

# 구조물 내진설계를 위한 기초지반체계 동특성에 관한 연구

## Study on the Dynamic Characteristics of Foundation-Soil System for the Seismic Analyses of Structures

김 용 석\*  
Kim, Yong Seok

### 국문요약

구조물 동적거동이 지반과 기초 특성에 따라 영향을 받는다는 것은 인식되었지만, 구조물 내진설계를 위한 설계기준이 지반의 본질적인 복잡성과 기초-지반체계에 대한 체계적인 연구부족으로 지반특성을 부분적으로만 반영하고 있어 불안정하거나 너무 안전한 결과를 초래한다. 이 연구에서는 전단파속도, 지반깊이, 기초 근입깊이 및 말뚝기초의 영향을 평가하여 구조물 내진해석을 위한 기초-지반체계의 운동학적 상호작용 영향을 고찰하였으며, 지반과 기초 특성을 고려한 합리적 내진해석을 위해 지반체계에 대한 수정된 분류기준을 제안하였다. 말뚝기초를 포함한 중형이나 대형 문헌기초의 경우, 기초-지반체계의 운동학적 상호작용 영향을 고려하기 위해서는 기초밑 지반깊이를 최소한 60m까지 고려해야 하고, 말뚝유무에 관계없이 기초-지반체계의 회전운동도 구조물 내진해석에 포함되어야 한다.

**주요어 :** 내진해석, 문헌기초, 운동학적 상호작용

### ABSTRACT

It is recognized that the dynamic response of a structure is affected by the characteristics of the soil layer and foundation. However the design codes for the seismic design of structures are partially reflecting the characteristics of the soil layers due to the inherent complexity of them and the lack of systematic study results for the foundation-soil system, and leading to unconservative or too conservative results. In this study, the kinematic interaction effects of foundation-soil system was investigated for the seismic analyses of structures estimating the effects of the shear wave velocity, the depth of the soil layer, the embedment of a foundation and pile foundation, and the modified classification criteria of soil layers are proposed for the reasonable seismic analyses of structures considering the characteristics of soil layers and foundations. For the embedded medium or large foundations (including pile foundations), at least 60m soil layer below the foundation should be considered for the seismic analyses of structures to take into account the kinematic interaction effects of the foundation-soil system, and also the rocking motion of foundation-soil system with or without piles should be included in the seismic analyses of structures.

**Key words :** seismic analysis, embedded foundation, kinematic interaction

## 1. 서 론

미국 Northridge 지진과 일본 고베지진 이후 지진피해에 대한 우려가 고조되고 구조물 내진설계에 대한 관심이 커지면서 합리적이고 체계적인 내진설계가 요구되고 있지만, UBC 등의 내진설계 기준에

서 허용된 정적내진설계 방법은 지반의 특성을 단편적으로 반영하고 있어 이 기준에 의한 내진설계 시 부적합한 결과를 초래할 수도 있는 것으로 나타나 있다. 그러나 지반의 특성은 매우 다양하고 복잡하여 그 영향을 일관적으로 구조물 내진설계에 반영하기가 어렵기 때문에 보다 체계적이고 합리적인 연구를 통해 지반특성에 대한 고려가 요구되고 있다.

\* 정회원 · 목포대학교 건축공학과 조교수

일본 내진설계 규준에서는 지반을 지반고유주기가 0.4, 0.6, 0.8초인 제1종 경질지반, 제2종 중질지반 및 제3종 연약지반으로 분류하여, 구조물의 설계용 1차 고유주기에 따른 진동특성계수( $R_t$ )를 규정한 식을 사용하고 있다.<sup>(1)</sup>

또 미국 UBC<sup>(2)</sup>에서는 기초지반을 암반(전단파속도 762m/sec 이상)이나 60m이하의 매우 단단한 지반, 60m이상의 매우 단단한 지반, 6m이상의 연약에서 중질정도 점토와 12m이하의 연약점토로 구성된 21m이상의 지반, 전단파속도가 152m/sec이하인 연약점토가 12m이상인 지반등 4가지로 분류하여 지반계수를 1.0, 1.2, 1.5 및 2.0 으로 규정하였다.

한편 국내 내진설계 규준에서는 미국 UBC를 인용하여 기초지반을 3종류로 분류하였는데, 60m 미만의 매우 단단한 지반, 60m이상 매우 단단한 지반이나 단단한 지반, 9m이상의 보통이하 점토 또는 느슨한 모래지반 3가지 종류로 분류하고, 각 지반별 지반계수는 1.0, 1.2, 1.5로 규정하였다.<sup>(3)</sup>

그러나 현 내진규준은 이상적이고 전형적인 기초지반에 대해서만 고려되었기 때문에 지하실이 있는 문힌 기초지반이나 말뚝기초로 이루어진 기초지반에 의한 영향을 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 UBC 지반 분류체계를 고려하여 기초지반을 분류하고, 얕은기초와 말뚝기초에 대해 기초가 묻히지 않은 경우와 묻힌 경우로 구분하여 기초지반의 특성을 분석 파악하였다.

## 2. 모델링

기초지반의 수평방향 동특성을 파악하기 위하여 무한강성을 지닌 무질량 기초와 지반에 대한 유사3차원 유한요소해석을 주파수영역에서 실시하였다.<sup>(4)(5)</sup> 주파수 영역은 구조물 내진설계에서 가장 관심이 많은 0-5Hz까지를 고려하였다.

지반층은 암반이나 상대적으로 매우 단단한 지반 위에 놓인 균질한 토질로 이루어진 지반으로 가정하였으며, 지반의 역학적 특성은 선형 등방성 탄성체로써 점성을 띤 것으로 가정하였다.

