

지진 동과 내진설계(제1)

III. 말뚝기초의 내진설계

1. 개요

현재 우리나라의 내진 설계는 교량 또는 건축 구조물 등의 상·하부를 구분하지 않고 뼈대(Frame)구조로 가정하여 이루어지고 있다. 그러나, 말뚝기초는 지반과 말뚝과의 상호작용으로 인하여 상부 구조물처럼 뼈대구조물로 거동하지는 않는다. 따라서, 지반의 특성을 고려하여 엄밀하게 해석을 수행하여야 말뚝기초의 거동을 비교적 정확하게 알아낼 수 있을 것이다.

말뚝기초로 지지된 구조물의 내진 해석시, 상부구조물은 뼈대구조물로 모델링하고 하부 구조물은 지반의 비선형성과 말뚝기초의 탄·소성 거동을 모델링할 수 있는 일괄적인 해석 또는 내진 설계시스템이 개발되어 있다면 가장 정확하고 유용한 해석 또는 설계수단이 될 수 있을 것이지만, 현재까지는 그런 수준에는 이르지 못하고 있다.

내진 설계방법은 크게 등가 정적 해석법과 동적 해석법으로 구분할 수 있으며 동적 해석법에는 응답스펙트럼법과 시간이력해석법이 있다. 각 해석방법들에서는 설계지반운동을 적용시키는데, 등가 정적 해석법에서는 설계지진계수를, 응답스펙트럼법의 경우 설계응답스펙트럼을 그리고 시간이력해석법의 경우

설계가속도 - 시간 이력을 적용한다.

본 강좌에서는 도로교 설계기준(2000)에서 규정하고 있는 등가 정적 하중법의 기본 개념과 구체적인 해석방법들을 알아보고 간편하게 적용할 수 있는 내진 설계절차를 소개하였다. 또한, 지반의 동적 특성을 반영할 수 있도록 말뚝기초와 지반의 동적 상호작용을 고려한 해석방법도 다루었다. 말뚝기초에 대한 내진 설계 사례는 흔하지 않으므로 간단한 교량기초 말뚝에 대한 내진 해석 예를 소개하였다.

2. 등가 정적 해석법

도로교 설계기준(2000)에서는 지진에 대한 말뚝기초의 설계는 등가 정적 하중법을 이용하도록 규정하였으므로, 등가 정적 하중법을 이용한 해석방법에 대하여 요약하였다

2.1 등가 정적 설계수평하중의 산정

등가 정적 하중법에서 설계지진계수는 내진성능목표, 지진구역 그리고 지반의 종류에 따라 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\text{설계지진계수} = \text{지진구역계수} \times \text{위험도 계수} \quad (1)$$

또는

$$\text{설계지진계수} = \text{지반의 종류에 따른 지진계수} \times \text{위험도 계수} \quad (2)$$

*정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 교수

여기서, 식 (1)에 의한 설계지진계수는 기반암에서의 지진 가속도를 결정하는데 사용할 수 있으며, 식 (2)에 의한 그것은 지반의 특성을 고려한 지표에서의 설계수평지진계수인데 등가 정적 설계수평하중 (이하에서는 “등가수평하중”이라고 함.)을 결정하는데 사용할 수 있다. 또한, 지진구역계수, 지반의 종류에 따른 지진계수, 위험도 계수 등은 참고문헌들 (도로교 설계기준, 2000 ; 김수일 등, 2000 ; 건설교통부, 1997)을 참고할 수 있을 것이다.

등가정적하중법에서 등가수평하중은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{등가수평하중} = k_h \times W \quad (3)$$

여기서, k_h 는 지반종류별 설계수평지진계수인데 표 1에 수록하였으며, W는 말뚝두부에 작용된 연직하중이다.

표 1. 지반종류별 설계수평지진계수(k_h)

지반종류	지진구역	설계수평지진계수			
		1등급		2등급	
		기능수행	붕괴방지	기능수행	붕괴방지
S _a	I	0.05	0.13	0.04	0.09
	II	0.03	0.07	0.02	0.05
S _b	I	0.06	0.15	0.04	0.11
	II	0.04	0.10	0.03	0.07
S _c	I	0.07	0.18	0.05	0.13
	II	0.05	0.11	0.03	0.08
S _d	I	0.09	0.22	0.06	0.16
	II	0.06	0.15	0.04	0.11
S _e	I	0.13	0.31	0.09	0.22
	II	0.10	0.24	0.07	0.17

2.2 정적수평하중을 받는 말뚝의 해석방법들

지진시, 연직진동성분은 말뚝기초의 거동에 거의 영향을 미치지 못하지만 수평진동성분은 말뚝기초의 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Choi 등, 1997). 등가정적하중법에서는 지진의 영향을 식 (2)와 (3)에 의해 계산된 등가수평하중으로

환산하여 말뚝두부에 작용시킨 후 정적수평하중을 받는 말뚝의 해석방법들을 이용하여 정적인 해석을 수행한다.

흔히 사용하고 있는 해석방법으로는 일본도로교시방서 (1996)에서 채택하고 있는 변위법 (또는 진도법), Poulos 등 (1980)에 의해 제안된 탄성해석법, 탄성지반위에 지지되는 탄성보의 방정식 (Winkler, 1986)에 기초한 지반반력해석법, 전자의 방정식을 경계조건과 하중조건을 도입하여 수식적으로 풀이한 수식적 정해 (목영진, 1998), P-y모델에 기초한 말뚝해석코드들 (예를 들면, LPILEPLUS, PAR 등)을 이용한 방법 그리고 말뚝의 수평정재하시험방법 등을 들 수 있다. 여기서 탄성해석법과 지반반력해석법은 말뚝기초공학 관련 서적들에서 흔히 볼 수 있는 방법이고 말뚝정재하시험방법은 말뚝수평정재하시험시 두부의 고정조건 등의 재현이 어려워 적용이 쉽지 않은 방법이므로, 본 강좌에서는 변위법, 수식적 정해, 해석코드방법 등에 관하여 설명하였다.

2.2.1 변위법 (또는 진도법)

일본도로교시방서(1996)에서는 설계수평지진계수를 구하는 방법이 우리나라 도로교설계기준 (2000)의 방법과 다소 다르게 되어 있으므로 등가수평하중을 식 (2)와 (3)에 의하여 구하는 것으로 한다.

지진시 변위법에 의한 말뚝기초에 관한 내진 해석 절차는 다음과 같다.

- (1) 지진시 등가외력 (연직력 V_0 , 수평력 H_0 , 모멘트 M_0)을 구한다. 여기서, 등가연직력은 확대기초의 바닥면 위에 있는 모든 사하중만을 포함하며, 등가수평력은 각 구성부재의 등가연직력에 설계수평지진계수를 곱하여 구하고, 등가모멘트는 각 구성 부재의 등가수평력 성분의 모멘트의 합으로 구한다. 여기서, 등가모멘트는 교축방향과 교축직각방향에서 각각 구한다.

- (2) 등가의력들이 확대기초의 중심에 작용한다고 가정하고 변위법에 의하여 확대기초중양의 연직변위 δ_x , 수평변위 δ_y , 회전각 α 를 구한다.
- (3) 확대기초 중양의 변위인 $\delta_x, \delta_y, \alpha$ 에 의하여 각 말뚝두부의 축방향력 P_{Ni} , 축직각방향력 P_{Hi} , 회전모멘트 M_{hi} 를 구한다.
- (4) P_{Ni}, P_{Hi}, M_{hi} 를 이용하여 말뚝두부에서의 연직반력 V_i 와 수평반력 H_i 를 구하여 확대기초의 배근계산에 사용할 수 있다.

상기의 계산과정은 일본도로교시방서(1996)와 국내도로교 표준시방서 (1996)에 복잡한 식으로 상세히 설명되어 있으며, 본 강좌에서는 이해를 돕기 위하여 간단한 적용 예를 예제로 수록하였다.

진도법에서는 원래 동적인 하중인 지진력을 정적하중으로 치환하기 때문에 구조물의 진동특성이나 시간에 따른 진동특성을 감안하기 곤란하므로 강성이 큰 구조물에서 적용가능하며 그 외 구조물에서는 실제 거동과 다르게 나타날 수도 있다.

