

일본 한신 대지진에 있어서의 포트 아일랜드의 지진응답해석

Earthquake Response Analysis at Port Island during the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake(Japan)

황 성춘* 요시다 노조무** 이 대수***

ABSTRACT

Earthquake response analyses are conducted for the investigation of the ground shaking during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake. Port Island, a man made island with about 8km² area, is chosen for this purpose. Because earthquake measurement with vertical array was conducted there. Strain dependent characteristics of soil can be modeled well into Hardin-Drnevich Model. Four analyses are conducted : total stress analysis by equivalent linear method non-linear method, and two effective stress analyses. All analyses except equivalent linear analysis show fairly good agreement with observed record mainly because the non-linear behavior of Holocene clay layer has predominant effect on the behavior of fill. However, detailed investigation show that effective stress analyses give much better prediction than total stress analyses.

1. 서론

1995 년 일본 효고켄 남부지진(코베 대지진)에서는 수많은 토목 및 건축 구조물의 피해가 발생했고, 따라서 그 피해 원인의 규명을 위해 많은 지진 응답해석이 계획 실시되어졌다. 또한, 이와 같은 경우는 지진동이 매우 강했기 때문에 이들 해석은 필연적으로 비선형 해석을 해야만 된다. 그러나, 큰 규모의 비선형 거동을 동반하는 지반의 비선형 해석은 아직까지 충분히 안정된 결과를 얻을 수 있을 정도의 결과에는 도달하지 않는 수준으로 프로그램이나 모델화 등 해석자의 판단에 따라 큰 차이가 발생하는 것을 종종 경험한다.

따라서, 본 논문은 해석에 필요한 데이터가 충분하지 않음에도 불구하고 실무적으로 많은 지진응답해석이 이루어지고 있는 것으로부터 이들 지진응답해석의 하나의 참고로서 해석사례를 언급한 것이다.

해석 대상은 일본 코베에 위치하는 포트 아일랜드(Port Island)로, 코베시에 의해 연직 방향의 지진 기록이 획득되어 있어서 평가가 용이했다. 지진응답해석에 있어서, 결과를 알고 있는 경우는 일반적으로 구성 방정식 특유의 파라미터를 조정하여 해석 결과의 정도를 좋게 하는 것은 가능한 일이다. 극단적으로 표현하면 해석을 취급한 논문에서 해석 결과가 잘 맞지 않았다고 하는 논문은 찾아보기가 어렵다. 하지만, 지금까지 수행되어진 블라인드 테스트의 해석 결과에서는 믿을 수 없을 정도의 큰 차이가 발생하는 것도 사실이다.

따라서, 결과를 짜맞추는 것과 같은 작업은 본 논문에서 필자들이 강조하고자 하는 것과는 차이가 있다. 따라서, 본 논문에서는 객관적으로 수집된 데이터로 해석을 수행하였으며, 동시에 해석에 사용한 프로그램도 필자들이 연구용으로 사용하고 있는 것들은 피하고 현장 및 학계에서 인정 받고 많은 사람들이 사용하고 있는 수법이나 프로그램을 되도록 사용했다.

2. 지진관측위치의 지반과 관측기록

지진관측위치는 포트 아일랜드의 제 1 기 조성지의 북서부에 위치한다.(그림 1.) 부지내에서는 그림 1.에서 나타낸 것과 같이 건물 주변에는 컴팩션에 의해 액상화 대책이 수립되어 있어서 이 부분의 액상화 피해는 없었다고 보고되어진 구간이다. 관측 위치는 부지의 남동쪽 끝에 위치하며, 이 부분은 액상화 대책이 실시되지 않아 액상화가 발생했다고 상정되어졌다.