지반의 전단파속도( $C_s$ )는 305, 244, 183 및 152m/sec (1000, 800, 600 및 500ft/sec)로 분류하였으며, 각 지반의 단위중량은 2.2, 2.1, 2.1 및 2.0t/m<sup>3</sup> 로 가정하였고, Poisson비와 감쇠비는 각각 0.3, 0.05 로 가정하였는데, 각 지반의 개략적인 N치는 50, 20, 10 및 4로 지반을 단단한 지반, 보통지

반 및 연약지반으로 분류할 수 있다.<sup>(6)</sup>

또 말뚝기초의 경우, 말뚝은 선단지지 말뚝으로 말뚝의 직경은 35cm이고, 탄성계수, 단위중량, Poisson비 및 감쇠비는 각각 210t/cm<sup>2</sup>, 2.4t/cm<sup>3</sup>, 0.25 및 0.05로 가정하였으며, 말뚝기초는 N치가 20 이하(전단파속도 244m/sec이하) 지반에서만 사용하였는데, 무리말뚝 갯수는 지내력과 기초크기에 따라 지내력이 10t/m<sup>2</sup> 이하인 소형기초( $R=5m$ )의 경우는 25(5x5)개, 지내력이 20t/m<sup>2</sup>이하이고 중간기초( $R=15m$ ) 및 대형기초( $R=25m$ )의 경우는 324(18x18) 및 1089(33x33)개를 사용하였다.

기초지반 깊이( $H$ )는 60m(200ft), 30m(100ft), 21m(70ft), 12m(40ft) 및 6m(20ft)인 경우를 고려하였으며, 기초깊이( $E$ )는 0m, 7.5m 및 15m경우 ( $E/R=0, 0.5, 0.6$  및 1.5)에 대하여 연구를 수행하였다.

## 3. 기초지반 강성 변화

기초크기가 서로다른 기초지반에 대한 주파수영역 강성해석 결과, 기초의 크기, 기초의 근입깊이, 지반의 강성, 지반의 깊이 및 말뚝 유무에 따라 강성차이가 나타났으나 주파수에 따른 강성변화는 전반적인 유사한 것으로 판단되었다.

기초지반의 수평강성 특성을 살펴보면, 지반의 전단파속도가 빠를수록 지반강성이 크게 나타나고 지반의 깊이가 일정깊이 이상(21m정도) 깊어지면 지반강성이 거의 같게 나타났는데, 지반강성이 지반고유주파수( $f_0=C_s/4H$ )이하 영역에서는 조금씩 서서히 감소하다가 지반고유주파수이상에서는 지층에 따른 영향으로 파동양상을 나타냈다.(Fig. 1) 또 기초지반의 수평방향운동에 대한 감쇠특성은 지반고유주파수의 70%정도( $0.7f_0$ )이하 주파수영역에서는 재료감쇠 영향으로 거의 일정하지만 이 주파수( $0.7f_0$ )이상에서는 에너지발산 영향으로 인한 감쇠가 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 저주파영역( $0.7f_0$  이하)에서 기초지반의 수평방향 감쇠도 수평지반강성처럼 기초지반의 깊이가 일정깊이(12m)이상일 때는 거의 같게 나타났지만 고주파영역에서는 발산감쇠가 큰 차이를 보였다.(Fig. 2)

기초지반의 회전강성 특성변화도 전반적으로 수평강성 특성변화와 비슷하게 지반깊이가 깊어지면 회전강성이 거의 같게 나타났고, 회전감쇠 특성도 수평감쇠 특성과 비슷한 경향을 나타냈지만, 회전운

표 1 기초지반 수평강성비

| 전단파<br>속도 | 지반<br>깊이 | 얕은 기초          |      |      |                 |      |      |                 |      |      | 말뚝 기초          |      |      |                 |      |      |                 |      |      |
|-----------|----------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|
|           |          | 소형기초<br>(R=5m) |      |      | 중형기초<br>(R=15m) |      |      | 대형기초<br>(R=25m) |      |      | 소형기초<br>(R=5m) |      |      | 중형기초<br>(R=15m) |      |      | 대형기초<br>(R=25m) |      |      |
|           |          | Embedment (m)  |      |      |                 |      |      |                 |      |      | Embedment (m)  |      |      |                 |      |      |                 |      |      |
|           |          | m              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15             | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  |
| 305       | 60       | 1.0            | 2.54 | 3.37 | 1.0             | 1.80 | 2.25 | 1.0             | 1.60 | 1.94 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
|           | 30       | 1.0            | 2.57 | 3.95 | 1.0             | 1.86 | 2.72 | 1.0             | 1.68 | 2.44 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
|           | 21       | 1.0            | 2.72 | 4.73 | 1.0             | 2.01 | 3.65 | 1.0             | 1.84 | 3.50 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
| 244       | 30       | 1.0            | 2.56 | 3.94 | 1.0             | 1.85 | 2.72 | 1.0             | 1.67 | 2.44 | -              | -    | -    | 1.0             | 1.82 | 2.67 | 1.0             | 1.65 | 2.40 |
|           | 21       | 1.0            | 2.72 | 4.74 | 1.0             | 2.01 | 3.64 | 1.0             | 1.84 | 3.49 | -              | -    | -    | 1.0             | 1.96 | 3.60 | 1.0             | 1.81 | 3.44 |
|           | 12       | 1.0            | 3.31 | -    | 1.0             | 2.72 | -    | 1.0             | 2.62 | -    | -              | -    | -    | 1.0             | -    | -    | 1.0             | -    | -    |
| 183       | 30       | 1.0            | 2.55 | 3.93 | 1.0             | 1.85 | 2.71 | 1.0             | 1.67 | 2.43 | 1.0            | 2.48 | 3.80 | 1.0             | 1.81 | 2.65 | 1.0             | 1.64 | 2.39 |
|           | 21       | 1.0            | 2.72 | 4.75 | 1.0             | 2.00 | 3.64 | 1.0             | 1.87 | 3.47 | 1.0            | 2.59 | 4.52 | 1.0             | 1.95 | 3.54 | 1.0             | 1.80 | 3.42 |
|           | 12       | 1.0            | 3.30 | -    | 1.0             | 2.71 | -    | 1.0             | 2.64 | -    | 1.0            | 3.11 | -    | 1.0             | -    | -    | 1.0             | -    | -    |
| 152       | 30       | 1.0            | 2.56 | 3.96 | 1.0             | 1.85 | 2.72 | 1.0             | 1.67 | 2.44 | 1.0            | 2.46 | 3.78 | 1.0             | 1.79 | 2.63 | 1.0             | 1.63 | 2.37 |
|           | 21       | 1.0            | 2.70 | 4.72 | 1.0             | 2.00 | 3.64 | 1.0             | 1.84 | 3.47 | 1.0            | 3.58 | 4.48 | 1.0             | 1.94 | 3.52 | 1.0             | 1.79 | 3.42 |
|           | 12       | 1.0            | 3.31 | -    | 1.0             | 2.72 | -    | 1.0             | 2.61 | -    | 1.0            | 3.07 | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |

