

## 블럭형 진동기초의 설계

윤 정 방\*

### 1. 서 언

동적하중을 받는 진동기초는 지지형식에 따라 크게 얕은기초와 깊은기초로 구분할 수 있다. 블럭형기초는 얕은기초의 일종으로 일반적으로 충격하중이나 장주기의 기계진동하중에 적합한 기초의 형태이다. 본 기사는 블럭형 진동기초를 대상으로 이의 설계에 대한 사항을 기술하려한다. 블럭기초에 대한 근사해법은 Major(1980), Arya(1979), Srinivasulu(1976)등에 의하여 많은 연구가 진행된 바 있다.

진동기초의 설계에서 일반적으로 고려되는 사항을 정리하면 아래와 같다.

- 1) 지지하는 기계자체의 손상이 방지되도록 한다.
- 2) 기계가 위치한 구조나 인접구조의 손상이 방지되도록 한다.
- 3) 대상기계나 인접기계의 정상운전이 방해되지 않도록 한다.
- 4) 설계된 기초의 유지나 보수에 과도한 경비가 필요치 않도록 설계한다.
- 5) 작업자의 작업환경이나 건강에 악영향을 주지 않도록 한다.
- 6) 주변환경이나 주민에게 위협이나 피해가 없도록 설계되어야 한다.

근본적으로 진동기초의 설계는 기계-기초-지반의 상호작용에 대한 고려가 요구된다. 이를 위하여는 기계로부터 유발되는 하중에 대한 동력학

적 자료가 요구되고, 기초의 모양이나 역학적 특성에 대한 자료가 필요하며, 아울러, 지반의 역학적 성질에 관한 자료가 요구된다. 이 경우의 지반 자료는 정적특성인 지반지지력이나 허용침하량에 관한 것만으로는 부족하며, 동적실험을 바탕으로 한 지반의 역학적 계수들이 요구된다. 기계-기초-지반의 상호작용의 해석방법으로는, 설계의 편리성 때문에 많이 사용되었던 방법인 정적하중에 대해 동적계수를 곱한 값을 설계하중으로 사용하는 등가정적해석방법이 있으나, 이는 동적하중의 영향을 효과적으로 고려하기에는 부적절한 방법이라 할 수 있다. 현재 이 방법은 초기설계단계에서 주로 사용되어 진다. 진동기초설계에 있어서는 공진주파수와 기초응답의 최대진폭을 산정하는 것이 가장 중요하며, 이 값이 설계기준으로 블럭기초에 대하여 기초중량과 기계중량의 비율을 제시한 바 있다. 또한, Rausch(1959)은 기계의 운전주파수에 따라 그 비율을 수정하여 제시하였다.

진동기초의 해석 및 설계에서의 주요사항은 진동하중자체의 특성을 산정하는 것과 기초구조의 수평, 수직, Rocking, Pitching 응답의 해석 및 수평-Rocking이 연계된 운동의 해석이다. 현재 사용되는 진동기초설계의 해석방법은 Reissner(1936)의 반무한지반영역위에 놓인 원형강관에 대한 해석적 결과를 이용한 여러가지 변형된 방법이 사용되고 있다. 이러한 진동기초의 해석방법은 지반의 모형화하는 방법에 따라 탄성 반무한영역으로 지반을 모형화하는 경우(Reissner(1936), Shekhter(1948), Sung(1953), Quinlan(1953), 등)와 감쇠-탄성스프링에 의해 지반을 모형화하

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

는 경우(Lysmer and Richart(1966), Barkan(1962), 등)로 나눌 수 있다. 최근의 실제 설계에는 선형스프링 이론을 바탕으로 하여, 감쇠효과와 진동에 참여하는 흙의 질량영향을 무시하는 Barakan(1962)의 방법이 많이 사용되고 있다.

진동기초설계를 위한 주요단계를 정리하면 아래와 같다.

1) 설계조건 결정 : 주로 주파수와 진폭에 대해 규정되고, 기계-기초-지반의 공진주파수와 기계운전주파수의 차이에 대한 규정이 요구되기도 한다.

- 2) 동적하중 특성의 산정
- 3) 동적해석에 사용될 지반의 역학적 계수결정
- 4) 기계-기초-기반의 동적거동해석
- 5) 적절한 설계변수의 조정

상기의 과정에서 설계변수의 조정시에 고려되어야 할 사항은 아래와 같다.