* 경주대학교 건설환경시스템 공학부 전임강사

** 일본 SATO 공업(주) 중앙기술연구소 주석연구원

** 한국전력공사 전력연구원 토건그룹 부장 - 477 -

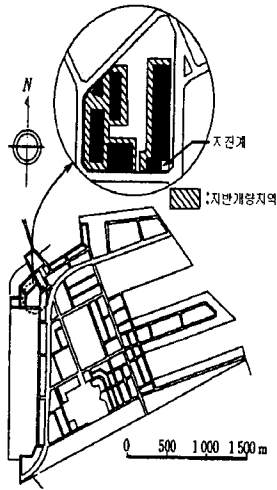


그림 1. 포트 아일랜드 제 1기 조성지 평면도와 지진계 설치 위치

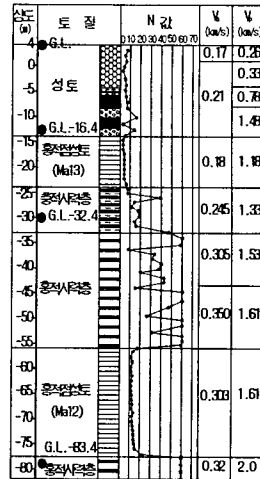


그림 2. 지진관측위치의 주상도(Vs, Vp는 문헌 2)를 기초로 필자의 추정

그림 2.에 지반의 주상도와 지진계 위치를 함께 나타내었다. 두께 약 18m의 마사토의 매립층 하부는 충적 점성토(Ma13)가 존재하며, 그 밑으로 충적사력층, 제 1 홍적사력층, 홍적점토층(Ma12), 제 2 홍적사력층으로 이루어져 있다. 강진계는 지표와 GL-16.4m, -32.4m, -83.4m에 설치되어 있다.

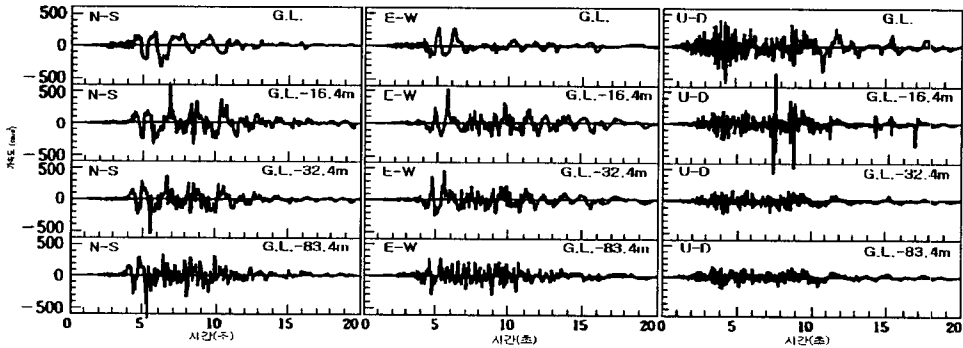


그림 3. 포트아일랜드에서 얻은 강진기록

그림 3.은 본 지진에서 얻어진 기록으로서 주요동을 포함하여 최초의 20 초에 대해서 나타낸 것이다. 이 기록의 특징적인 것으로는 상하성분이 지표에 가까이 감에 따라 증폭하고 있는 것에 비해, 수평성분은 진폭이 점차로 작아지고 있고, 또한 단주기 성분이 보이지 않게 되는 것이라 할 수 있다. 이것은 강한 수평동에 의해 비선형 거동이 탁월하게 되어진 결과라고 생각되어진다.

3. 지반의 모델화와 탄성정수

지진계는 GL-83.4m 로부터 설치되어 있기 때문에 이것보다 위를 해석하는 것이 바람직하다고 할 수 있을 것이다. 그러나, Ma13 과 Ma12 의 점성토층의 사이에 있는 사력층의 비선형 특성에 대한 데이터를 입수하는 것이 불가능하였기 때문에 본 논문에서는 GL-32.4m 의 지진계 위치로부터 상부를 해석 대상으로 했다. 그림 1.에 표시한 것과 같이 관측 위치의 바로 옆은 지반 개량이 실시되어져 있는 곳이기 때문에 단순하게 지반을 일차원적으로 모델화하는 것은 문제될지 모르나, 해석 당시는 다차원 해석을 수행하는데 필요한 데이터를 입수할 수 없었기 때문에 해석은 일차원만으로 수행하였다.(현재 추가 데이터 확보 및 실험에 의해 다차원 해

석을 수행 중으로, 결과가 얻어지면 적당한 지면을 빌어 발표하고자 함.)

본 대상 지역에 대해 PS 검층도 실시되어졌으나 PS 검층의 토질과 심도의 관계는 그림 2.와 상당히 다르기 때문에 그대로 이용하는 것이 불가능했다. 또한, 다운홀법에 의한 PS 검층은 지층의 평균적인 속도가 얻어지기 때문에 국소적인 값과는 대응하지 않는다고 하는 것도 널리 알려진 사실이다. 그런데, 그림 2.의 N 값 분포를 자세히 보면 각층 공허 깊이에 따라서 N 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은, N 값의 구속압 의존성이 나타난 것이라고 생각된다. 기왕의 지진응답해석에서는 같은 지층에서는 같은 정수를 이용하는 사례가 많았지만 최근의 연구에 의하면 탄성 정수, 비선형 특성 모두 구속압 의존성을 고려하는 편이 해석의 정도를 높일 수 있다고 알려져 있다. 지반의 모델화에 있어서는 이와 같은 제반 상황을 고려하였고, 유효 구속압 σ_m' 이 필요한 경우에는 정지 토압 계수 K_0 를 0.5 로서 계산하였다. 그리고, 지하수위는 GL-3m 로 설정하였고, 단위체적중량은 그림 9.의 값을 이용하였다.