표 2 기초지반 회전강성비

| 전단파<br>속도 | 지반<br>깊이 | 얕은 기초          |      |      |                 |      |      |                 |      |      | 말뚝 기초          |      |      |                 |      |      |                 |      |      |
|-----------|----------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|
|           |          | 소형기초<br>(R=5m) |      |      | 중형기초<br>(R=15m) |      |      | 대형기초<br>(R=25m) |      |      | 소형기초<br>(R=5m) |      |      | 중형기초<br>(R=15m) |      |      | 대형기초<br>(R=25m) |      |      |
|           |          | Embedment (m)  |      |      |                 |      |      |                 |      |      | Embedment (m)  |      |      |                 |      |      |                 |      |      |
|           |          | m              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15             | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  | 15              | 0    | 7.5  |
| 305       | 60       | 1.0            | 7.05 | 17.7 | 1.0             | 2.25 | 3.64 | 1.0             | 1.71 | 2.38 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
|           | 30       | 1.0            | 5.86 | 20.3 | 1.0             | 2.13 | 4.19 | 1.0             | 1.74 | 4.88 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
|           | 21       | 1.0            | 5.96 | 22.4 | 1.0             | 2.28 | 5.38 | 1.0             | 1.94 | 4.28 | -              | -    | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |
| 244       | 30       | 1.0            | 5.74 | 19.9 | 1.0             | 2.10 | 4.13 | 1.0             | 1.73 | 2.96 | -              | -    | -    | 1.0             | 1.65 | 2.94 | 1.0             | 1.46 | 2.31 |
|           | 21       | 1.0            | 5.83 | 21.8 | 1.0             | 2.27 | 5.44 | 1.0             | 1.94 | 4.42 | -              | -    | -    | 1.0             | 1.81 | 4.17 | 1.0             | 1.65 | 3.72 |
|           | 12       | 1.0            | 6.48 | -    | 1.0             | 3.21 | -    | 1.0             | 2.93 | -    | -              | -    | -    | 1.0             | -    | -    | 1.0             | -    | -    |
| 183       | 30       | 1.0            | 5.58 | 19.1 | 1.0             | 2.06 | 4.06 | 1.0             | 1.73 | 2.98 | 1.0            | 3.35 | 10.5 | 1.0             | 1.55 | 2.67 | 1.0             | 1.41 | 2.22 |
|           | 21       | 1.0            | 5.66 | 21.2 | 1.0             | 2.26 | 5.59 | 1.0             | 1.97 | 4.73 | 1.0            | 3.38 | 11.6 | 1.0             | 1.73 | 4.02 | 1.0             | 1.62 | 3.72 |
|           | 12       | 1.0            | 6.35 | -    | 1.0             | 3.37 | -    | 1.0             | 3.11 | -    | 1.0            | 3.96 | -    | 1.0             | -    | -    | 1.0             | -    | -    |
| 152       | 30       | 1.0            | 5.56 | 19.0 | 1.0             | 2.09 | 4.11 | 1.0             | 1.73 | 2.99 | 1.0            | 3.05 | 9.3  | 1.0             | 1.51 | 2.53 | 1.0             | 1.40 | 2.16 |
|           | 21       | 1.0            | 5.66 | 19.4 | 1.0             | 2.25 | 5.59 | 1.0             | 1.85 | 4.46 | 1.0            | 3.08 | 10.3 | 1.0             | 1.68 | 3.89 | 1.0             | 1.60 | 3.66 |
|           | 12       | 1.0            | 6.33 | -    | 1.0             | 3.37 | -    | 1.0             | 3.11 | -    | 1.0            | 3.68 | -    | -               | -    | -    | -               | -    | -    |

표 3 기초지반 강성고유주파수

단위 : Hz

| 전단파<br>속도<br>m/sec | 지반<br>깊이<br>m | 지반<br>고유<br>주파<br>수<br>f <sub>o</sub> | 얕은 기초          |     |     |                 |     |     |                 |     |     | 말뚝 기초          |     |     |                 |     |     |                 |     |     |
|--------------------|---------------|---------------------------------------|----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|
|                    |               |                                       | 소형기초<br>(R=5m) |     |     | 중형기초<br>(R=15m) |     |     | 대형기초<br>(R=25m) |     |     | 소형기초<br>(R=5m) |     |     | 중형기초<br>(R=15m) |     |     | 대형기초<br>(R=25m) |     |     |
|                    |               |                                       | Embedment (m)  |     |     |                 |     |     |                 |     |     | Embedment (m)  |     |     |                 |     |     |                 |     |     |
|                    |               |                                       | 0              | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0              | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  |
| 305                | 60            | 1.5                                   | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
|                    | 30            | 2.5                                   | 2.5            | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
|                    | 21            | 3.5                                   | 3.5            | 3.5 | 3.5 | 3.5             | 3.5 | 3.5 | 3.5             | 3.5 | 3.5 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
| 244                | 30            | 2.0                                   | 2.0            | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | -              | -   | -   | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 |
|                    | 21            | 2.8                                   | 3.0            | 3.0 | 3.0 | 3.0             | 3.0 | 3.0 | 3.0             | 3.0 | 3.0 | -              | -   | -   | 3.0             | 3.0 | 3.0 | 3.0             | 3.0 | 3.0 |
|                    | 12            | 5.0                                   | 5.0            | 5.0 | -   | 5.0             | 5.0 | -   | 5.0             | 5.0 | -   | -              | -   | -   | 5.0             | -   | -   | 5.0             | -   | -   |
| 183                | 30            | 1.5                                   | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 |
|                    | 21            | 2.1                                   | 2.5            | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | 2.0            | 2.0 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 |
|                    | 12            | 3.7                                   | 4.0            | 4.0 | -   | 4.0             | 4.0 | -   | 4.0             | 4.0 | -   | 4.0            | 4.0 | -   | 4.0             | -   | -   | 4.0             | -   | -   |
| 152                | 30            | 1.2                                   | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 |
|                    | 21            | 1.8                                   | 2.0            | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0            | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 |
|                    | 12            | 3.1                                   | 3.5            | 3.5 | -   | 3.5             | 3.5 | -   | 3.5             | 3.5 | -   | 3.0            | 3.0 | -   | 3.0             | -   | -   | 3.0             | -   | -   |

