
-116.218gal(6.700 sec)



절점번호 1006 X방향 최대변위
-10.683 cm(15.900 sec)



절점번호 1006 Y방향 최대변위
-0.718 cm(16.405 sec)

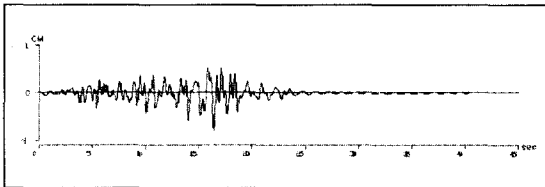


그림 61. 지진 응답해석 결과

지진응답해석에서의 결과는 유사정적 FEM해석에서와는 달리 우측보다는 좌측에서 더 큰 응답치를 나타내는데 이것은 여러 개의 단층대(좌측으로 두 개의 큰 단층대가 발달하였고, 그 사이에 소규모의 단층이 있음)가 존재하는데 대한 영향이라고 판단된다. 이 영향으로 단층대의 응답치가 높으므로 그 주변의 암반에서도 영향이 전달되는 것으로 평가된다. 같은 원인으로 변위 또한 좌측에서 크게 발생하며, 좌측 끝점에서 최대 변위가 발생하였다. 이것은 유사정적에서의 결과와 상이한 경향을 보이는데, 지진응답 해석에서의 변위결과는 유사정적해석에서보다 더 작은 값을 나타내지만, 단층대의 영향이 유사정적 해석보다 더 크게 작용하는 것으로 나타난다. 그리고 단층대 때문에 변위가 불규칙하게 발생 하지는 않는 것으로 볼 때, 지진응답해석에서는 단층대의 영향은 전체 지반의 응답에 큰 영향은 없는 것으로 평가된다. 그리고 응답결과를 보면 입력 지진파의 지속시간은 24 초 정도인데 응답 결과는 30초 이상까지 나타나고 있다. 이것은 진동이 끝난 후에도 지반의 변형은 계속 되고 있음을 알 수 있다.

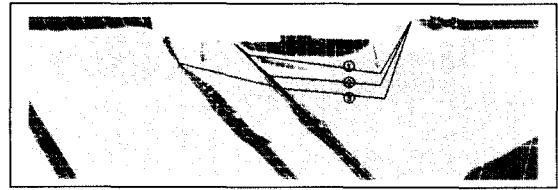


그림 62. 지진응답해석에 의한 안전율도

그림 62의 안전율도에서 보듯이 기초바닥 부분의 표면 근처에서 절리대를 따라 안전율이 낮은 영역이 나타나고 있다. 그리고 확대 그림에서 보듯이 활동예상선을 결정할 수 있는데 이에 대한 안전율은 4.0 ~ 4.5정도의 범위가 된다. 위의 예상선에 대한 한계평형해석은 앞의 결과에서 이미 언급하였으며, 그 결과는 ①의 예상선에 대해서는 안전율이 10.5, ②의 예상선에 대해서는 안전율이 4.0, ③의 예상선에 대해서는 안전율이 3.0이었다.

4.5 지중 박스구조물

지중에 매설되어진 구조물의 지진시 거동은 지반의 변위에 지배되고, 관성력에 대한 영향은 비교적 적기 때문에 이들의 지진시 거동을 평가하기 위한 방법으로 응답 변위법이 주로 사용되고 있다. 응답 변위법의 적용에 있어서는 우선 구조물의 지진 하중을 자연 지반의 지진시의 변위를 1차원 파동전달해석 혹은 FEM 등의 동적 해석에 의해 계산하고, 그것을 지반스프링을 개재시킨 구조물에 정적으로 작용시키는 것에 의해 단면력 등을 계산한다. 부재 관성력과 동수압은 필요에 따라 정하고, 시간에 관계없이 일정한 크기로 정적인 상태로 작용시킨다.

FEM과 집중질량계를 사용한 해석을 수행한다면, 지반의 변형률, 구조물과 지반의 상대변위 그리고 구조물의 진동을 정확히 구하는 것이 가능하다. 그러므로 구조물이 불균질 지반이나 지층이 급변하는 곳에 위치하여 상대변위의 검토가 중요하다고 판단되는 경우나 새로운 형식의 구조물로 그 진동특성을 간단히 추정하기 어려운 경우에는 구조물과 지반을 일체

로 하여 FEM 등으로 해석하는 것이 좋다.