층적 사력층(GL-28~37m, 단, 해석에서는 GL-32.4m 까지 사용함): N 값은 깊이에 따라 급격히 크게 되어지며, 층 중앙에서의 전단파 속도가 245m/s, 미소 변형률 때의 전단 정수 G_{max} 가 유효 구속압의 평방근에 비례한다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$G_{max} = 831\sigma_m'^{0.5}(\text{kgf/cm}^2) \text{-----} (1)$$

층적 점성토(GL-18~28m) : 현장 조사 결과에 의하면 이 지역의 층적 점성토와 압밀 압력이 거의 비례 관계에 있다고 적혀 있다. 그러나, 이 관계로부터 얻어진 G_{max} 의 값은 매우 작아서, PS 검층 결과를 설명할 수 없다. 또한, 이 점성토는 거의 정규압밀상태에 있는 것으로 적혀 있는데, 이 정규압밀점토의 G_{max} 는 기왕의 데이터에서는 구속압의 평방근에 비례한다고 하는 많은 데이터가 있다. 따라서, 본 연구에서는 층 중앙에서 전단파 속도가 180m/s 가 되도록 다음 식으로 모델화했다.

$$G_{max} = 448\sigma_m'^{0.5}(\text{kgf/cm}^2) \text{-----} (2)$$

매립층(지표~GL-18m) : 현장 조사 결과에서는 GL-5m 까지는 전단파 속도가 170m/s, 이하 210m/s 가 표시되어 있다. 그러나, 앞에서 설명한 것과 같이 N 값 분포에는 구속압 의존성이 나타나고 있어, 다음과 같이 모델화 했다.

$$G_{max} = 1000\sigma_m'^{0.5}(\text{kgf/cm}^2) \text{-----} (3)$$

식(3)에 의하면 매립층의 전단파 속도는 120~235m/s 의 분포가 된다.

4. 비선형 특성의 설정

층적사력층(GL-28~37m) : 참고할 수 있는 동적변형시험결과를 입수할 수 없었기 때문에 여기에서는 오자키 식에 기초하여 내부마찰각 ϕ 를 N 값의 함수로서 다음과 같이 나타내었다.

$$\phi = \sqrt{20N} + 15$$

여기서, 층의 평균값 15 를 대입하면 $\phi = 32.3^\circ$ 가 얻어진다.

또, 변형률 의존성에 대해서는 Hardin 과 Drnevich 의 식을 이용하고 최대 감쇠비 h_{max} 는 22%로 했다. 즉,

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_r}$$

$$h = h_{max}(1 - G/G_{max}) \quad (h \geq 2\%) \text{-----} (4)$$

여기서, h는 감쇠비, γ_r 는 전단 변형률, γ_r 은 기준 변형률로서 $\gamma_r = \tau_{max}/G_{max}$ 로 구해진다. 전단 강도 τ_{max} 은 내부마찰각과 모어 쿨름의 파괴조건에 의해서 구한다. 또한, 이 층이 액상화한 가능성이 지적되었지만 본 해석에서는 고려하지 않았다.

층적 점성토(GL-18~28m) : 그림 4.는 현장 조사 결과에 의한 $G/G_{max} - \gamma, h - \gamma$ 의 관계도이고 현장조사서에 의하면, 지역에 따라 그다지 차이가 없다고 적혀 있다.

또, 일축압축강도 q_u 와 G_{max} 의 관계를 나타낸 실험값이 적혀 있다. 여기서는 점착력 c 를 q_u 의 1/2 로 하고, 이 관계를 다음과 같이 모델화한다.

$$c = q_u/2 = 0.721 \log G_{max} - 1.12(\text{kgf/cm}^2) \text{-----} (5)$$

층 중앙에 있어서 전단탄성정수를 이용하고, 식(4)와 동일한 모델을 이용하면($h_{max} = 21\%$) 그림 4.에서 실선으로 표시한 관계가 얻어져 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 식(5)에서 얻어진 q_u 는 약 1.7kgf/cm² 이다.