표 4 기초지반 감쇠고유주파수

단위 : Hz

| 전단파<br>속도<br>m/sec | 지반<br>깊이<br>m | 지반<br>고유<br>주파<br>수<br>f <sub>o</sub> | 얕은 기초          |     |     |                 |     |     |                 |     |     | 말뚝 기초          |     |     |                 |     |     |                 |     |     |
|--------------------|---------------|---------------------------------------|----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----------------|-----|-----|
|                    |               |                                       | 소형기초<br>(R=5m) |     |     | 중형기초<br>(R=15m) |     |     | 대형기초<br>(R=25m) |     |     | 소형기초<br>(R=5m) |     |     | 중형기초<br>(R=15m) |     |     | 대형기초<br>(R=25m) |     |     |
|                    |               |                                       | Embedment (m)  |     |     |                 |     |     |                 |     |     | Embedment (m)  |     |     |                 |     |     |                 |     |     |
|                    |               |                                       | 0              | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0              | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  | 0               | 7.5 | 15  |
| 305                | 60            | 1.5                                   | 1.0            | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
|                    | 30            | 2.5                                   | 2.0            | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
|                    | 21            | 3.5                                   | 3.0            | 3.0 | 3.0 | 2.5             | 2.5 | 3.0 | 3.0             | 3.0 | 3.0 | -              | -   | -   | -               | -   | -   | -               | -   | -   |
| 244                | 30            | 2.0                                   | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | -              | -   | -   | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 |
|                    | 21            | 2.8                                   | 2.5            | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | 2.5             | 2.5 | 2.5 | -              | -   | -   | 2.5             | 2.0 | 2.5 | 2.5             | 2.0 | 2.5 |
|                    | 12            | 5.0                                   | 4.0            | 4.0 | -   | 4.0             | 4.0 | -   | 4.0             | 4.5 | -   | -              | -   | -   | 3.5             | -   | -   | 4.0             | -   | -   |
| 183                | 30            | 1.5                                   | 1.0            | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0            | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 |
|                    | 21            | 2.1                                   | 2.0            | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 2.0             | 2.0 | 2.0 | 2.0             | 2.0 | 2.0 |
|                    | 12            | 3.7                                   | 3.0            | 3.0 | -   | 3.0             | 3.0 | -   | 3.5             | 3.5 | -   | 3.0            | 3.0 | -   | 3.0             | -   | -   | 3.0             | -   | -   |
| 152                | 30            | 1.2                                   | 1.0            | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0            | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 | 1.0             | 1.0 | 1.0 |
|                    | 21            | 1.8                                   | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5            | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 | 1.5             | 1.5 | 1.5 |
|                    | 12            | 3.1                                   | 2.5            | 2.5 | -   | 2.5             | 2.5 | -   | 2.5             | 3.0 | -   | 2.5            | 2.5 | -   | 2.5             | -   | -   | 2.5             | -   | -   |