4.5.1 지중 구조물의 내진 설계법

(1) 해석 방법

지중 구조물의 지진시 거동에 관한 해석적 연구는 파동론 등에 의한 연구, 유한 요소법, 다질점계 진동 모델에 의한 연구로 분류할 수 있고, 매설관로와 같은 선형 지중 구조물에 관해서는 파동론을 이용한 해석이 많다. 해석은 탄성영역으로 한정되지만 매설관과 주변지반의 동적 상호작용을 규명하는 데에는 유용하며, 이들의 연구로부터 매설관로는 대개 주변지반과 같은 모양으로 진동하는 것, 신축변형에 의한 변형률이 곡선변형에 의한 변형률보다 탁월한 것 등 실물의 매설관로에서 지진관측으로 얻어진 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 또한, FEM을 이용하는 경우, 모델의 경계조건의 처리가 가장 큰 문제중의 하나이며, 동시에, 해석하려고 하는 지중 구조물보다 충분히 떨어져 있는 주위 지반을 포함하여 해석 영역을 설정하는 것이 중요하다.

(2) 내진 설계법과 설계 지진 외력

지중구조물의 내진설계법으로는 진도법, 응답변위법, 동적응답 해석법이 있지만 일반적으로는 가장 쉽게 접근되는 방법이 진도법과 응답 변위법이다. 진도법은 횡단면의 내진계산에 적용하는 경우가 많으며 구조물위의 상재 통과와 지진시의 토압을 외력으로 고려한다.

지반변위에 의한 내진설계법 즉, 응답변위법은 최근 지중구조물의 내진설계에서 많이 사용되고 있다. 응답변위법을 적용하는 경우에 큰 문제는 지반변위를 어떻게 입력할 것인가 하는 것이다.

수평면내에서는 정현파형 및 표층지반 연직면 내에서는 1/4 정현파형을 사용하고 있다. 변위분포는 표면과의 전달 또는 실체과의 경사 입사를 가정하고 실무 설계를 위해서는 간략화 작업이 필요하다. 즉, 지반변위의 연직방향 분포는 다음 식과 같이 나타낼

수 있다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v \cdot T_s \cdot K_h \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (42)$$

여기서, $U_h(z)$: 지표면에서의 심도에서의 수평방향의 변위진폭(m), T_s : 표층지반의 고유주기(s), K_h : 내진계산상의 기반면에 대한 설계수평진도, H : 표층지반의 두께, S_v : 단위진도당 응답속도이다.

4.5.2 해석 모델링

각 해석법에 대한 해석코드는 다음과 같으며, 모델링은 그림 63, 그림 64, 그림 65과 같이 실시하여 보았다.

- ◆ 응답변위법, 응답진도법 = GALKINS
- ◆ 등가정적해석법 = AFIMEX(sanc)
- ◆ 동적해석 = AFIMEX(samba)

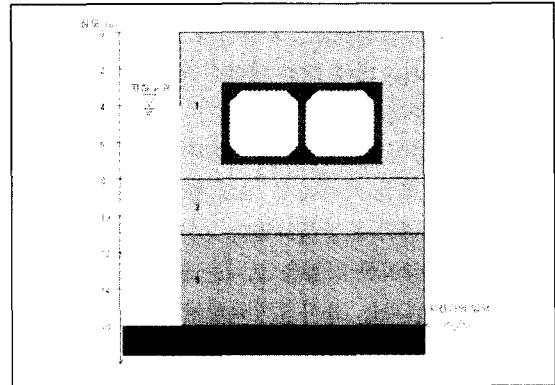


그림 63. 응답변위법의 모델링도

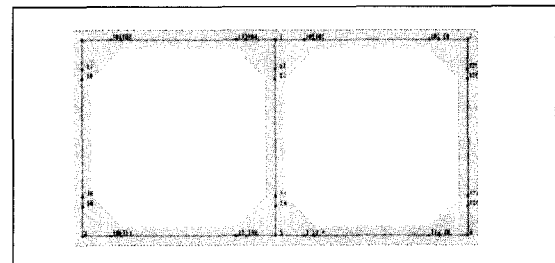


그림 64. 응답변위법의 구조물의 모델링도

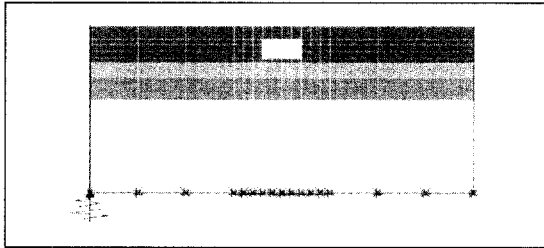


그림 65. 동적해석에 적용한 모델도

해석에 적용한 물성값은 다음 표와 같다.