2.2.2 수식적 정해

탄성지반상에 지지되는 탄성보이론에 기초하여 작성된 수평하중을 받는 말뚝기초에 관한 지배방정식 (식 (4))을 다음과 같은 가정하에서 수식적으로 풀이하였다.

- EI는 일정하다.
- 긴말뚝이며 하중이 말뚝 두부에만 작용한다.
- α_h (지반반력계수)는 깊이에 따라 일정하다.

여기서, 일반적으로 지반반력계수는 k_b 라고 나타내지만 지진수평계수와 구분하기 위하여 α_h 로 표시하였다.

$$EI \frac{d^4 y}{dZ^4} = P = -\alpha_h \cdot y \quad (4)$$

$$y = e^{-\beta Z} (C \cdot \cos \beta Z + D \cdot \sin \beta Z) \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \beta = \sqrt[4]{\frac{\alpha_h}{4EI}} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

말뚝머리부의 경계조건 (하중작용상태와 말뚝머리 구속상태)에 따라 적분 상수 C와 D를 결정할 수 있으며, 수평변위 (y)뿐만 아니라 경사각 (α), 모멘트 (M), 전단력 (V) 그리고 지반반력 (P)의 말뚝관 입깊이에 따른 분포도를 구할 수 있는데, 풀이결과를 표 2에 요약하였다. 여기서, A_1, B_1, C_1, D_1 은 βZ 에 따른 함수로 나타낼 수 있으며, 간편하게 적용할 수 있도록 관입 깊이의 증가에 따라 도표화 할 수 있다 (목영진, 1998).

2.2.3 말뚝해석코드 방법

(1) LPILE PLUS

연직말뚝에 말뚝축방향하중 Q가 작용하고 지반의 수평하중에 대한 수평변위의 비선형 거동관계를 P-y곡선으로 모델링하는 경우 지배방정식 (식 (7))을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI = \frac{d^4 y}{dZ^4} + Q \frac{dy^4}{dZ^2} + \alpha_h \cdot y = 0 \quad (7)$$

여기서, $\alpha_h (= P/y)$ 는 지반반력계수이며 깊이(Z)와 수평변위(y)에 따라 비선형적으로 변하는 값이다.

이 미분방정식을 유한차분법에 의하여 수치해석적 형태로 해를 구하고 말뚝머리의 경계조건 (하중작용상태와 말뚝머리구속상태)을 적용하여 해를 구할 수 있도록 작성된 말뚝해석용 코드의 대표적인 것이 LPILE PLUS (Ensoft, 1995)이다.

(2) PAR(Pile Analysis Routines)

말뚝-지반(-상부구조물)의 상호작용을 정적 및 동적하중하에서 해석할 수 있는 해석코드이며 연직하중 뿐만 아니라 수평하중하에서도 해석가능하다. 또한, 말뚝체에 작용된 하중 뿐만 아니라 변위를 외력으로 하더라도 해석할 수 있다. 말뚝구조체는 유한요소기법(FEM)에 의하여 모델링한다. 그리고, 인접

지반은 스프링과 감쇠기 요소를 이용하여 모델링하며 말뚝에 인접한 흙의 응답 (즉, 하중-변위관계)는 개별적인 비선형 선요소 (discrete nonlinear line element)에 의해 모델링할 수 있는데, 이들 요소들은 다음과 같은 내용들을 포함하고 있다.

- 사질토와 점성토에 대한 API기준 (1987)

표 2. 말뚝머리의 경계조건에 따른 수직적 정해의 풀이 요약표

조건	말뚝두부하중상태	풀이	비고
I	$P_H = P_t$ $M = 0$	$y = \frac{2P_t\beta}{\alpha} C_1$ $\alpha = \frac{2P_t\beta}{\alpha} A_1$ $M = \frac{P_t}{\beta} D_1$ $P_H = P_t B_1$ $P = -2P_t\beta C_1$	
II	$P_H = 0$ $M = M_t$	$y = \frac{M_t}{2E\beta^2} B_1$ $\alpha = \frac{-M_t}{E\beta} C_1$ $M = M_t A_1$ $P_H = -2M_t\beta D_1$ $P = -2M_t\beta B_1$	
III	$P_H = P_t$ $M = M_t$	I + II	
IV	$P_H = P_t$ $S_t = 0$	$y = \frac{P_t\beta}{\alpha} A_1$ $\alpha = \frac{-P_t}{2E\beta^2}$ $M = \frac{-P_t}{2\beta} B_1$ $P_H = P C_1$ $P = -P_t\beta A_1$	

- 정하중영향, 완전주기하중영향, 변형율하중영향, 주기적인 하중영향
- 정적 또는 동적해석
- 방사감쇠의 단순화
- 흙과 말뚝의 변형관계를 나타내는데 비선형적인 말뚝직경의 영향고려

지반의 응답은 매우 일반적인 다선 비선형요소로 나타내었으며 이 요소는 자동발생되거나 사용자가 입력할 수 있다. 하중-변형관계는 P-y관계나 t-z/q-z관계로 구분하여 나타낼 수 있으며, 이 관계도 자동발생되거나 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

PAR에서는 말뚝에 3차원적인 동적 하중이나 변위를 작용시켜 해석할 수도 있으며, 3차원적인 지반진동 (가속도-시간 이력 이나 변위-시간 이력)을 작용시켜 지진에 대한 말뚝의 거동을 해석할 수도 있다. 또한, 이와 같은 경우, 말뚝-지반-상부구조의 상호작용해석도 가능하다. 즉, 상부구조물의 자중을 교각거리 위치에, 그리고 교각과 확대기초의 자중의 합을 확대기초위치에 각각 집중질량으로 작용시켜 해석할 수 있다 (그림 1). 이 방법은 말뚝의 해석시 작용하는 하중을 실제와 비슷하게 모델링하여 실제에 근접한 말뚝의 거동을 모사할 수 있다.

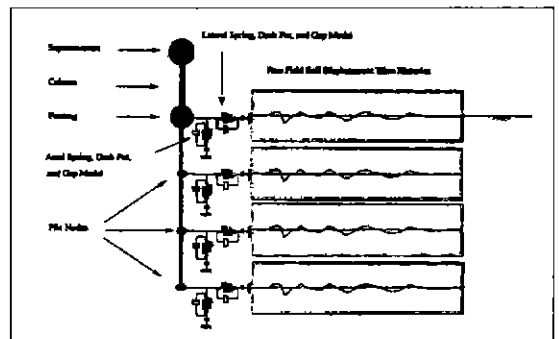


그림 1. PAR에 의한 지반-말뚝-상부구조물의 상호작용 해석 예

3. 등가정적하중법에 의한 간편한 내진 설계 절차

도로교 설계기준(2000)에서는 등가 정적하중법에 의하여 기초의 내진설계를 수행하도록 규정하였다. 또한 구조물의 평형조건을 만족하도록 지진시 기초의 지진하중 (즉, 연직반력, 수평반력 및 모멘트)을 결정하는 것으로 하였다.

이에 기초하여 간편하게 적용할 수 있는 내진 설계 절차를 다음과 같이 제안하였으며 그림 2에 흐름도를 요약하였다.

(1) 확대 기초의 중심에 작용하는 지진하중 계산

상부구조, 교각부, 확대기초 등의 자중을 계산하고 설계수평지진계수를 고려하여 등가 수평지진력을 계산한다. 확대기초의 중심에서 평형조건을 만족하도록 지진하중 (연직반력, 수평반력, 모멘트)을 구한다.

(2) 군 말뚝의 해석

동일한 확대기초아래에서 하중을 지지하는 말뚝들이라도 개별말뚝의 하중분담은 다를 수 있으므로 교축 방향과 교축 직각 방향에 대한 군말뚝해석을 통하여 개별말뚝이 부담하는 하중을 계산하고, 이중 가장 큰 하중을 받는 말뚝을 선정한다. 여기서, 군말뚝해석에는 3DPILE (Ensoft, 1994)를 사용하였다.