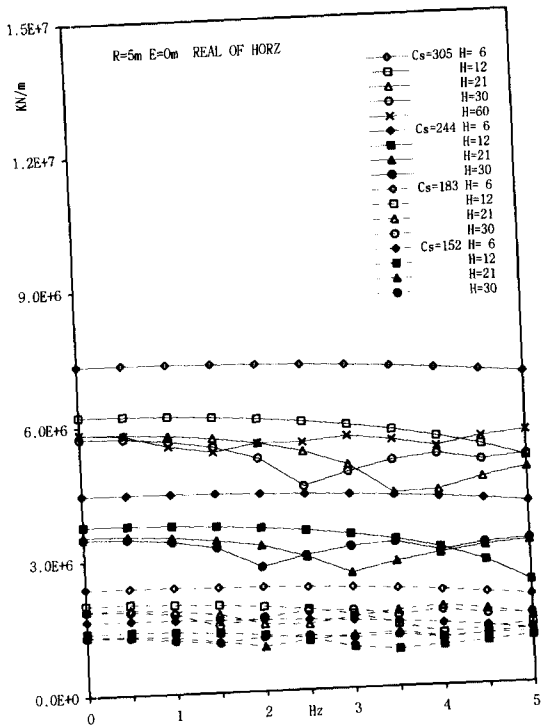


Fig. 1 소형 표면기초(E=0m) 수평강성

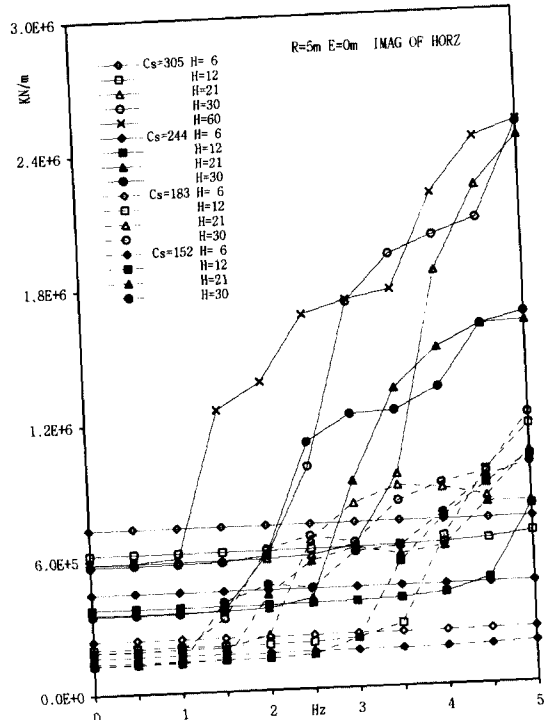


Fig. 2 소형 표면기초(E=0m) 수평감쇠

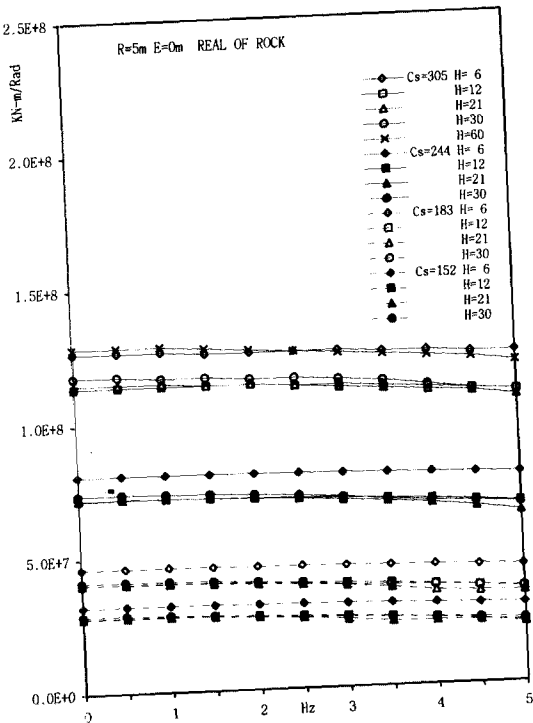


Fig. 3 소형 표면기초(E=0m) 회전강성

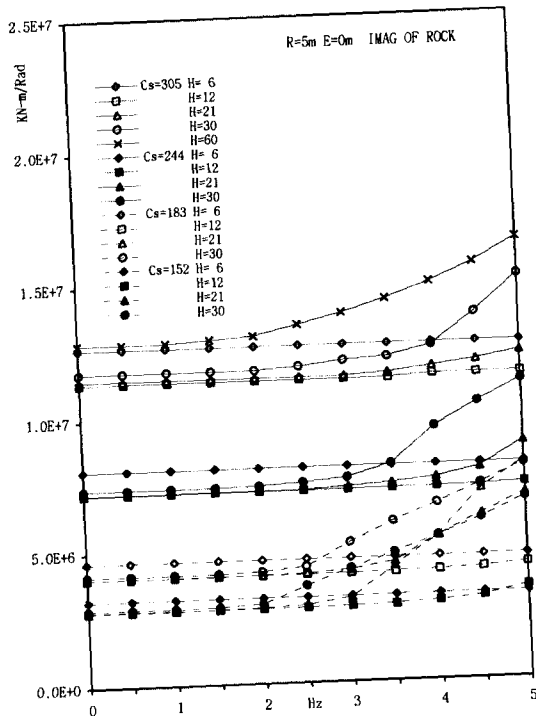


Fig. 4 소형 표면기초(E=0m) 회전감쇠

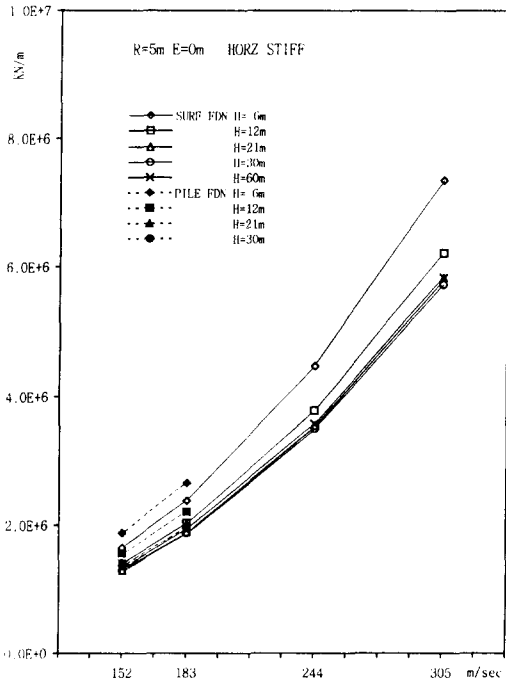


Fig. 5 소형 표면기초(E=0m) 수평강성 변화

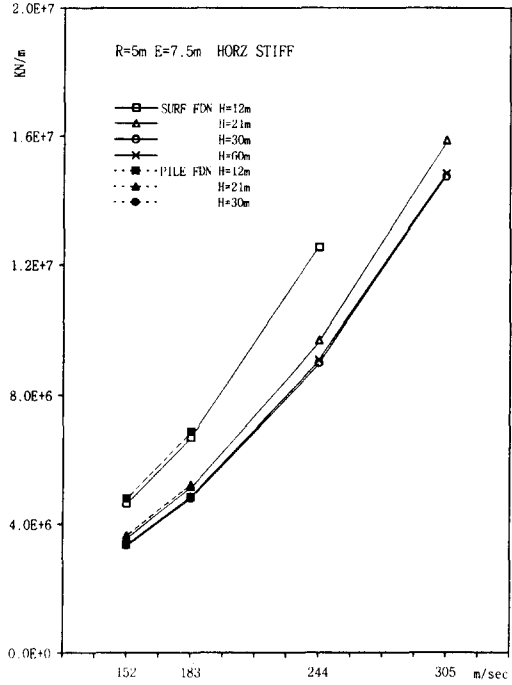


Fig. 6 소형 묻힌기초(E=7.5m) 수평강성 변화

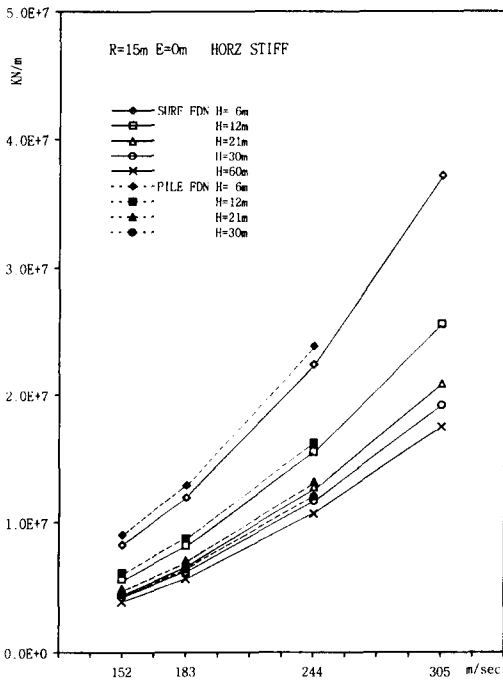


Fig. 7 중형 표면기초(E=0m) 수평강성 변화

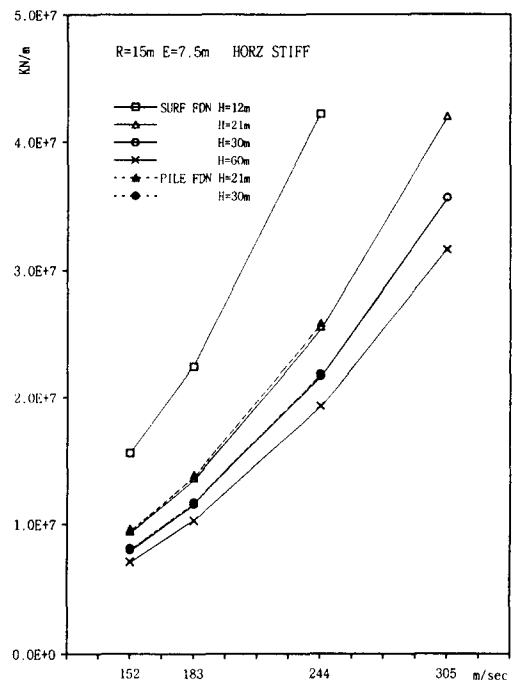


Fig. 8 중형 묻힌기초(E=7.5m) 수평강성 변화

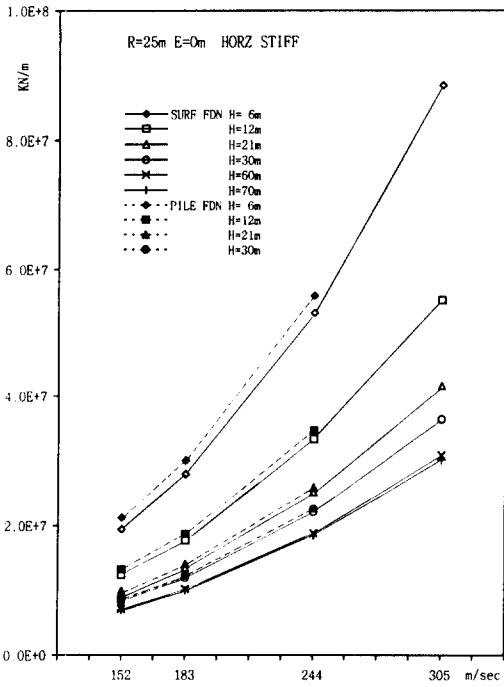


Fig. 9 대형 표면기초(E=0m) 수평강성 변화