표 5. 응답변위법에 적용한 지반정수

| 토층 분류 | 감쇠계수 초기치 | 단위체적 중량(γ/m^3) | 포아 송비 | 점착력 (γ/m^2) | 내부마찰각 ($^\circ$) |
|----------|-------------|----------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|
| 매립토 | 0.03 | 1.75 | 0.4 | 0 | 20 |
| 풍화토 | 0.03 | 1.80 | 0.35 | 0 | 30 |
| 풍화암 | 0.03 | 2.20 | 0.25 | 0 | 45 |
| 연 암 | 0.03 | 2.50 | 0.2 | 200 | 45 |

표 6. 등가정적해석, 동적해석에 적용한 지반정수

| 토층 분류 | 탄성계수 (γ/m^2) | 단위체적 중량(γ/m^3) | 포아 송비 | 점착력 (γ/m^2) | 내부마찰각 ($^\circ$) |
|----------|--------------------------|----------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|
| 매립토 | 100 | 1.75 | 0.4 | 0 | 20 |
| 풍화토 | 5000 | 1.80 | 0.35 | 0 | 30 |
| 풍화암 | 100000 | 2.20 | 0.25 | 0 | 45 |
| 연 암 | 1000000 | 2.50 | 0.2 | 200 | 45 |

표 7. 지중구조물의 물성값

| | 탄성계수 (γ/m^2) | 단면2차모멘트 (m^4) | 단면적 (m^2) | 단위체적중량 (γ/m^3) |
|-----|--------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|
| 상 부 | 2000000 | 0.00533 | 0.7 | 2.45 |
| 양갈벽 | 2000000 | 0.00533 | 0.4 | 2.45 |
| 하 부 | 2000000 | 0.00533 | 0.7 | 2.45 |
| 중간벽 | 2000000 | 0.00533 | 0.4 | 2.45 |

정적해석에서 지반의 수평진도는 0.2g를 적용하였으며, 동적해석에서는 Hachinohe파(최대가속도: 196gal)를 적용하였다.

4.5.3 해석결과

(1) 지반에 대한 최대응답값

지반의 심도별 응답값은 다음과 같다.

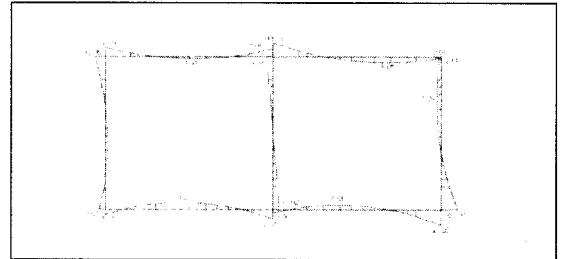


그림 66. 모멘트도

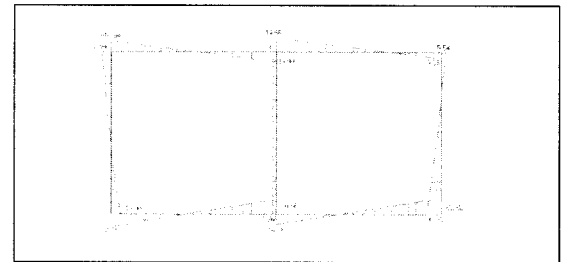


그림 67. 전단력도

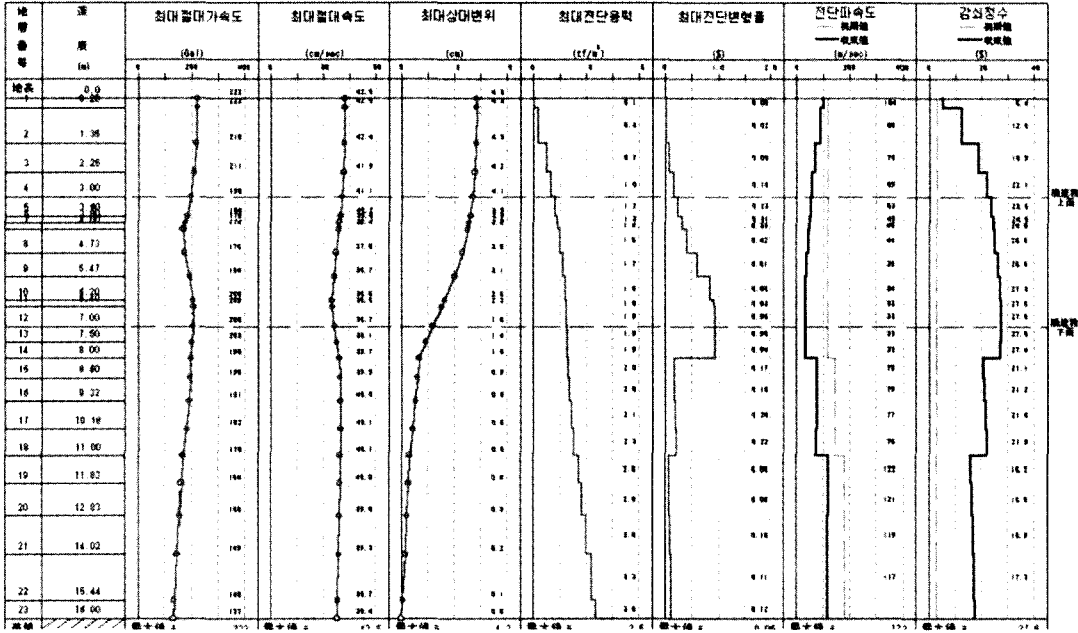
(2) 응답변위법(FEM)