1) Rocking을 최소화하기 위해서는 기계와 기초의 무게중심이 가능한 가깝게 한다.

2) 기계-기초의 블럭의 무게중심이 기초저면의 도심에 대해 연직선상에 위치하도록 한다.

3) 개별기초의 진동이 타기초에 미치는 영향을 최소화 시키기 위하여, 각 기초를 물리적으로 또는 역학적으로 분리시킨다.

4) 차후의 기초에 대한 변경이 용이하도록 설계한다.

## 2. 동적하중의 산정

진동기초의 설계시에, 단순히 공진주파수와 운전주파수를 분리시켰다고 기초구조의 진폭이 규정된 진폭보다 작아진다 할 수는 없다. 따라서, 적절한 해석방법에 의해 진폭을 계산해야 한다. 이때, 사용되어지는 기계진동에 의한 동적하중은 각 기계의 종류와 기계형상에 따라 결정되어진다.

회전운동기계(turbines, pumps, fans 등)의 경우에는, 회전체의 불균형성에 의한 편심으로 인한 주기적인 연직하중이 존재한다. 이 하중은 회전속도( $\omega$ ), 편심( $e$ ) 및 불균형 질량( $m_e$ )의 향으로 아래와 같이 표현된다.

$$F(t) = m_e e \omega^2 \sin \omega t \quad (1)$$

이때, 편심은 대부분의 경우에 미지의 값인 경우가 많다. Major(1962)는 turbines에 대하여 기계하중을 규정된 운전회전속도( $f_{op}$ )와 실제회전속도( $f$ )의 비율의 값으로 표 1과 같이 제시하였다.

표 1. 회전기계운동에 대한 최대하중(Turbine)

| 운전주파수의 범위                         | 최대하중( $F_0$ )                              |
|-----------------------------------|--|
| $f_{op} \geq 3000 \text{ r.p.m.}$ | $0.20 W_r \left(\frac{f}{f_{op}}\right)^2$ |
| $f_{op} = 1500 \text{ r.p.m.}$    | $0.16 W_r \left(\frac{f}{f_{op}}\right)^2$ |
| $f_{op} < 3000 \text{ r.p.m.}$    | $0.10 W_r \left(\frac{f}{f_{op}}\right)^2$ |

왕복운동기계에 대하여는, 하중은 회전운동과 병진운동이 동시에 발생하는 기계부재의 질량성분에 따라 연직하중( $F_z$ )은 회전진동수와 같이 진동하는 1차성분( $F'$ )과 회전진동수의 2배로 진동하는 2차성분( $F''$ )으로 구성된다. 한개의 피스톤과 크랭크로 구성된 기계에 대하여 연직하중은 아래와 같이 구해진다.

$$F_z = F' + F''$$

$$F' = (m_{rot} + m_{rec}) r_1 \omega^2 \cos \omega t \quad (2)$$

$$F'' = m_{rec} \frac{r_1^2}{L} \omega^2 \cos 2\omega t$$

여기서  $m_{rot}$  = 총회전질량 ;  $m_{rec}$  = 총왕복운동질량 ;  $r_1$  = 크랭크의 회전직경 ;  $L$  = 피스톤과 크랭크를 연결하는 부재의 길이이다.

또한, 수평하중( $F_x$ )은 1차성분만으로 구성된다.

$$F_x = m_{rot} r_1 \omega^2 \sin \omega t \quad (3)$$

여러개의 크랭크로 구성된 기계에 대한 하중의 특성을 Newcomb(1951)에 의하여 연구가 수행된 바 있으며, 충격하중에 대한 해석은 Barakan(1962)에 의하여 연구된 바 있다.

### 3. 진동기초의 동적해석

블럭형 진동기초의 동적해석은 기초를 강체로 가정하고, 지반의 역학적 특성은 서언에서 언급한 바와 같이, 반무한체지반위에 놓인 원형강판에 대한 해석결과를 바탕으로 구한 등가계수들을 사용하여 모형화를 수행하는 것이 보통이다. 이 기초-지반의 이상화된 구조계는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 기계진동에 의한 기초의 수직방향 운동은 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$m\ddot{z} + C_z \dot{z} + k_z z = F_0 \sin \omega t \quad (4)$$

여기서,  $z$ =기초의 수직방향 변위;  $m$ =기계-기초 복합계의 질량;  $k_z$ =지반의 수직방향 강성계수(표 2);  $C_z$ =지반의 수직방향 기하학적 감쇠계수(표3)이다. 기초의 수평, Rocking 및 비틀림 운동에 대해서도 식(4)와 유사한 운동방정식을 구할 수 있으며, 이에 관련된 지반의 강성 및 감쇠계수는 표 2와 표 3에 보였다.