포트 아일랜드내의 다른 사이트에서 지진에 앞서 수행되어진 일축압축시험에서도 $q_u = 1.6 \sim 1.8 \text{ kgf/cm}^2$ 로 식(5)와 타당함을 알 수가 있다.

매립층(지표~GL-18m) : 이 층은 지진에 의해 액상화 되어졌다고 본다. 이 경우, 지진 뒤에 채취한 시료가 지진전의 재료 특성을 나타낸다고 단정할 수 없다. 따라서, 본 해석에서는 필자들이 포트 아일랜드에서 지진 전에 행한 실험으로부터 얻은 결과를 이용했다.(그림-5)

변형율 의존성에 대해서는, 두 개의 동적변형시험으로부터 구했다. 하나는, 앞에서 설명한 불교란 시료를 이용하였고, 또 하나는, 같은 사이트에서 굴착한 재료를 사용하였다. 그리고, 시험은 중공 비틀림 시험기를 이용했다. 전자는 포화 상태에서 수행되었고 후자는 입경 2mm 이하가 되도록 체가름을 한 시료로서 건조상태에서 수행되어졌다. 둘 다 초기 유효 구속압은 1 kgf/cm^2 이다.

그림 6.에 시험 결과를 표시했다. 또, 그림 7.에는 포트 아일랜드에 있어서 매립토의 입경의 범위와 불교란 시료의 입경가적곡선을 나타낸 것으로 실험에 이용된 시료는 평균적인 재료라고 생각되어진다. 그림 6.을 보면 전단 정수비는 두 가지 모두 거의 차이가 없다. 감쇠비는 불교란 시료가 약간 작음을 알 수 있다. 이것은 불교란 시료가 과잉간극수압의 발생에 영향을 받기 때문이라고 생각되어진다.

매립토의 평균 N 값은 약 5.5 로 오자키의 식에서 내부 마찰각을 구하면 25.5° 가 됨을 알 수 있다. 따라서, 상재압 1 kgf/cm^2 에 대한 전단강도는 0.477 kgf/cm^2 기준 변형율은 0.0477%로 된다. 한편, $G/G_{max} = 0.5$ 로 되는 변형율은 0.035 ~ 0.039%이고, 양자에 대하여 식(4)를 이용하여 변형율 의존성을 계산하고 실험값과 비교하면 큰 차이는 없지만, 0.1%를 넘어서는 변형율영역에서는 전자가 잘 일치하고 있고, 또한 액상화 문제인 만큼 강도도 중요시해야 되기 때문에 전자를 이용해서 모델화하는 것으로 했다. 다음에 감쇠 특성에 대해서는 교란 시료를 대상으로 $h_{max} = 23\%$ 로 했다. 그림 6.에는 이와 같이 하여 결정된 변형율 의존성을 나타내었다.

5. 해석수법과 대응하는 모델화

2 가지의 전응력 해석과 2 가지의 유효응력 해석, 즉 총 4 가지의 해석을 수행하였다. 해석 수법은 실무에서 비교적 보편적으로 사용되어지고 있는 관점에서 선택하였다. 이것은 처음에서 서술한 바와 같이 본론의 목적에 추가하여 보다 고도한 구성방정식을 사용하기 위해서 필요한 데이터가 충분하지 않은 것이 그 이유이다.