구조물에 발생하는 모멘트와 전단력의 최대값은 우측벽 하단에서 발생하였으며, 그 크기는 다음 표에 서와 같이 산출되었다.

표 8. FEM해석 결과

| 해 석 법 | 최대힘모멘트 (t · m) | 최대전단력 (t) |
|---------------------------|-------------------|--------------|
| 응답변위법(지반스프링을 간이법으로 산출) | -31.55 | -26.15 |
| 응답변위법(지반스프링을 FEM으로 산출) | -31.55 | -26.15 |
| 응답변위법(FEM) | -21.20 | -22.92 |
| 응답진도법(FEM) | -26.12 | -24.80 |
| 등가정적해석법 | -22.40 | -15.60 |
| 동적해석 | -25.90 | -24.50 |

최대응답치의 심도별 분포
1968 TOKACHI EQ. HACHINOHE N-S



본 사례에서의 해석 결과 지반 스프링을 간이법으로 산출한 경우의 응답 변위법의 최대 휨 모멘트 및 최대 전단력이 제일 큰 값을 나타내고 있어, 실제 지중 구조물의 내진 설계에 있어서 구조물의 강성을 과대 평가되었고, 등가정적 해석법에 의한 최대 휨 모멘트 및 최대 전단력은 제일 작은 값을 나타내어 지중 구조물의 강성을 과소 평가할 우려가 있었다.

5. 결론

본 강좌에서 필자들은 지반과 구조물의 동적 상호작용 해석에 있어서의 이론들의 간단한 소개와 함께, 실무에 있어서 빈번히 사용되어지는 해석 팩키지를

사용하여 사면의 안정해석에 있어서의 내진(수정 진도법과 같은 유사 정적 해석 기법을 소개함), 정적 및 동적 해석, 원자력 구조물과 같은 강성 지반 위의 내진(응답 해석에 의함), 동적 해석, 유효 응력에 입각한 해안 구조물의 내진(액상화를 포함함), 동적 해석 등을 수행하였다. 이 결과, 필자들은 해석에 있어서 보다 중요한 것은 실제 일어난 현상에 부합하는 이론 및 모델의 선정의 적합성, 물성값 및 경계 조건의 정확한 선택 및 설정, 해석에 있어서 강조되는 면(예를 들어, 응력인가, 변위인가 등)이 무엇인가에 따라서, 선택되어지는 해석 틀의 엄밀한 선정 등이 요구되어지며, 선택의 차이에 따라서 해석 결과에 큰 차이가 발생할 수 있음을 파악하는 것이 가능했다.

참고문헌

1. 石原研而(1976), 土質 動力學의 基礎
2. 池田俊雄(1999), 地盤と 構造物, 鹿島出版會
3. 坂本忠彦(1998), ロックフィルダムの力學舉動と安定性 評價に關する研究
4. 一井康二, 井合進, 森田年一(1997), 兵庫현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 究報告 第36卷 第2互
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
7. 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계, 구미서관
8. 해양수산부(1999), 항만 및 어항 시설의 내진 설계 표준서
9. 박성진, 오병현, 박춘식, 황성춘, 지진시 사면 안정해석에 있어서의 진도법과 지진응답해석의 결과 비교, 한국지반 공학회(2000)
10. 박성우, 이대우, 임윤목, 김문경(2000), BOX형 지하구 조물의 내진설계 기준 확립을 위한 해석기법 개발, 한국 지진공학회

제 15차 국제 토질 및 기초 학술대회 참석안내

2001년 8월 27일 부터 31일까지 제 15차 국제 토질 및 기초 학술대회가 Istanbul에서 개최됩니다. 우리 학회에서는 9편의 논문이 발표되며 여러 회원들이 참석할 수 있도록 pre-tour를 포함한 단체 참석정보를 학회홈페이지에 올려놓았습니다. 참석을 원하는 회원께서는 5월 15일까지 학회 사무국으로 신청바랍니다.

<http://kgshome.or.kr> → 공지사항

- * 기타 궁금하신 사항은 김영윤 총무이사에게 문의바랍니다.
보강기술 tel:02-555-4482