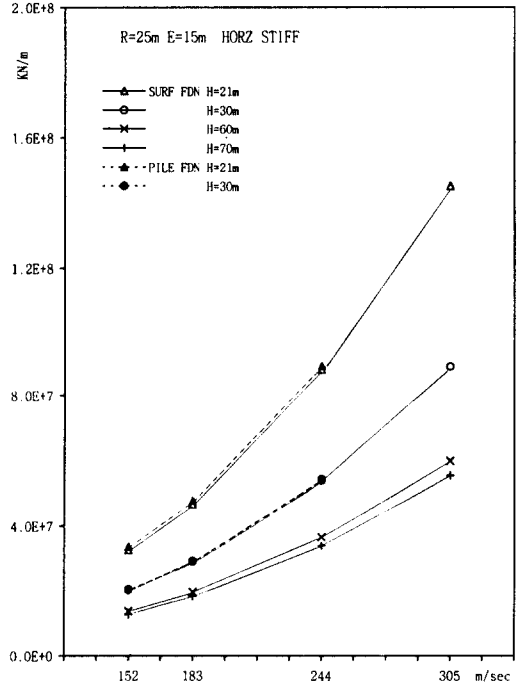


Fig. 10 대형 물한기초(E=15m) 수평강성 변화

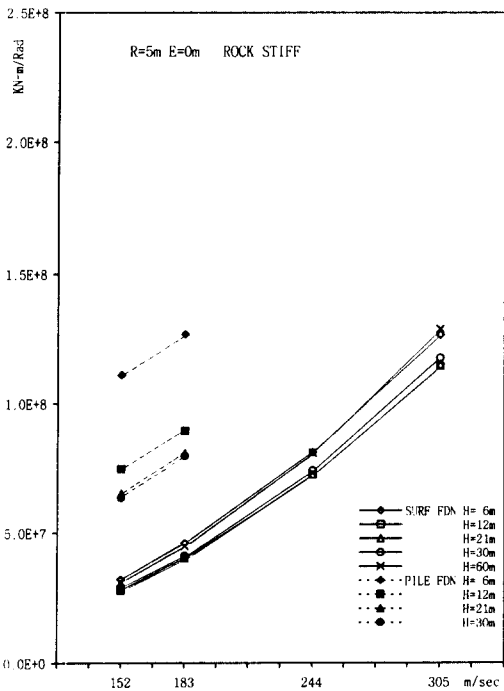


Fig. 11 소형 표면기초(E=0m) 회전강성 변화

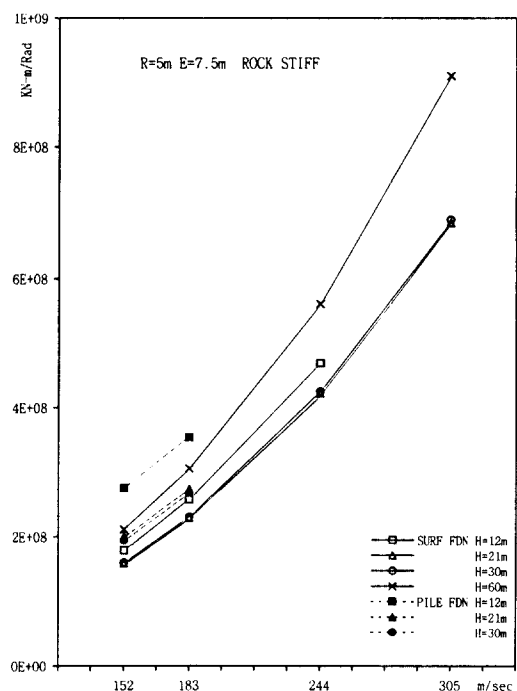


Fig. 12 소형 물한기초(E=7.5m) 회전강성 변화

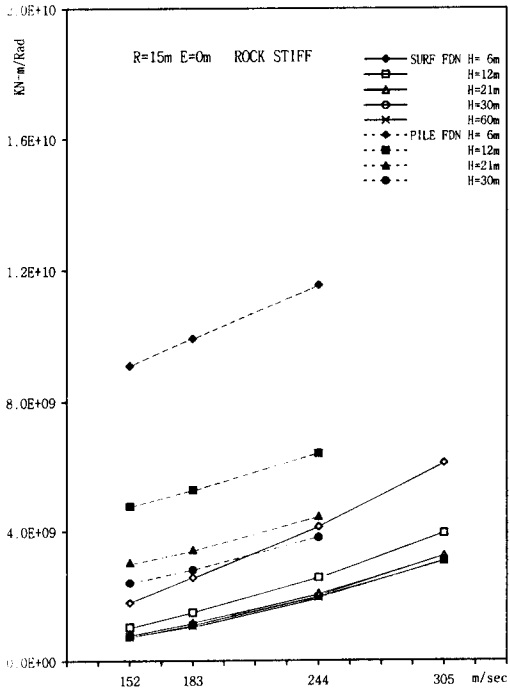


Fig. 13 중형 표면기초(E=0m) 회전강성 변화

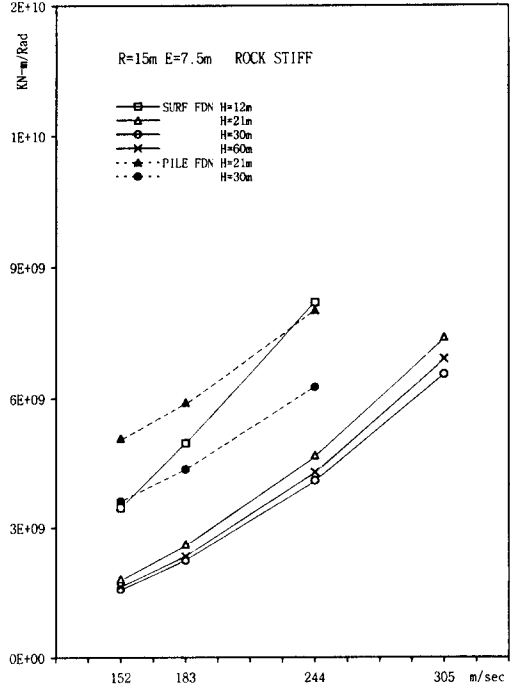


Fig. 14 중형 묻힌기초(E=7.5m) 회전강성 변화

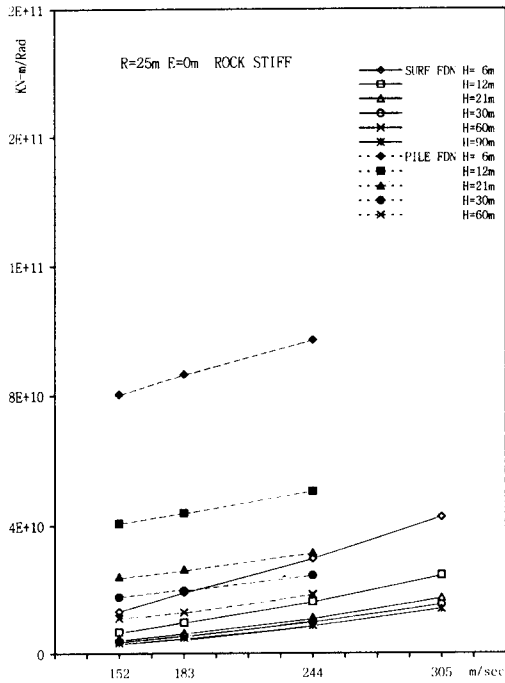


Fig. 15 대형 표면기초(E=0m) 회전강성 변화

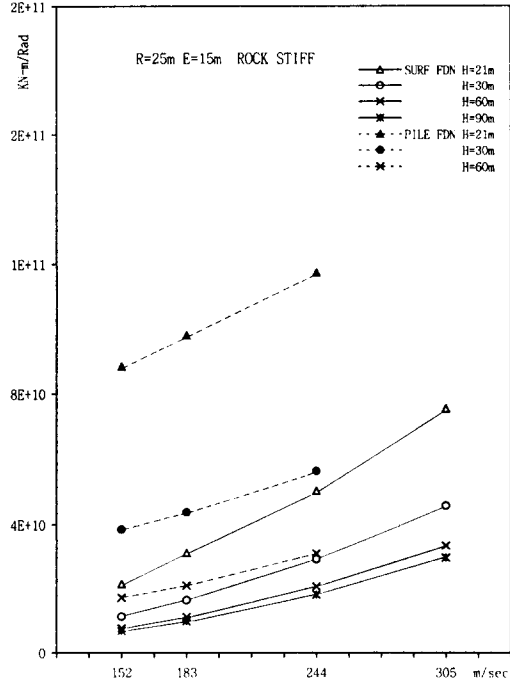


Fig. 16 대형 묻힌기초(E=15m) 회전강성 변화



동 고유주파수( $f_1$ )가 수평운동 고유주파수( $f_0$ )의 2배 정도 크게 나타났고 회전운동의 경우 수평방향운동과는 달리 회전 강성 및 감쇠의 파동양상은 거의 나타나지 않았다.(Fig. 3, 4)