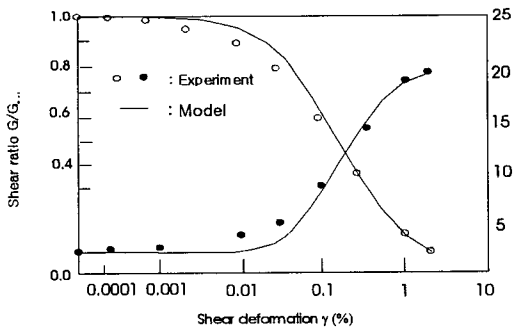


그림 4. 총적점토의 변형율 의존성

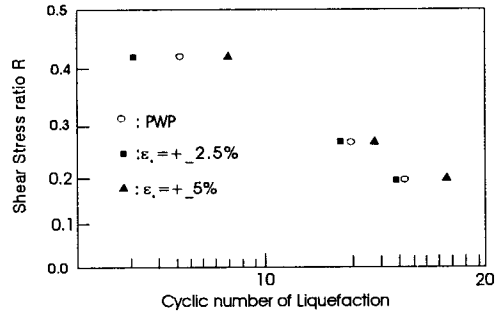


그림 5. 매립토의 액상화 특성

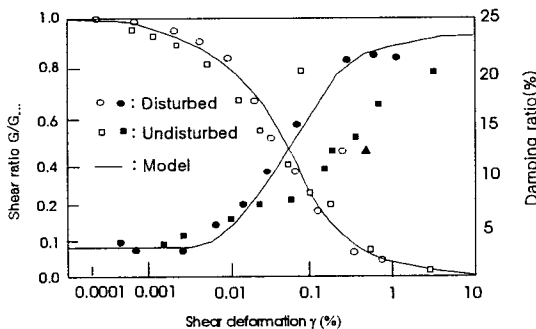


그림 6. 매립토의 변형율 의존성

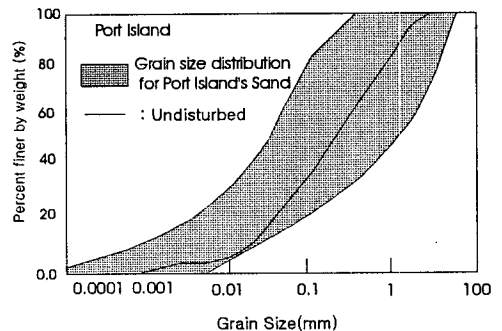


그림 7. 입경가적곡선의 비교

5.1 등가 선형 수법

중복반사이론에 기초한 방법이다. 지금까지 나타난 재료 특성 모델만으로 해석이 가능하다.

5.2 비선형 전응력해석

전단응력 τ - 전단 변형을 γ 관계에 쌍곡선 모델을 이용한 비선형 해석으로서 순차적분법에 의해 운동방정식을 풀어 나간다.

쌍곡선 모델에서는 앞 항의 전단 강성의 변형을 의존성은 바르게 고려할 수 있지만, 감쇠 특성은 자동적으로 결정되어지기 때문에 실험 결과값을 적용하는 것이 불가능하다. 특히, 변형율이 작은 영역에서는 모델의 이력 감쇠는 0 으로 되어 앞 항의 모델과의 차이가 크게 되어진다. 이것을 보정하기 위해 Rayleigh 감쇠를 도입한다. 지반의 고유값 해석을 수행하면 일차의 고유주기가 0.664 초로 되고, 일차 모드 감쇠를 2%로 하여 이것을 질량 비례, 강성 비례 각각이 균등히 받고 있다고 한다면 각각의 비례정수는 0.19 및 0.0021 로 되어진다. 또한, 이것은 유효응력해석에서도 같은 개념을 사용하고 있다.

5.3 유효응력해석-1

1 차원 유효응력해석은 YUSAYUSA 를 사용했다. 이 프로그램은 응력 공간상에서 응력 경로를 지정하는 것에 의해 과잉간극수압을 발생시키는 모델을 이용하고 있다.

그리고, 점성토 및 사력층에 대해서는 과잉간극수압의 발생은 고려하지 않았고, 동시에 매립토는 액상화의 발생을 고려했다. 또한, 과잉간극수압 발생량을 제어하는 파라미터의 값은 그림 5.에 표시한 액상화 강도를 대상으로 하여 단순전단시험의 시뮬레이션을 실시하여 결정한다. 그림 8.에 시뮬레이션의 결과를 나타내었다. 그리고, 이용한 파라미터의 값은 $B_p = 2.5$, $B_u = 0.18$ 이다. 또한, 그림 8.은 그림 5.와 세로축의 좌표값이 다르게 되어 있지만, 이것은 그림 5.에서는 전단응력진폭을 초기유효구속압에서 무차원화한 것에 비하여 그림 8.에서는 초기 유효 상재압에서 무차원화하고 있기 때문이다. 일차원 해석에서는 축압의 영향을 고려할 수 없는 것(고려하지 않음)이 대부분이기 때문에 이와 같은 처리가 필요하게 되어 진다.

그림 7.에서도 나타난 것과 같이 마사토는 세립분을 많이 포함하고 있다. 따라서, 투수성이 작다고 생각되어지는 것으로부터 해석은 비배수 조건하에서 이루어졌다.

5.4 유효응력해석-2

과잉간극수압의 발생에 Martin - Finn - Seed 모델을 이용한다. 이 모델을 이용한 프로그램이 몇가지 작성되어져 있지만, 여기에서는 DESRA 를 사용했다.