(3) 단일 말뚝의 해석

최대 하중이 작용하는 말뚝에 대하여 해석 코드인 LPILE^{PLUS}와 PAR 등에 의하여 단일 말뚝해석을 수행한다. 여기서 각 말뚝에 발생되는 수평 변위, 전단력, 휨 모멘트 등을 계산하여야 하며, 현장여건을 감안하여 말뚝머리의 고정조건도 다양하게 변화시켜 해석할 수 있다.

(4) 말뚝기초의 설계

도로교 설계기준(2000)에 채택된 허용응력설계법에 따라 계산된 수평변위, 전단력, 그리고 모멘트를 만족시킬 수 있도록 말뚝기초의 구성부재에 대한 응력 검토를 실시한다.

(5) 말뚝기초의 지지력과 침하에 대한 검토

내진 설계가 완료된 말뚝기초를 시험 말뚝으로 선정하여 말뚝 정재하 시험을 실시하여 말뚝기초의 지지력을 결정하고 침하에 대한 검토를 실시한다. 이와 같은 절차는 도로교 설계기준 (2000)의 말뚝기초 설계 (5.8절)에서 규정하고 있는 설계절차이다.

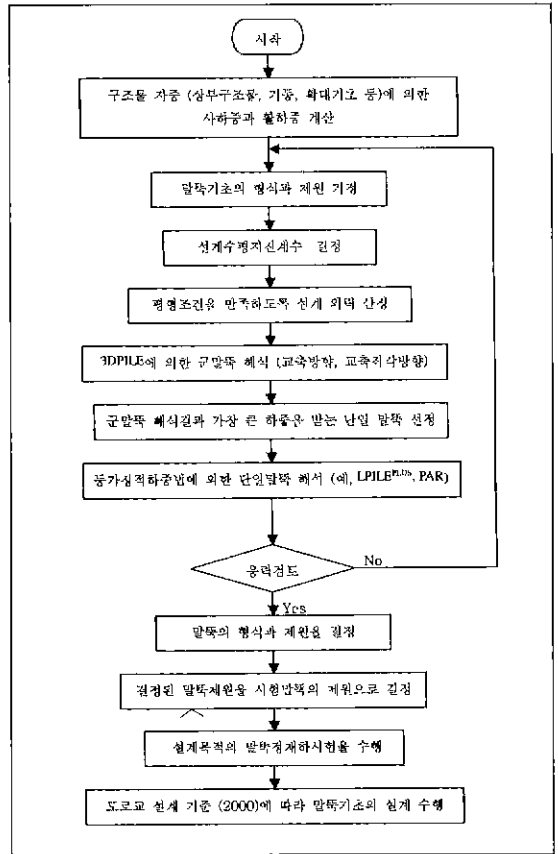


그림 2. 간편한 내진 해석절차

4. 지반-말뚝 동적상호작용을 고려한 해석방법

지반-구조물 상호작용을 고려하는 동적해석방법과 지반구조물의 내진해석에 이용할 수 있는 상용프

로그그램을 소개하였다. 이번 장에서는 전 장에서 소개한 동적해석방법 중 지반-구조물 상호작용해석에 유리한 부분구조법(substructure method)에 대하여 자세히 소개하였다.

4.1 부분구조법(substructure method)

지반-구조물 상호작용 문제는 집중질량해석법(lumped mass method)이나 직접법(direct method)과 같은 동적해석방법으로 해석할 수 있으나, 부분구조법을 사용하여 보다 간단하게 해석할 수 있다. 부분구조법은 선형 지반-구조물 전체 시스템을 몇 개의 좀 더 간단한 부분구조 시스템으로 나누어 다음 각각의 부분구조 시스템을 따로 따로 해석하고 해석의 마지막 단계에서 중첩의 원리(principle of superposition)를 이용하여 그 결과들을 결합하여 지반-구조물 전체 시스템의 해를 구하는 방법이다.

지표면위에 놓인 구조물의 경우 부분구조법은 상대적으로 간단하며, 많은 해석방법들을 이용할 수 있다. 반면 기초가 지반에 근입되어 있는 구조물의 경우 부분구조법은 상당히 복잡해지는데, 이런 문제를 해석하는 방법들은 개념적으로 지반과 구조물사이의 경계면에서 상호작용을 어떻게 처리하는가에 따라 4가지 방법, 즉, 강성경계법(rigid boundary method), 유연경계법(flexible boundary method), 유연부피법(flexible volume method), 그리고 부분구조제거법(substructure subtraction method)으로 나눌 수 있다. 표 3에서는 위 4가지 해석방법을 요약하여 비교하였다. 표 3에서처럼 자유장 응답해석(site response analysis)과 구조적 응답해석(structural response analysis)은 모든 방법에서 공통적으로 수행되지만, 산란해석(scattering analysis)과 임피던스해석(impedance analysis)에서 차이를 보인다. 강성경계법과 유연경계법의 경우 산란문제와 임피던스문제를 풀기 위한 해석이 필요한 반면, 유연부피법과 부분구조제거법은 단지 임피던스해석만 필요하고 산란해석은 필요치 않다. 그리고 부분구조제거법은 종종 유연부피법보다 훨씬 적

은 양의 임피던스해석을 수행한다. 여기에서는 4가지 방법 중 유연부피법과 부분구조제거법에 대해 설명하겠다.

4.1.1 유연부피법(flexible volume method)

유연부피법은 지반-구조물 전체 시스템을 그림 3에서 보는 바와 같이 3개의 부분구조 시스템으로 나누어 해석을 수행한다. 부분구조 I은 자유장(free-field site), 부분구조 II는 굴착지반(excavated soil volume), 그리고 부분구조 III은 구조물(structure)이다. 유연부피법에서는 자유장과 굴착지반사이의 상호작용이 굴착지반의 경계면과 내부에서 발생하고, 부분구조 시스템사이의 상호작용은 구조물 기초의 경계에서 일어난다고 가정한다.

그림 3의 지반-구조물 부분구조 시스템에 대한 운동방정식은 식 (8)과 같다.

$$[M] \{\hat{U}\} + [K] \{U\} = \{Q\} \quad (8)$$

여기서, $[M]$ 과 $[K]$ 는 각각 질량행렬과 강성행렬이고, $\{U\}$ 는 절점에서의 전체변위벡터, $\{Q\}$ 는 외부에서 가해진 동적하중 또는 지진하중에 의한 하중벡터이다. 주파수 ω 에서 조화운동에 대해 하중벡터와 변위벡터는 식 (9)와 같다고 가정할 수 있다.

$$\{\hat{Q}\} = \{Q\} \exp(i\omega t) \quad (9.a)$$

$$\{\hat{U}\} = \{U\} \exp(i\omega t) \quad (9.b)$$

여기서 $\{Q\}$ 와 $\{U\}$ 는 각각 주파수 ω 에서의 복소력벡터와 복소변위벡터이다 따라서 각각의 주파수에 대한 운동방정식은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$[C] \{U\} = \{Q\} \quad (10)$$

여기서, $[C]$ 는 주파수에 영향을 받는 복소 동적강

성행렬로 $[C] = [K] - \omega^2 [M]$ 이다. 지반-구조물 전체 시스템의 운동방정식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_{ii}^{II} + X_{ii} & -C_{iw}^{II} + X_{iw} \\ -C_{iw}^{II} + X_{iw} & -C_{ww}^{II} + X_{ww} \\ C_{is}^{III} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_i \\ U_w \\ U_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{ii}U_i' + X_{iw}U_w' \\ X_{wi}U_i' + X_{ww}U_w' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서, 그림 3과 같이 아래첨자 b, i, w, g, s, 그리고 f는 각각 전체 시스템의 경계, 지반과 구조물사이의 경계, 굴착지반내, 자유장의 남은 부분, 구조물의 남은 부분, 그리고 굴착지반전체에서의 절점을 나타내며, 위 첨자 I, II, 그리고 III은 각각 자유장, 굴착지반, 그리고 구조물의 부분구조 시스템을 의미한다. 또한 위 식에서 복소동적강성행렬은 단순히 자유장과 구조물의 동적강성에서 굴착지반의 질량과 강성을 뺀 것을 의미한다. 그리고,

$$[X_{if}] = \begin{bmatrix} X_{ii} & X_{iw} \\ X_{wi} & X_{ww} \end{bmatrix}$$

는 임피던스행렬로 자유장 부분구조시스템으로부터 계산할 수 있고, $(U_i') = \begin{pmatrix} U_i' \\ U_w' \end{pmatrix}$ 는 자유장 부분구조 시스템의 상호작용 절점에서의 자유장 운동으로부터 계산할 수 있다.