한편 기초크기에 따른 기초지반 강성과 감쇠의 변화는 기초가 클수록 지반 강성과 감쇠도 크게 증가하였으며, 문힌기초의 경우 기초의 근입이 클수록 기초지반 강성이 감소하고 주파수에 따른 강성 감소현상이 뚜렷하지만 기초지반의 감쇠 증가는 크게 나타났다.

Fig. 5~16은 0Hz(저주파 영역)에서 얇은기초와 말뚝기초의 수평 및 회전 지반강성의 전단파속도에 따른 변화를 기초지반 깊이별로 나타내고 있는데, 수평 및 회전 강성에 대한 분석결과는 다음과 같다.

### 3.1 수평강성 분석

기초지반의 수평강성은 일반적으로 전단파속도가 커지면 급격히 증가하였으며(Fig. 5~10), 지반의 깊이가 깊어질수록 기초지반 강성은 감소하였으나 어느 정도 일정 깊이이상에서는 거의 비슷한 것으로 나타났다. 소형기초일 경우 기초형식이나 근입정도에 관계없이 기초밀 지반깊이가 21m(70ft)이상이면 수평강성이 거의 같게 나타났고, 중대형기초에서도 근입이 없는 기초( $E=0$ )일 경우 기초밀 지반층 깊이가 60m(200ft)이상이면 수평강성이 수렴하는 것으로 판단되었으며, 문힌기초( $E=7.5$ m이상)일 경우도 기초밀 지반층 깊이가 60~75m(200~250ft)정도일 때 수평강성이 수렴하는 것으로 나타났다.