Martin - Finn - Seed 모델은 다ierer턴시에 의해 발생할 수 있는 체적 변형율을 전단 변형율 진폭의 함수로서 나타내고 이것에 일차원 팽윤함수를 곱하는 것에 의해서 과잉간극수압의 발생을 고려한다. 이 모델에서는 사이클릭 모빌리티의 영향에 의한 체적 변형율 발생량의 감소는 앞의 함수형에 포함되어지지만, 이것에 동반하는 경화 현상은 고려되지 않았다. 그림 5.의 액상화 특성을 대상으로 하여 결정한 액상화 강도를 그림 8.에 나타내었다. 이용한 파라미터의 값은 $C_1 = 0.6$, $C_2 = 0.8$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 0.4$, $k_2 = 1.5/P_a^n$, $m = 0.4$, $n = 0.6$ 이고, 여기서, P_a 는 대기압이다.

점성토 및 사력층에 대해서는 비선형 전응력 해석에 이용한 것과 같은 모델을 이용했고, 그 밖의 기본적인 방침은 5.3 과 동일하다.

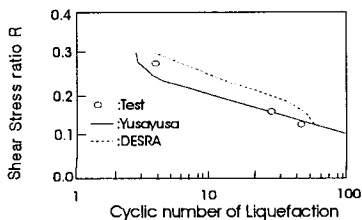


그림 8. 액상화강도의 모델화

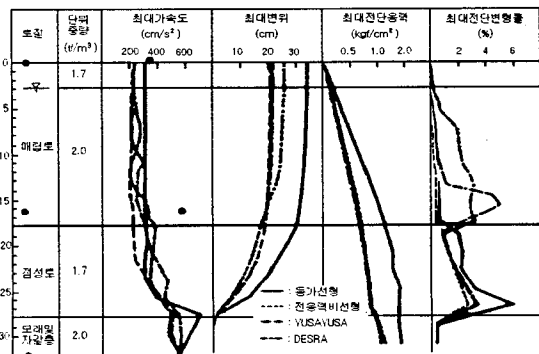


그림 9. 최대 응답값

6. 해석결과와 고찰

NS 방향을 해석한다. 그림 9.에 최대응답값, 그림 10.에 지진계 설치 위치인 GL 및 GL-16.4m 의 가속도 시각력을 계측값과 비교하여 나타내었다.

우선, 최대응답값을 보면, 지표면 가속도에서는 등가선형해석이 309cm/s^2 으로 다른 해석보다 크게 나타나고, 전단응력도 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 지금까지 지적되어진 현상으로 계산에 의한 최대 가속도는 어떠한 경우에 있어서도 관측값보다 작지만, 이것은 뒤에서 나타낸 바와 같이 관측값에서는 펄스상의 매우 큰 가속도의 부분이 있는 것에 비해, 계산에서는 전체가 매끄러운 형상으로 되어있기 때문이다.

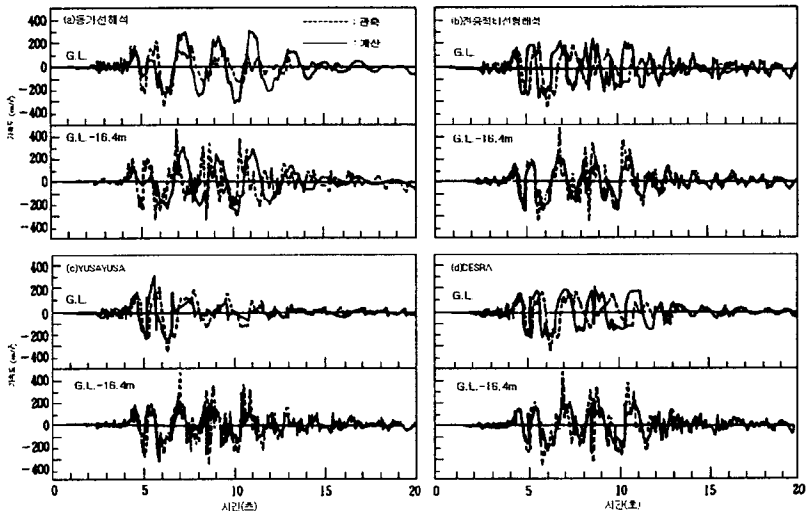


그림 10. 가속도 시각력의 비교

전체의 특징으로서는 점성토의 부분에서 가속도의 값이 매우 작게 되어 있는 것을 들 수 있다. 최대 변위 및 최대 전단 응력의 분포를 보면 이 부분에서는 변형율도 크고 또한 대규모의 비선형 거동이 일어난 것을 알 수 있다. 즉, 최대 응답값은 점성토 지반의 거동에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

최대전단변형률 분포에서는 매립층에서 전응력 해석과 유효응력해석에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 유효응력 해석이 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 유효응력해석에서는 과잉간극수압의 발생을 고려하고 있어, 강성이 보다 작게 되어진 것에 연유된다.