4.1.2 부분구조제거법(substructure subtraction method)

부분구조제거법은 기본적으로 유연부피법과 같은 부분구조개념을 이용한다. 부분구조제거법에서는 지반-구조물 전체 시스템을 그림 4와 같이 자유장, 굴착지반, 그리고 구조물의 3개의 부분구조 시스템으로 나눈다. 그러나 부분구조제거법에서 지반-구조물 상호작용은 단지 부분구조 시스템사이의 공통경계면, 즉 구조물 기초의 경계에서만 일어난다고 가정한

다. 이 때문에 부분구조제거법이 유연부피법보다 적은 양의 임피던스해석을 수행하게 된다. 부분구조제거법에서 부분구조 시스템에 대한 운동방정식은 유연부피법의 운동방정식과 같으며, 전체 시스템의 운동방정식은 식 (12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_{ii}^{II} + X_{ii} & -C_{iw}^{II} & C_{is}^{III} \\ -C_{iw}^{II} & -C_{ww}^{II} & 0 \\ C_{is}^{III} & 0 & C_{ss}^{III} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_i \\ U_w \\ U_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{ii}U_i' \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서, 첨자는 유연부피법에서의 규칙을 따른다.

4.1.3 해석 단계

앞에서 구성한 운동방정식을 기초로 지진하중을 받는 지반-구조물 연계 시스템을 지반-구조물 상호작용을 고려하여 주파수 영역에서 해석할 수 있다. 해석 단계는 다음과 같다.

① 자유장 해석

자유장 모델에 대한 고유치 문제(eigenvalue problem)를 풀어 자유장의 상호작용 절점에서의 자유장 변위, $\{U_i'\}$ 를 계산한다.

② 임피던스 해석

자유장 모델에서 한 절점에 작용하는 단위조화하중에 의해 상호작용 절점에서 발생하는 동적변위를 계산하여 유연도행렬(compliance matrix)을 구성한다. 이 유연도행렬로부터 자유장의 상호작용 절점에서의 임피던스행렬, $\{X_{if}\}$ 를 계산한다.

③ 하중벡터 구성

④ 복소 동적강성행렬 구성

⑤ 선형운동방정식의 구성 및 계산

유연부피법은 식 (11) 그리고 부분구조제거법은 식 (12)를 이용하여 해를 구한다.

표 3. 부분구조법의 요약

해석	강성경계 (Rigid Boundary)	유연경계 (Flexible Boundary)	유연부피 (Flexible Volume)	부분구조제거 (Substructure Subtraction)
지반응답 해석				
산란 해석			None	None
임피던스 해석				
구조응답 해석	Standard	Standard	Standard	Standard

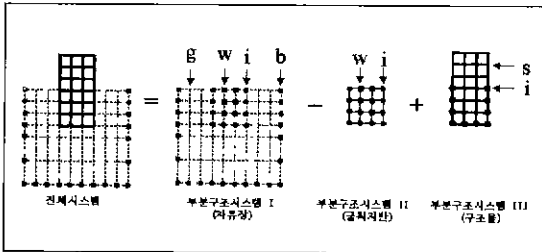


그림 3. 유연부피법의 부분구조시스템

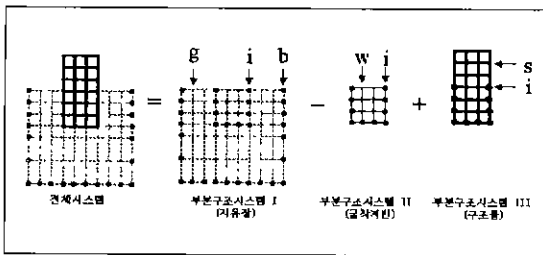


그림 4. 부분구조제거법의 부분구조시스템

5. 내진설계

5.1 설계조건

해석대상으로 그림 5에 나타난 단순합성형교의 교각을 지지하는 균말뚝기초를 선정하였으며, 그림 6

과 그림 7은 각각 내진해석을 수행한 말뚝기초의 제원과 지층 구성을 보여준다.

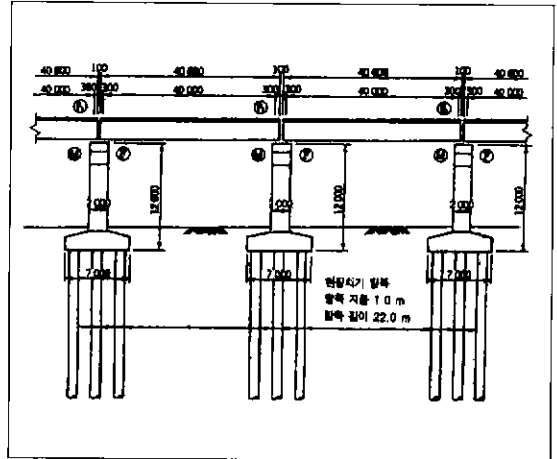


그림 5. 교량의 종단도

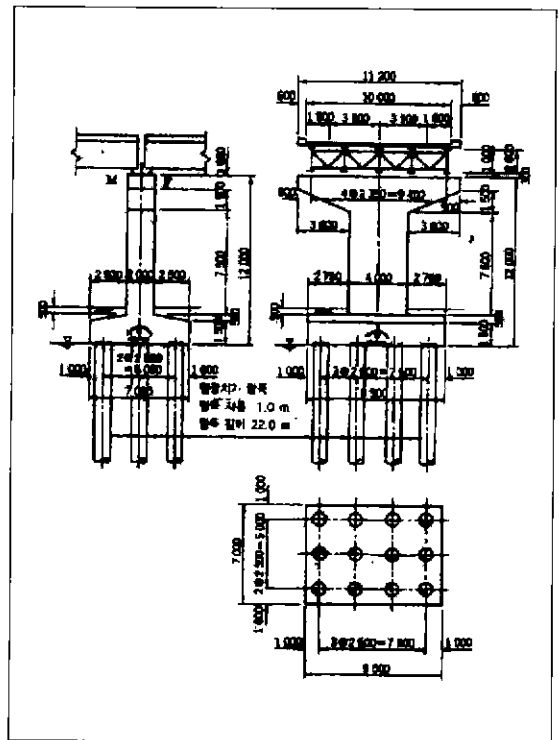


그림 6. P3 교각의 형상 치수도

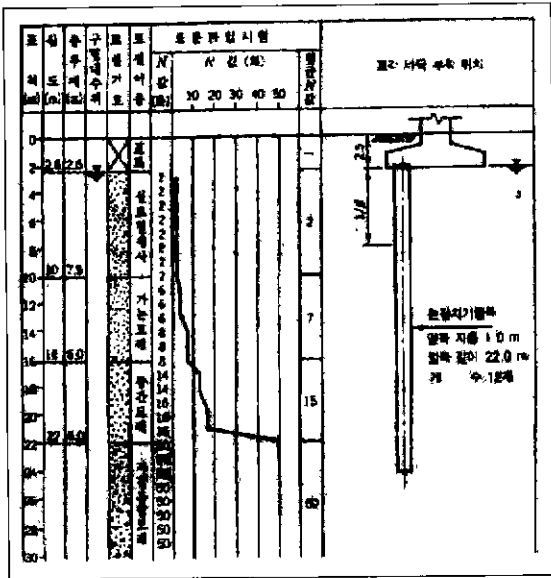


그림 7. 지층구성

5.2 액상화의 검토

그림 7에서 알 수 있듯이 지표면에서 20m까지는 사질토이며 N치도 2 ~ 16이고 지하수위도 높은 느슨한 포화 사질토이므로 지진시 액상화 가능성이 우려되어 일본도로교시방서 방법에 따라 액상화에 대한 검토를 하였으며 검토 결과를 표 4에 나타내었다.