그림 1과 식(4)로 이상화된 기계-기초-지반으로 구성된 구조계의 공진주파수는 표 4에 보인 바와 같이 구할 수 있으며, 회전속도가  $\omega$ 인 기계진동에 의한 기초진동의 진폭과 기계진동하중에 대한 지반에 전달되는 하중의 비인 전달율( $T$ )은 표 4의 식을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

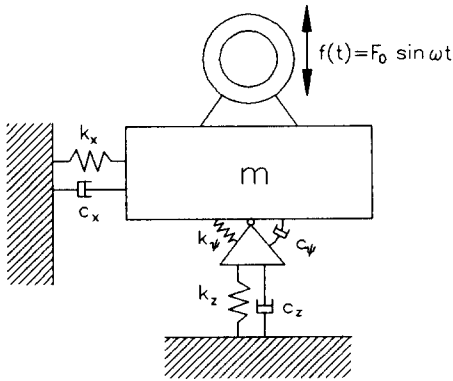


그림 1. 블럭형 진동기초의 이상화된 구조계

표 2. 원형 및 사각형기초에 대한 지반의 스프링 계수

| 운동방향                  | 스프링계수  |
|-----------------------|--|
| 원형기초의 반경=r            |  |
| Vertical              | $k_z = \frac{4Gr}{1-\nu}$                    |
| Horizontal            | $k_x = \frac{32(1-\nu)Gr}{7-8\nu}$           |
| Rocking               | $k_\psi = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$            |
| Torsion               | $k_\theta = \frac{16Gr^3}{3}$                |
| 사각형기초, $2c \times 2d$ |  |
| Vertical              | $k_z = \frac{2G\beta_z(cd)^{1/2}}{1-\nu}$    |
| Horizontal            | $k_x = 4(1+\nu)G\beta_x(cd)^{1/2}$           |
| Rocking               | $k_\psi = \frac{8G\beta_\psi cd^2}{(1-\nu)}$ |

\*)  $\beta$ 의 값은 그림 2 참조

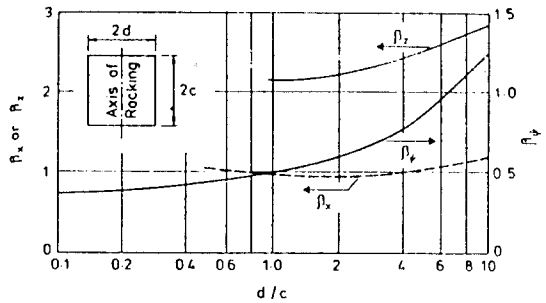


그림 2. 사각형기초에 대한 계수  $\beta_z$ ,  $\beta_x$  and  $\beta_\psi$

표 3. 탄성반무한체상의 강체기초에 대한 감쇠계수

| 운동방향     | Modified mass or inertia ratio                        | 감쇠계수   |
|----------|---|--|
| Vertical | $B_z = \frac{(1-\nu)}{4} \frac{m}{\rho r^3}$          | $D_z = \frac{0.425}{B_z^{1/2}}$                |
| Sliding  | $B_x = \frac{(7-8\nu)}{32(1-\nu)} \frac{m}{\rho r^3}$ | $D_z = \frac{0.288}{B_z^{1/2}}$                |
| Rocking  | $B_\psi = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_\psi}{\rho r^5}$ | $D_\psi = \frac{0.15}{(1+B_\psi)B_\psi^{1/2}}$ |
| Torsion  | $B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho r^5}$                | $D_\theta = \frac{0.50}{(1+2B_\theta)}$        |

표 4. 탄성반무한체상의 강제기초에 대한 고유진동수

| 운동방향     | 공유진동수(Rad/sec)                              |
|----------|---|
| Vertical | $\omega_z = (k_z/m)^{1/2}$                  |
| Sliding  | $\omega_x = (k_x/m)^{1/2}$                  |
| Rocking  | $\omega_\psi = (k_\psi/I_\psi)^{1/2}$       |
| Torsion  | $\omega_\theta = (k_\theta/I_\theta)^{1/2}$ |