다음으로 시각력을 비교한다. 전체로서 비교해 보면, 어느 해석도 관측값과의 일치도가 매우 좋을 것을 알 수 있다. 예를 들어, 해석을 제한하는 논문이라면, 어느 경우에 있어서도 해석은 관측값을 잘 표현하고 있다고 하는 결론을 내릴 수 있을 정도이다. 그러나 자세히 관찰해 보면, 해석마다 각각의 특징이 있는 것을 알 수 있다.

지진계는 개략적으로 보아 매립토와 점성토 사이에 끼인 것과 같이 설치되어 있기 때문에 다음의 논의에서는 각각의 층을 대표하는 응답값으로서 간주한다.

우선, 5 초 부근의 최대로 큰 파에 대한 응답을 보면, 등가선형해석에서는 지표의 위상은 잘 일치하고 있지만, GL-16.4m에서는 대응하고 있지 않음을 알 수 있다. 이것은, 점성토의 강성은 작게, 매립토의 강성은 크게 평가했기 때문이다. 후자에 대해서는 과잉간극수압의 발생을 고려하지 않은 것으로부터 당연한 결과라고 할 수 있겠다. 전응력 비선형해석에서는 처음뿐만 아니라 전체적으로 GL-16.4m의 위상의 대응이 좋으며 점성토의 비선형 거동이 잘 표현되어져 있다고 생각되어진다. 그러나 지표에서는 계산 값의 위상이 진행되어 있고 매립토의 강성이 높게 평가되어 있는 것은 등가선형해석과 동일하게 전응력 해석법의 단점이 나타난 것이라고도 할 수 있겠다.

2 가지의 유효응력해석에서도 GL-16.4m의 위치의 위상은 거의 일치하고 있기 때문에 점성토의 모델화는 성공한 것처럼 여겨진다. 지표의 위상은 전응력 해석보다 개선되었지만 이것은 과잉간극수압의 발생을 고려했기 때문에 전단파의 전파 속도가 늦어진 것으로서 유효응력 해석의 우위성이 나타난 결과라고 할 수 있다. 그러나 관측값과 비교하면 위상은 아직 진행하고 있고, 또한 강성을 큰 쪽으로 평가하고 있음을 알 수 있다.

이 이유로서 계산에서는 고려 할 수 없었던 EW 방향의 가진에 동반하는 간극수압의 발생 등을 들 수 있겠다.

다음에 GL-16.4m 기록의 시각 7초강(強)과 8초강(強)의 거동을 보면 관측값에서는 급격한 가속도의 변화가 보이는 것에 비해, 등가선형해석에서는 7초의 거동은 거의 재현되지 않고 8초의 기록은 진폭이 매우 작음을 알 수 있다. 전응력 비선형 해석에서는 약간 개선이 보여지는 것 만인 것을 알 수 있다. 이것에 대해 유효응력해석에서는 이 부분은 잘 재현되고 있음을 또한 알 수 있다.

마지막으로 6 초 이후의 지표의 파형을 관찰하면, 액상화의 발생을 시사하는 것과 같은 가속도의 전체적인 저하와 급격한 가속도의 증가현상이 보여진다. 후자는 사이클릭 모빌리티에 의해 발생한 것으로 사이클릭 모빌리티를 고려한 YUSAYUSA 에서는 이 사이 경위의 대부분을 잘 설명하고 있는 것과 같이 보여진다. 단, YUSAYUSA 의 가속도 값은 관측값보다 꽤 작게 나타나 있지만, 이것은 이미 지적한 것과 같이 YUSAYUSA 에서는 응력경로가 변상선을 가로지르고 그 이후로는 급격히 유효응력이 저하하는 경향이 있는데 이것이 결과에 반영된 것이라고 볼 수 있다. YUSAYUSA 에서는 진폭이 작은 값을 보이지만, 위상특성은 잘 일치하고 있다고 할 수 있다. 그러나, 사이클릭 모빌리티를 고려하고 있지 않은 DESRA 에서는 결과에 오차가 심하게 포함되어 있고, 따라서 전응력 해석에서는 그 차이가 더욱 크게 됨을 알 수 있다.