일본도로교방법에서는 지반의 액상화 전단저항력 R을 N치와 유효상재압을 고려하는 R₁, 평균입경 D₅₀을 고려하는 R₂ 그리고 세립분 F₂₀₀의 영향을 고려하는 R₃를 더하여 산정하며 이 값을 지진시 발생하는 전단응력 L과 비교하여 액상화 안전율 F_L이 1보다 크면 액상화 위험이 없다고 판정한다. 본 예제에서는 모든 깊이에서 F_L이 1보다 크므로 액상화에 대하여 안전하다.

우리나라 도로교 설계기준에서는 Seed & Idriss (1971)방법에 의하여 지반의 액상화 검토를 하도록 규정하고 있으나 본 강좌에서는 말뚝기초의 내진설계를 주로 다루었으므로 지반의 액상화에 관한 상세한 검토는 생략하고 참고문헌 (과학기술, 1997)에 있는 것을 그대로 인용하였다.

표 4. 액상화의 검토

5.3 등가 정적 하중법에 의한 내진해석 예제

5.3.1 등가 지진하중의 계산

(1) 등가 수평하중의 계산

모래층의 N치가 15이하이므로 내진설계기준(Ⅱ) (건설교통부, 1997)에서 분류한 SE지반에 해당한다. 사례교량은 지진구역(Ⅱ)에 건설되고, 1등급 교량이며, 붕괴방지 수준으로 설계한다고 가정하면 설계수평지진계수 k_h는 표 1을 참조하여 0.24로 결정할 수 있으나, k_h는 계산의 편의를 위하여 0.25로 가정하였다. 등가 수평하중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_h = 0.25 \times (460 + 565.82) = 256.46 \text{ tonf}$$

(2) 등가 지진 하중의 계산

교축방향과 교축직각방향의 등가지진하중을 계산하면 표 5와 같다.

표 5. 교축방향과 교축직각 방향의 등가지진하중

	교축방향	교축 직각 방향
연직지진하중(tonf)	1099.85	1099.85
수평지진하중(tonf)	256.46	256.46
모멘트(tonf · m)	1973.92	2238.42

5.3.2 변위법에 의한 해석

(1) 확대기초중심의 변위 계산

예제에서 사용한 사례말뚝의 경우 수직 말뚝이므로 확대기초중심의 변위는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\delta_x = \frac{H_o \cdot A_{aa} - M_o \cdot A_{xa}}{A_{xx} \cdot A_{aa} - A_{xa} \cdot A_{ax}} \quad (13)$$

$$\delta_y = \frac{V_o}{A_{yy}} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{-H_o \cdot A_{ax} + M_o \cdot A_{xx}}{A_{xx} \cdot A_{aa} - A_{xa} \cdot A_{ax}} \quad (15)$$

여기서, 각 계산식에 사용된 계수들에 대한 설명은 지면관계상 생략하였으며, 변위의 계산결과는 표 6에 요약하였다.

표 6. 계산 결과의 요약

착안점	변위/응력	단위	교축방향		교축직각방향	
			평상시	지진시	평상시	지진시
O점의 변위	δ_x	cm	0	0.78044	0	0.68772
	δ_y	cm	0.21900	0.19313	0.21900	0.19313
	α	rad	0	0.00097889	0	0.00060627
제 1열	P_{11a}	tonf	103.93	207.78	103.93	199.55
	P_{11b}	tonf	0	21.371	0	21.371
	M_{11}	tonf·m	0	-29.057	0	-38.242
제 2열	P_{12a}	tonf	103.93	91.654	103.93	127.62
	P_{12b}	tonf	0	21.371	0	21.371
	M_{12}	tonf·m	0	-29.057	0	-38.242
제 3열	P_{13a}	tonf	103.93	-24.447	103.93	55.689
	P_{13b}	tonf	0	21.371	0	21.371
	M_{13}	tonf·m	0	-29.057	0	-38.242
제 4열	P_{14a}	tonf	-	-	103.93	-16.240
	P_{14b}	tonf	-	-	0	21.371
	M_{14}	tonf·m	-	-	0	-38.242

(2) 말뚝머리의 반력 계산

수직 말뚝의 경우 말뚝머리반력은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P_{N1} = k_v (\delta_y + \alpha \cdot X_1) \quad (16)$$

$$P_{H1} = k_1 \cdot \delta_x - k_2 \cdot \alpha \quad (17)$$

$$M_{T1} = -K_3 \cdot \delta_x + K_4 \cdot \alpha \quad (18)$$

여기서, 위 식에서 사용된 계수들에 대한 상세한 설명은 지면관계상 생략하였으며 계산된 말뚝머리 반력값을 표 6에 요약하였다.

5.3.3 간편한 내진설계절차에 의한 해석 결과

(1) 최대하중작용 말뚝선정

3DPILE에 의하여 교축 및 교축직각 방향으로 해석을 수행하여 최대지진하중을 부담하는 말뚝기초를 선정하였다. 교축직각 방향으로 등가지진하중이 작용할 경우 제 1열에 있는 4개의 말뚝이 최대의 하중을 부담하였으며 말뚝두부의 고정조건에 따라 표 7에 나타내었다. 여기서 PAR에 의한 지반-말뚝-상부구조물(SPS)의 상호작용을 고려한 해석에서는 상부구조물의 자중은 각 말뚝에 분배하여 집중질량화하였으며, 기둥과 확대기초의 자중은 균말뚝해석결과에 따라 각 말뚝에 분배하여 집중질량화하였다.

(2) 단일 말뚝의 해석결과

지진시 최대 반력이 작용되는 말뚝에 대하여 LPILE^{PLUS}와 PAR을 사용하여 해석을 수행할 경우 시공조건과 말뚝머리 고정조건을 고려하여 표 8과 같이 다양한 해석을 수행할 수 있다. 여기서, 시공조건은 확대기초만 시공되어 연직하중이 작용하지 않은 상태에서 말뚝기초의 머리를 고정시킨 경우(BC1), 상부구조물까지 시공되어 연직하중이 작용되고 말뚝머리가 고정된 경우(BC2) 그리고 상부구조물까지 시공된 상태에서 지진에 의하여 말뚝머리가 힌지된 경우(BC3)로 구분할 수 있다. 그리고 PAR에서는 지진진동을 입력시켜 해석을 수행하는 경우(GM)와 지반-말뚝-상부구조물의 상호작용을

고려하여 해석하는 경우 (SPS)를 추가하였다.

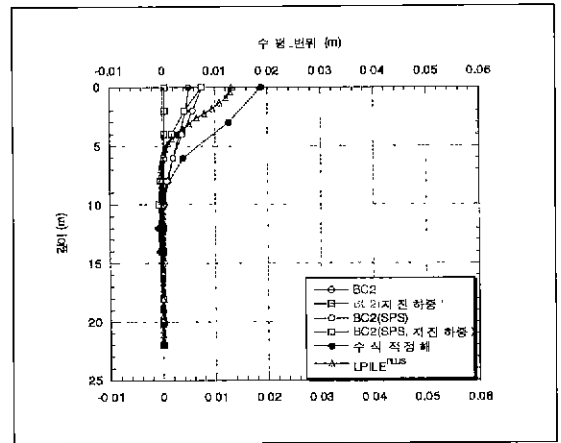
LPILE^{PLUS}와 PAR을 이용하여 해석가능한 조건들을 표 8에 요약하였으며, 표 8에서 상부구조물까지 완성되고 말뚝머리가 고정된 경우에 대한 해석결과를 그림 8에 나타내었다. 말뚝에 발생하는 수평변위, 전단력, 모멘트를 말뚝의 관입깊이에 따라 도시하였다.