\*)  $I_\theta$ 와  $I_\psi$ 은 회전질량관성모멘트

표 5. 공진주파수와 진폭

| Constant Force Excitation<br>( $F_0 = \text{constant}$ )  | Rotating mass excitation<br>( $F_0 = m_e \omega^2$ )  |
|---|---|
| Resonance Frequency( $\omega_r$ )   |   |
| $\omega_r = \omega_n(1-2D^2)^{1/2}$   | $\omega_r = \omega_n(1-2D^2)^{-1/2}$  |
| Maximum Vibration Amplitude( $A_{max}$ )  |   |
| $A_{max} = \frac{F_0}{2Dk(1-D^2)^{1/2}}$  | $A_{max} = \frac{m_e e}{m2D(1-D^2)^{1/2}}$  |
| Amplitude at Frequency $\omega(A)$  |   |
| $A = \frac{F_0}{k((1-\omega^2/\omega_n^2)^2 + (2D\omega/\omega_n)^2)^{1/2}}$                                | $A = \frac{m_e e(\omega/\omega_n)^2}{m((1-\omega^2/\omega_n^2)^2 + (2D\omega/\omega_n)^2)^{1/2}}$ |
| Transmissibility( $T_r$ )   |   |
| $T_r = \frac{(1 + (2D\omega/\omega_n)^2)^{1/2}}{((1-\omega^2/\omega_n^2)^2 + (2D\omega/\omega_n)^2)^{1/2}}$ |   |

\*)  $\omega_n$ 은 고유진동수; 전달율( $T_r$ )은 그림 3 참조.

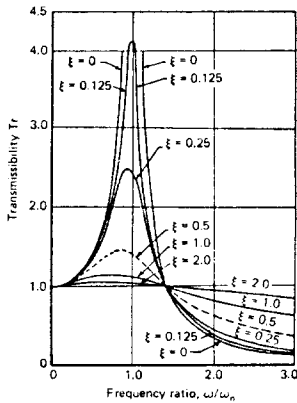


그림 3. 기계하중의 지반으로의 전달율(Transmissibility)

#### 4. 설계의 변경방법

진동기초설계에 대한 해석결과가 주어진 설계 조건에 적합하지 않을 때는 아래와 같은 방법에 의해 설계변수를 변경하여 재해석을 수행하게 된다.

- (1) 기초의 질량이나 형상을 변경시켜서 공진주파수나 진폭을 설계조건에 맞도록 한다.
- (2) Grouting 등의 방법을 통해 지반의 조건을 강화함으로써 공진주파수를 증가시킨다.
- (3) 지반에 기초를 매설함에 의해 공진주파수의 증가와 진폭의 감소를 유발시킨다.
- (4) 연약지반등의 영향으로 얇은 기초가 적합하지 않을 때는 말뚝을 사용하는 깊은 기초로 교체한다.
- (5) 기계의 불균형성을 줄임으로써 기계하중의 감소를 유발시킨다.
- (6) 여러기초간의 상호영향이 클 때는 물리적, 역학적으로 분리시켜 이를 감소시킨다.

#### 5. 블럭기초의 설계 예

##### 5.1 원심기계의 진동기초

단단한 진흙으로 구성된 지반위에 놓이게 될 총 기계중량이 25.3ton이며, 고속(운전속도=6949rpm)으로 회전하는 원심기계의 진동기초에 대한 예이다.(그림 4) 원심기계의 불평형중량은 1190kgf이며, 상기의 운전속도로 회전시 원심력은 647kg이다. 이를 지지할 콘크리트기초의 블

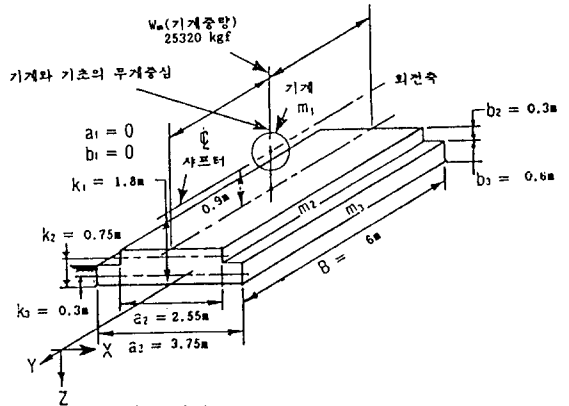
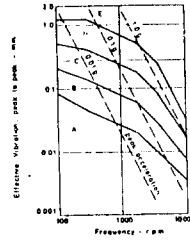