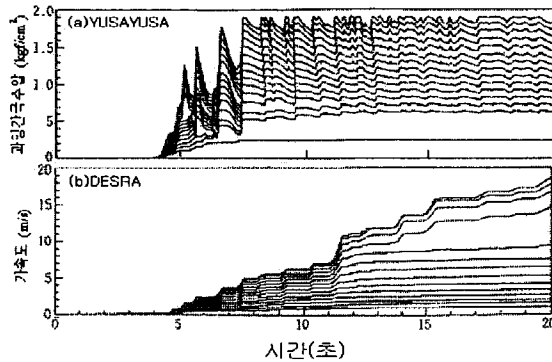


그림 11. 과잉간극수압시각력

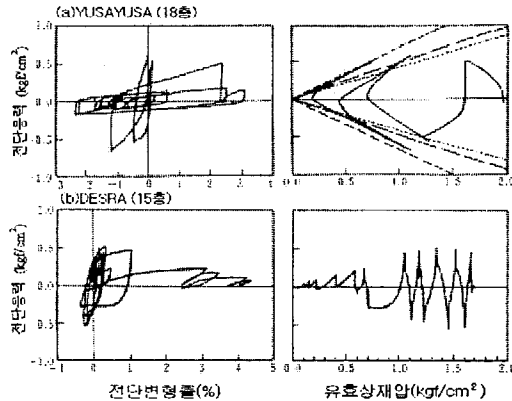


그림 12. 응력 경로와 응력 - 변형률 관계

그림 11.에서 모든 층의 2 가지 유효응력해석에 의한 과잉간극수압발생을 비교하면, YUSAYUSA 에서는 5 초 부근에서 급격히 간극수압이 발생하는 것에 대하여 DESRA 에서는 과잉간극수압의 상승은 보다 완만함을 알 수 있다. 이 이유는 그림 12.에서 설명 가능하다. 즉, YUSAYUSA 에서는 앞에서 설명한 것과 같이 응력점이 변상선에 도달한 뒤에 급격히 수압을 발생시키는데 비하여 DESRA 에서는 이와 같은 현상은 일어나지 않

는다. 더욱이, 그림 12.에서 알 수 있는 것과 같이 이 지진에 대해서는 전단 변형율이 1 방향으로 축적되는 경향이 있다. 과잉간극수압 발생량은 전단변형율 진폭의 함수로서 정의되어 있기 때문에 이와 같은 거동을 나타내는 경우는 과잉간극수압의 발생량은 상대적으로 작게 되어진다. 이 2 가지가 과잉간극수압변화의 커다란 차이로 되어진 것을 알 수 있다.

7. 결론

효고켄 난부 지진에 있어서 포트 아일랜드의 거동에 대해서 비선형 해석을 실시하여 그 결과를 관측값과 비교했다. 그 결과 모든 해석의 결과가 관측값과 비교하여 일치도가 나쁘지 않았다. 이 원인의 하나는 점성토의 비선형 거동이 지배적인 요인으로 되어 있기 때문이라고 생각되어진다. 그리고, 또한 유효응력해석의 우위성을 몇 가지의 면에서 확인할 수 있었다. 동시에, 본 논문에서는 데이터의 제약으로부터 고도한 해석은 수행할 수 없었지만, 만약 데이터가 충실하다고 하면 관측값과 더 일치하는 결과를 얻는 것도 가능할 것이다.

참고 문헌

- 1) Midorikawa, S.: A statistical analysis of submitted predictions for the Ashigara Valley blind prediction test, Proc., Int. Symp. On the effect of surface geology on seismic motion Odawara, Japan, Vol.2, pp.65~77, 1992.
- 2) Port Island 기록(神戸市 제공)
- 3) 1995 년 병고현 남부지진조사 속보집, 不動建設, 1995
- 4) Martin, G.R., Finn, W.D.L. and Seed, H.B.: Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, J. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 105, No. GT5, pp. 423~438, 1975.
- 5) 吉田 望·東畑都生: YUSAYUSA-2 이론과 사용법., 1991
- 6) 吉田 望: 실용 프로그램 SHAKE 의 적용성, 연약지반의 지진 동증폭(動增幅) 심포지움 발표논문집, pp.14~31, 1994.
- 7) 吉田 望 : 지반의 토질역학적성질과 지진동예측 -연구의 현상과 실용상의 문제점-, 제 20 회 기념 지반진동 심포지움, 일본건축학회, pp.27~32, 1992
- 8) Arulanandan, K. ed.: Proc., International Conference on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis California, 1995.