표 7. 지진하중에 의해 말뚝에 발생하는 최대반력

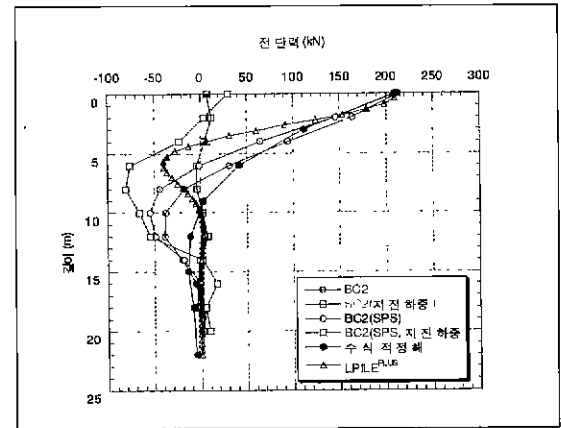
말뚝 고정조건	해석조건	해석수단	수직력(tonf)	수평력(tonf)	모멘트(lbf·m)
고정	일반	LPILE ^{PLUS} PAR	254.87	21.38	-38.59
	SPS상호작용	PAR	19.24(상부구조물) 253.63(교각+확대기초)	21.38	-38.59
한지	일반	LPILE ^{PLUS} PAR	226.13	21.38	-38.59
	CPS상호작용	PAR	19.24(상부구조물) 206.89(교각+확대기초)	21.38	-38.59

표 8. 다양한 해석 조건 요약표

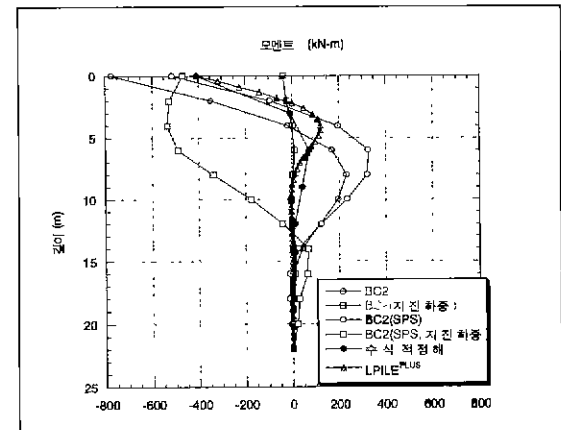
해석조건	말뚝 고정조건	수직력	수평력	모멘트	지진지동	SPS	
						상호작용	기호구분
LPILE ^{PLUS}	1 고정	X	O	O	X	X	BC1
	2 고정	O	O	O	X	X	BC2
	3 한지	O	O	X	X	X	BC3
PAR	1 고정	X	O	O	X	X	BC1
	고정	X	X	O	O	X	BC1(GM)
	고정	X	O	O	X	O	BC1(SPS)
	고정	X	X	O	O	O	BC1(SPS, GM)
	2 고정	O	O	O	X	X	BC2
	고정	O	X	O	O	X	BC2(GM)
	고정	O	O	O	X	O	BC2(SPS)
	고정	O	X	O	O	O	BC2(SPS, GM)
	3 한지	O	O	X	X	X	BC3
	한지	O	X	X	O	X	BC3(GM)
한지	O	O	X	X	O	BC3(SPS)	
한지	O	X	X	O	O	BC3(SPS, GM)	



(a) BC 2 (수평변위)



(b) BC 2 (전단력)



(c) BC 2 (모멘트)

그림 8. 해석코드 (LPILE PLUS 와 PAR)에 의한 해석결과 비교

5.3 지반-말뚝 동적상호작용을 고려한 동적 해석 예제

지반-말뚝 동적상호작용을 고려한 말뚝기초의 동적 해석은 주로 수치해석을 통해 이루어진다. 본 예제에서 사용한 해석프로그램은 지반-구조물 상호작용과 지반의 반무한성을 고려하여 해석할 수 있는 'SASSI 2000'이다. SASSI 2000을 이용하여 지진하중을 받는 지반-말뚝 시스템을 해석하였다.

5.3.1 해석 프로그램 - SASSI 2000

SASSI는 "A System for Analysis of Soil-Structure Interaction"의 약자로 U.C. Berkeley의 J. Lysmer 교수에 의해 개발된 상용 프로그램이다. SASSI는 지반-구조물 상호작용을 해석하기 위해 부분구조법 중에서 유연부피법과 부분구조제거법을 사용한다.

SASSI는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- ① 지반은 반무한인 탄성 또는 점탄성 수평지층으로 이루어지며, 강성기반암 및 탄성 또는 점탄성 반무한체를 모델링할 수 있다.
- ② 구조물은 2차원 또는 3차원 유한요소로 인해, 굴착지반은 평면변형률요소 또는 3차원 고체요소로 인해 이상화된다.
- ③ 입력하중으로 3방향의 지진하중과 충격하중, 기계기초로부터 전달되는 하중과 같은 외부하중을 사용할 수 있다. 지진하중 또는 충격하중과 같은 순간하중(transient load)은 FFT(Fast Fourier Transform)기법을 이용하여 처리한다.
- ④ 재료감쇠는 주파수와 무관한 복소상수를 사용하여 고려하며, 요소마다 다른 값을 사용할 수 있다.
- ⑤ 모든 상호작용 절점은 지반을 구성하는 수평지층의 경계에 있어야 한다.
- ⑥ 현재 사용 가능한 유한요소에는 3차원 고체요소, 3차원 보요소, 4절점 판/셸 요소, 2차원 4절점 평면변형률요소, 3차원 스프링요소, 그리고 3차원 강성/질량 행렬요소가 있다.
- ⑦ 선형해석으로 제한되어 있으나, 등가선형방법

(equivalent linear method)이라는 반복기법을 사용하여 근사적으로 비선형 해석을 수행할 수 있다.

⑧ 15~20개의 주파수에서의 응답으로부터 복소 응답함수를 구하는 효과적인 보간기법을 사용한다.

SASSI는 몇 개의 서로 연관된 프로그램 모듈로 이루어져 있다. 그림 9는 SASSI를 구성하는 모듈을 나타내며, 각 모듈은 다음과 같은 역할을 한다.

① SITE

모듈 SITE는 전달경계를 위한 고유치문제를 구성하여 풀고, 자유장 응답해석을 수행한다.

② POINT

모듈 POINT는 지표면 또는 수평지층의 경계에 작용하는 단위조화하중에 대한 응답해석을 수행한다.

③ HOUSE

모듈 HOUSE는 구조물과 굴착지반의 전체 강성행렬과 질량행렬을 구성한다.

④ ANALYS

모듈 ANALYS는 MATRIX, LOAD, 그리고 SOLVE의 프로그램으로 구성되어 있으며, 상호작용절점에서 임피던스행렬을 계산하며 입력운동에 대한 가속도 또는 변위의 전달함수를 계산한다.

⑤ MOTION

모듈 MOTION은 가속도, 속도, 그리고 변위의 시간이력을 계산하며 전달함수와 응답스펙트럼을 출력한다.

⑥ STRESS

모듈 STRESS는 요소에서의 최대 응력(변형률), 힘, 그리고 모멘트 등을 계산한다.

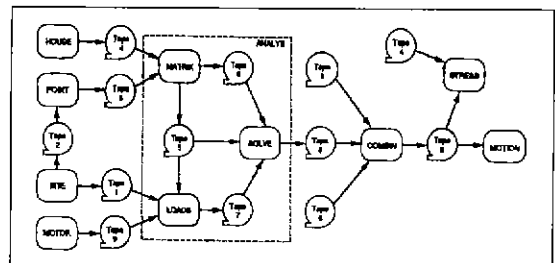


그림 9. SASSI를 구성하는 모듈

5.3.2 해석 조건

(1) 해석 대상

해석대상은 그림 5와 6에 나타난 교량기초인 군말뚝(3열 4행)으로서 말뚝의 근입길이는 22m, 지름은 1m이다. 본 예제에서는 군말뚝과 교각을 3차원으로 모델링한후 인공지진과 1개에 대하여만 해석하였다. 실제 설계시에는 교축방향과 교축직각방향의 해석을 모두 수행하여야 하며, 지진파는 실지진 기록을 포함하여 3개 이상을 사용하여야 한다.

(2) 입력물성값

지반의 입력물성값은 표 9에 정리하였다. G_{max} 값은 표준관입시험과 콘관입시험결과로부터 식 (19.a) (일본 PHRI)를 이용하여 경험적으로 산정할 수 있다.