그림 4. 원심기계를 지지하는 블럭형 기초

럭크기는  $3.75 \times 6.00 \times 0.9\text{m}$ 이며, 이의 중량은 2ton로서 기계중량의 1.8배 정도이다.

지반의 역학적 특성은 제3절에서 설명한 바와 같이 등가강성 및 감쇠계수로써 이상화하였다. 이때, 기계-기초-지반계의 수직, 수평 및 Rocking 운동에 대한 고유진동수와 감쇠비는 다음과 같이 구해졌다 :  $f_{nz} = 1049\text{rpm}$ ,  $f_{nx} = 881\text{rpm}$ ,  $f_{ny} = 1461\text{rpm}$ ,  $D_z = 0.87$ ,  $D_x = 0.49$ ,  $D_y = 0.36$

상기의 고유진동수는 기계의 운전주파수와 비교할 때, 매우 작은 값이 되도록 설계되어 있어서 공진이 발생할 가능성이 없음을 알 수 있다. 또한, 지반의 감쇠비도 상당히 큰 값이고, 기계 및 콘크리트 블럭의 자중에 비하여 원심력이 매우 작으므로 기초지반에 작용되는 동하중의 영향은 중요치 않음을 예측할 수 있다. 따라서, 이 경우의 지반지력에 대한 검토는 사하중의 영향을 위주로 검토하여도 된다. 기초지반에서 발생하는 최대수직 및 수평변위는 각각  $0.48 \times 10^{-3}\text{mm}$ 와  $0.46 \times 10^{-3}\text{mm}$ 로 구해졌으며, 이 결과는 그림 5의 기초진동의 진폭에 대한 설계기준과 비교할 때 아주 만족한 상태를 알 수 있다.



- A: No Faults. Typical new equipment
- B: Minor faults. Correction wastes dollars
- C: Faulty. Correct within 10 days to save maintenance dollars
- D: Failure is near. Correct within two days to avoid breakdown
- E: Dangerous. Shut it down now to avoid danger

그림 5. 기계진동의 진폭에 대한 설계기준

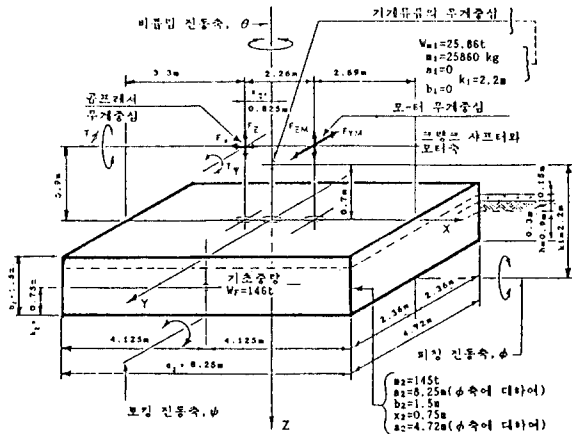


그림 6. 왕복콤프레서를 지지하는 블록형 기초

### 5.2 왕복콤프레서의 진동기초

실트질 모래지반위에 설치될 콤프레셔와 터빈(기계중량=25.9ton)의 진동기초에 대한 예이다(그림 6). 콤프레셔와 터빈의 운전속도(f)는 585rpm으로 비교적 저속이며, 이에 의한 최대수직력은 그림 7과 같이 주파수가 f가 되는 1차성분은 0.60ton이며, 주파수가 2f인 2차성분은 0.25ton이다. 최대수평력은 1차진동수에 대하여만 0.33ton이며, 최대 Rocking모멘트는 1차 진동수에 대하여만 1.53ton·m, 그리고, 최대 Pitching 모멘트는 1차 및 2차진동수에 대하여 각각 4.59ton·m, 1.67·m이다. 콘크리트 기초블럭의 크기는 8.25×4.72×1.5m이며, 이의 중량은 146ton이다. 이는 기계중량에 비하여 약 5.7배 되는 큰 값이다.