한편 말뚝기초의 경우 근입이 없는 기초일 때는 지반층 깊이가 6m(20ft)이하일 때만 10%정도 강성 증가가 있는 것으로 나타났고, 문힌기초일 때는 말뚝영향이 무시할 정도인 것으로 판단되었다.

또 문힌기초와 근입이 없는 기초의 수평강성비가 표 1에 나타나 있는데, 수평강성비는 지반 전단파속도와는 거의 무관하게 기초지반 깊이와 기초 근입 깊이에 따라 1.6배에서 4.7배까지 달라지는데, 기초지반 깊이가 얇고 기초 근입비( $E/R$ )가 클수록 수평강성비가 큰 것으로 나타났다.

### 3.2 회전강성 분석

기초지반 회전강성은 전단파속도가 커지면 거의 직선적으로 완만하게 증가하였는데(Fig. 11~16), 소형기초의 경우 지반강성에 무관하게 기초밀 지반층

깊이가 21m(70ft)정도에서 최소화전강성을 나타냈으며, 중대형 문힌기초( $E=7.5$ m이상)의 경우는 기초밀 지반층 깊이가 60~75m(200~300ft)정도에서 회전강성이 수렴하는 것으로 나타났다.

한편 말뚝기초지반 회전강성은 기초지반이 깊을수록 저하되는 것으로 나타났는데, 소형기초의 경우 기초밀 지반층 깊이가 21m(70ft)정도이면 회전강성이 수렴하는 것으로 나타났고, 중대형기초일 경우는 기초밀 지반층 깊이가 60m(200ft)정도에서 수렴하는 것으로 나타났으며, 중대형기초의 회전강성 수렴은 근입이 없는 기초보다는 근입이 큰 기초( $E=7.5$ m이상)가 더 느린 것으로 나타났다.

또 문힌기초와 근입이 없는 기초의 회전강성비가 표 2에 나타나 있는데, 회전강성비도 지반 전단파속도와는 거의 무관하게 기초지반 깊이와 기초 근입 깊이에 따라 1.7배에서 22배까지 크게 변화했는데, 기초지반 깊이가 얇고 기초 근입비( $E/R$ )가 클수록 회전강성비도 큰 것으로 나타났다.

## 4. 지반고유주파수 분석

기초지반의 고유주파수는 일반적으로 지반의 전단파속도와 지반층 깊이에 따라 결정되는데, 기초지반의 동특성이 구조물의 내진거동에 미치는 영향이 크므로 기초지반의 고유주파수 변동상태를 파악하기 위해 주파수에 따른 얇은기초와 말뚝기초의 강성변화를 분석하였다. 기초종류, 기초크기 및 기초의 근입깊이에 따른 기초지반의 고유주파수가 표 3과 표 4에 나타나 있는데, 기초지반 강성고유주파수는 주파수영역 유한요소해석을 위한 주파수세분에 따른 영향을 고려하면 기초종류, 기초크기 및 기초 근입깊이의 영향이 거의 없는 것으로 나타났으며, 감쇠고유주파수는 강성고유주파수의 70~80%정도로 나타났는데 지반깊이가 깊을수록 큰 차이를 보여 깊은 지반 위에 놓인 기초가 방사감쇠효과가 큰 것으로 판단되었다. 그러나 말뚝기초의 경우 지반깊이가 얇고 기초가 작을 경우 감쇠고유주파수가 얇은 기초보다 약간 작아지는 것으로 나타났다.

한편 일본내진설계기준에서 정한 각종 지반의 고유주기는 30m정도 깊이의 지반을 기준으로 했을 때 거의 일치하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

구조물 내진설계를 위한 기초지반 체계에 대한

수평 및 회전 강성 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

기초지반의 고유주파수는 기초의 종류, 크기 및 근입정도의 영향을 거의 받지 않고 지반의 고유주파수와 거의 같은 것으로 나타났다.

기초지반의 수평강성이 소형기초일 때는 기초밑 지반층 깊이가 21m(70ft)이상, 근입이 없는 중대형 기초는 60m(200ft)이상에서 수렴하는 것으로 나타나 현 기준과 합치하는 것으로 판단되었지만, 문헌 중 중대형기초일 경우는 기초밑 지반층 깊이가 60m이상 고려되어야 수렴하는 것으로 판단되었다. 또 말뚝 기초의 수평강성은 말뚝이 없는 기초와 비교하여 얇은 지반층에 설치된 기초일 경우에만 10%정도의 강성증가가 있을 뿐 전반적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타나 말뚝기초의 영향이 무시될 수 있는 것으로 판단되었다.

기초지반 회전강성은 소형기초일 경우 현재 기준 처럼 기초밑 지반층 깊이를 21m(70ft)정도 고려하면 합당할 것으로 판단되지만, 중대형기초일 경우에는 기초밑 지반층 깊이를 60m정도 고려해야 할 것으로 판단되었다. 또 말뚝기초 회전강성이 얇은기초 회전강성의 1.5배에서 6배정도까지 크게 나타났는데, 구조물 내진거동 해석시 지반의 회전운동과 기초지반의 회전강성이 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

한편 문헌기초의 경우 지반깊이가 얇고 기초근입

비가 클수록 기초지반의 수평 및 회전 강성이 근입이 없는 기초에 비해 최대 4.7배와 22배로 크게 나타나 기초의 근입이 구조물의 내진거동에 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

## 6. 감사의 글

본 논문은 1996학년도 목포대학교 기성회지원 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 일본건축학회, "지진하중-그 현상과 장래의 전망", 1987, pp. 138-140.
2. *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, 1994, pp. 156-195.
3. 건설부, 건축물의 구조기준등에 관한 규칙, 1996, pp. 245-248.
4. Kim, Y.-S., "Effect of Embedment on Seismic Motions of Buildings," M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, 1984, pp. 272.
5. 김용석, "반지하구조물 내진설계를 위한 지반거동", 전산구조공학회지 제1권 제2호 (12월호), 1988, pp. 91-100.
6. Prakash, S., and Puri, V. K., *Foundations for Machines : Analysis and Design*, John Wiley and Sons, 1988, pp. 656.