●사질토 지반

$$G_{max} = 1440 \times N^{0.68} \quad (\text{tonf/m}^2) \quad (19.a)$$

●점성토 지반

$$G_{max} = 170 \times q_u \quad (\text{tonf/m}^2) \quad (19.b)$$

본 예제에서는 식 (19.a)로부터 각 지층의 평균 N 값을 이용하여 G_{max} 값을 구하였고, SASSI 해석시 입력된 전단탄성계수 G_s 는 G_{max} 값의 40~60%값으로 가정하였다. 상부 10m지층은 큰 변형이 예상되어 G_{max} 값의 40%를 이용하였고, 나머지 지층은 G_{max} 값의 60%를 이용하였다. G_s 값을 정밀하게 구하기 위해서는 전단변형을 발생에 따른 전단탄성계수 감소효과를 고려하여야 하는데, 이 값은 보통 SHA-

표 9 지반의 입력 물성값

지층 번호	층의 종류	두께 (m)	N값	G_{max} (kPa)	G_s (kPa)
1	모래	10	2	23070	9228
2	모래	3	6	48690	29214
3	모래	3	8	59210	35526
4	모래	2	14	86640	51984
5	모래	1	15	90800	54480
6	모래	3	16	94870	56922
7	지갈+모래	∞	50	205900	123540

KE 등의 지진응답해석 프로그램을 이용하여 각 지층에서 얻어진 유효 전단탄성계수값을 사용한다.

말뚝의 입력물성값은 표 10과 같다.

표 10. 말뚝의 입력물성값

단위중량(t/m^3)	탄성계수(kPa)	포아송비
25	2.5E+7	0.2

(3) 모델링

지반-말뚝 시스템은 그림 8과 같이 3차원으로 모델링하였다. 지반은 7개의 수평지층과 반무한체로 나누어 3차원 고체요소(solid element)를 사용하여 모델링하였다. 반무한체는 지층 7번과 같은 물성값을 갖는다. 말뚝과 기초부 또한 3차원 고체요소를 사용하여 모델링하였는데, 말뚝의 경우 원형단면을 6개의 삼각형 요소를 사용하여 원형에 가깝게 모델링하였다. 기초상부의 교각은 보요소로 모델링하였고, 보요소 상부에 집중질량을 설치하여 교량상판무게를 고려하였다. 그림에서 밑금친 면을 대칭면으로 하여 3×4 군말뚝을 모델링하였다. 지반과 말뚝의 재료감쇠를 고려하기 위한 이력감쇠비는 5%를 사용하였다.

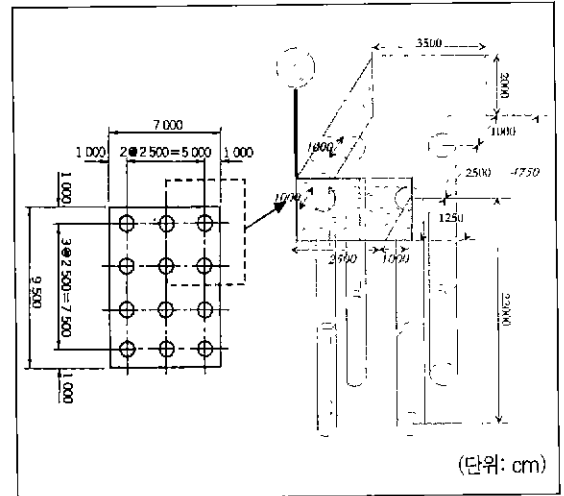


그림 10. 해석대상의 모델링

(4) 입력 지진가속도

입력 지진가속도는 인공지진파를 사용하였다. 해석대상이 지진 II구역에 위치하고 지진재현주기 1000년인 내진 1등급 붕괴방지 수준으로 설계된다고 가정하면 기반암에서의 최대 설계 가속도 크기는 0.098g이다. 지진파가 작용하는 기반면은 전단파 속도 기준으로 760~1500m/s 범위의 보통암 지반으로 고려하므로, 지진 II구역과 지반종류 S_B 에 해당하는 표준설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파를 생성하여야 한다. 본 예제에서는 SIMQKE 프로그램을 이용하여 지진파를 생성하였다. 그림 9는 작성된 인공지진파 가속도 시간이력곡선이다. 이러한 지진가속도를 지층 7과 반무한체의 경계에 적용하였다.

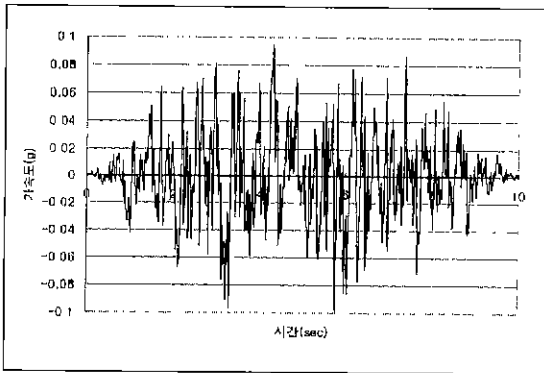


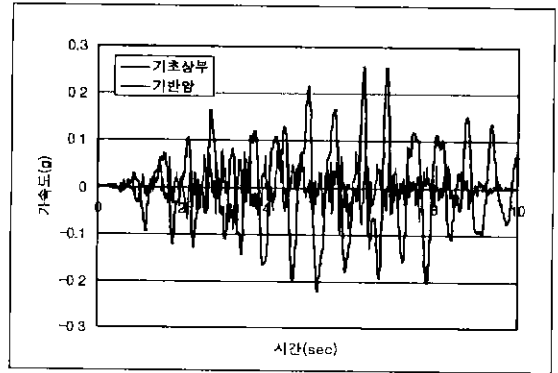
그림 11. 해석에 이용된 인공지진파 가속도시간이력

5.3.3. 해석 결과

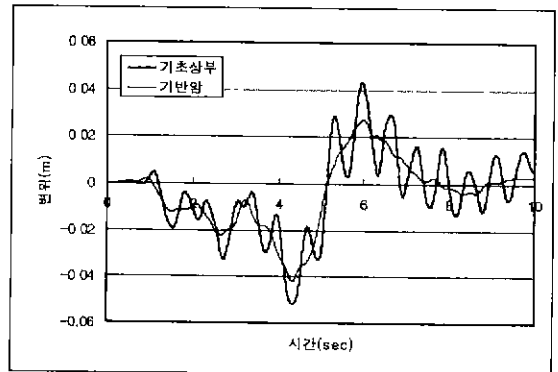
SASSI 2000을 이용하여 지반-말뚝 시스템을 3차원으로 모델링하여 주파수 영역에서 해석하였다.

그림 10은 기초상부 중앙에서의 지진응답을 나타낸다. 그림 10(a)는 기반암과 기초의 가속도 시간이력, 그림 10(b)는 기반암과 기초의 절대변위 시간이력 그리고 그림 10(c)는 기반암의 운동에 대한 기초상부 중앙에서의 상대변위 시간이력을 나타낸다. 기초상부의 최대가속도는 0.256g로서 기반암의 최대값 0.098g보다 약 2.6배 증폭되었다. 절대변위는 기초상부에서 최대 5.1cm, 기반암에서 최대 4.2cm

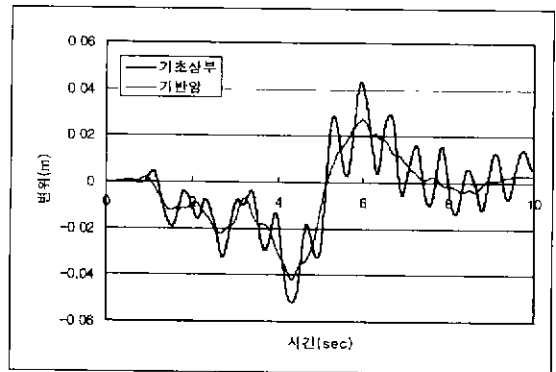
발생하며, 기초와 기반암의 상대변위는 최대 2.1cm가 발생하였다.