지반의 특성을 제 3 절에 서술한 방법으로 모형화할 때, 전체계의 고유진동수는 수직, 수평, Rocking 및 Pitching 운동에 대하여 각각 1091, 1017, 1690 및 1673rpm으로 구해졌다. 이들은 기계진동의 1차 및 2차 성분의 주파수와 비교할 때

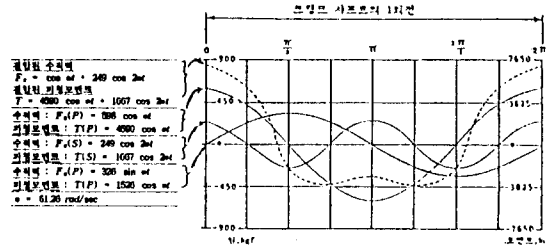


그림 7. 불평형 수직, 수평력 및 모멘트

0.9~2.9배 가량 되는 값이다. 기계진동에 의한 동하중이 지반에 전달되는 비율인 전달률(T)은 1.1~1.7의 값으로 구해졌다. 수직 및 수평운동의 경우, 고유진동수가 기계하중의 2차성분 주파수와 가깝지만, 지반의 감쇠비가 각각 0.98과 0.78의 큰 값으로 구해졌으므로 공진이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이 지반에 전달되는 동하중의 효과는 기계와 콘크리트기초블럭의 자중에 비하여 기계진동하중이 매우 작으므로 중요하지 않음을 알 수

있다. 기초블럭의 최대수직 및 수평변위는 각각  $17.7 \times 10^{-3}$ 과  $10.9 \times 10^{-3}$ mm인바, 그림 5의 설계기준에 의하면 만족한 상태임을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Major, A. 1980. Dynamics in civil engineering : Analysis and design, vols I, II, III, IV. Budapest : Akademiai Kiado, and London : Collets' Holdings Ltd.
2. Major, A., 1962 *Vibration analysis and design of foundations for machines and turbines*. London : Collets' Holdings Ltd.
3. Arya, S.C., O'Neil, M.W. and Pincus, G., 1979, *Design of Structure and Foundations for Vibration Machines*. Gulf Publishing Co.
4. Srinivasulu, P. & C. V. Vaidyanathan, 1976. *Hanbook of machine foundations*. New Delhi : Tata McGray-Hill.
5. Cozens, W. J., 1938. Machinery foundations. Jnl I.E.E. 82 : 327-328.
6. Rausch, E., 1959. *Maschinen Fundamente und andere dynamische beanspruchte Baukonstruktionen*. Dusseldorf : VDI Verlag.
7. Reissner, E., 1936. *Stationare Axialsymmetrische durch eine Schuttelnde Masse erregete Schwingungen eines homgenen elastische Halbraimes*. Ing.-Archiv 7(6):381-396.
8. Reissner, E. & H. F. Sagoci, 1944. *Forced torsional oscillations of an elastic half space*. J. Appl. Phys. 15 : 652-662.
9. Shekhter, O. Ya., 1948. *Consideration of inertial properties of soil in the computations of vertical forced vibrations of massive foundations*. NII, Symposium 12, Moscow : Vibratsi Osnovaniy i Fundamentov.
10. Sung, T.Y., 1953. *Vibrations in semi-infinite solids due to periodic surface loading*. Symposium on Dynamic Testing of Solids, ASTM, STP no. 156. 35-68.
11. Quinlan, P.M., 1953. The elastic theory of soil dynamics. Symposium on Dynamic Testing of Solids ASTM-STP No. 156, pp.3-34.
12. Lysmer, J. & F.E. Richart Jr., 1966. Dynamic response of footings to vertical loading. ASCE Jnl. Soil Mech. and Found. Div. 92(SMI) : 65-91.
13. Barakan, D.D., 1962. *Dynamics of Bases and foundations*. New York : McGraw-Hill.
14. Newcomb, W.K., 1951. Principles of foundation design for engines and compressors. Trans. ASME 73:307-312.
15. Whitman, R.V. & F.E. Richart, 1967. Design procedures for dynamically loaded foundations. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE 93(SM6) :169-193.
16. Blake, M.P., 1964. New vibration standards for maintenance. Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner 43(1):111-114.