(a) 가속도 시간이력



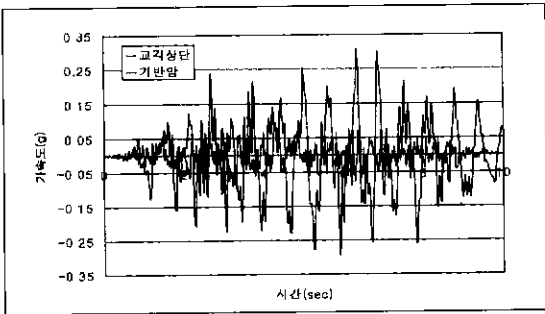
(b) 절대변위 시간이력



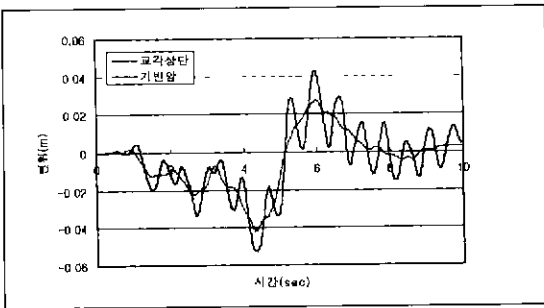
(c) 기반암과 기초의 상대변위 시간이력

그림 12. 기초상부 중앙에서의 지진응답

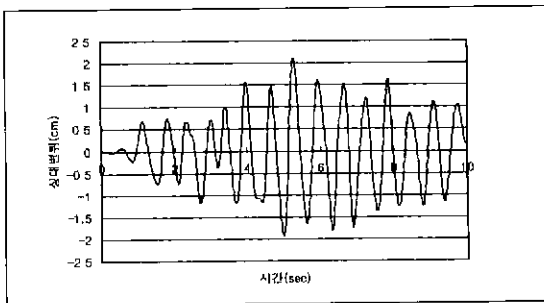
그림 13은 교각상단에서의 지진응답을 나타낸다. 그림 11(a)는 기반암과 교각상단의 가속도 시간이력, 그림 11(b)는 기반암과 교각상단의 절대변위 시간이력 그리고 그림 11(c)는 기반암의 운동에 대한 교각상단의 상대변위 시간이력을 나타낸다. 교각상단의 최대가속도는 0.304g로서 기반암의 최대값 0.098g보다 약 3.1배 증폭되었다. 절대변위는 교각상단에서 최대 5.3cm 발생하며, 상대변위는 최대 2.1cm가 발생하였다.



(a) 가속도 시간이력



(b) 절대변위 시간이력



(c) 기반암과 교각상단의 상대변위 시간이력

그림 13. 교각상단에서의 지진응답

그림 14는 기초상부에 대한 교각상단의 상대변위 시간이력으로서 교각자체의 횡변위가 최대 0.2cm로 작게 발생하였다.

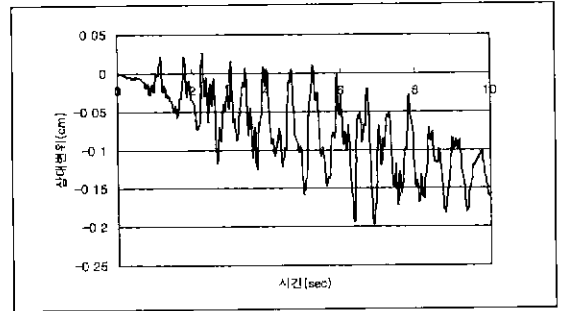
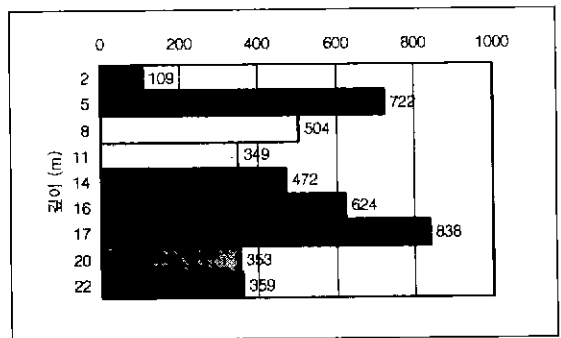
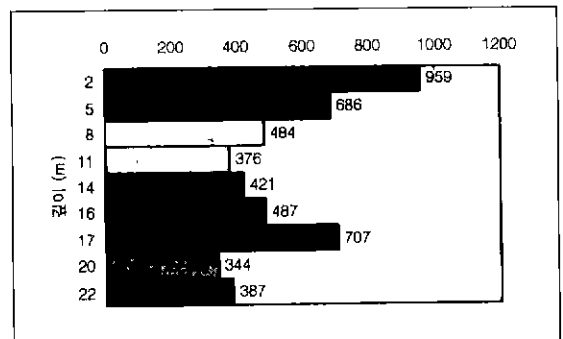


그림 14. 기초상부와 교각상단의 상대변위

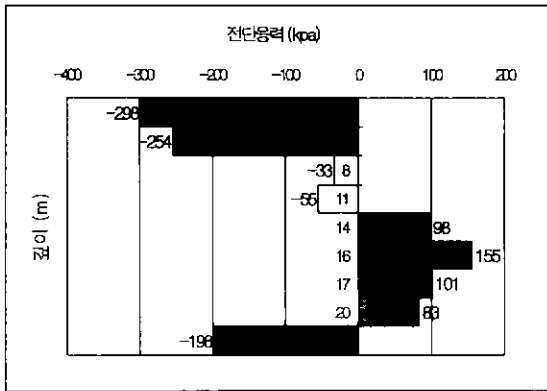
동적 해석결과 중앙 말뚝에 최대 단면력이 발생하였으며, 각 요소에 발생한 단면력 (축방향 압축응력, 인장응력 그리고 전단응력)을 그림 13에 도시하였으며, 보요소를 사용하지 않았으므로 휨응력은 구할 수 없었다.



(a) 축방향 압축응력



(b) 인장응력



(b) 인장응력

그림 15. 중앙 말뚝의 각 요소에 발생하는 단면력

참고문헌

1. 건설교통부(1997), "내진설계연구(Ⅱ) (내진설계 성능기준과 경제성 평가)", 한국 지진 공학회, 한국건설기술 연구원.
2. 건설교통부(2000), "도로교 설계기준", 한국도로교통협회, 한국지반공학회
3. 과학기술(1997), "이해하기 쉬운 교량하부구조물의 내진 설계".
4. 김수일, 박종관, 박인준, 박영호 (2000), "지반진동과 내진설계(Ⅱ)", 지반, 2000.8, 한국 지반공학회, pp32-44.
5. 목영진(1998), "교량기초의 내진설계", 도로교의 내진설계, 한국지진공학회 제1회 기술강 습회, (사)한국지진공학회(1998), pp185-253.
6. 서정혜(2000), "도로교 말뚝기초에 대한 간편한 내진설계 절차제안", 2000.2, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문.
7. 日本道路協會 (1996), "道路橋示方書・同解説", IV下部構造編, V耐震設計編.
8. Abghari, A. & Chai, J. (1995), "Modeling of Soil - Pile - Superstructure Interaction for Bridge Foundations", Performance of Deep Foundations

under Seismic Loading, edited by Turner, J. P. ASCE Geotechnical Special Publication, No. 51, pp 45 - 59.

9. Choi, Y. & O'NEILL, M.W (1997), "Response of Soil Plug to Horizontal and Vertical Excitation", Proc. of the 7th (1997) ISOPE Conference, Honolulu, USA. May, 1997, Vol. 7, pp772 - 777.
10. Gasparini, D.A., and Vanmarcke, E.H.(1976)," 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.
11. John Lysmer, Farhang Ostadan, Chih Cheng Chin(1999), 'SASSI 2000 - Theoretical Manual' .
12. PMB Engineering Inc. (1994), "PAR (Pile Analysis Routines) Users Manual, Theoretical Manual, Reference Manual," San Francisco, California.
13. Port and Harbor Research Institute(1997), "Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land", A.A. Balkema.
14. Reese, L.C., Vallabhan, C.V.G. & Wang, S.T.(1994), "3DPILE, Analysis of three dimensional pile groups subjected to axial and lateral loading", Ensoft, INC.
15. Reese, L.C & Wang, S.T.(1997)", LPILE PLUS 3.0 For WINDOWS, Technical Manual of Documentation of Computer Program". Austin, TX, USA.
16. Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 107, No. SM9, pp 1249 - 1274.