

### III-42 動的地盤反力係数(その1)

東京電力・技研. ○野口俊郎 堀口潤一, 横手敏郎, 太田 寿

1. まえがき. 最近10年位の間に送電圧の高压化が進み, 54KV および275KVは既に普及し, 現在500KVの実用化が検討されている。これら高電圧化に伴い送変電用電力機器は逐次大型化し特に我国では, 塩害対策の関係で長大な碍子部分が使用されるようになり, 一般に地震の影響を受けやすい構造となったため, 比較的頻繁に地震被害が発生するようになった。このため電力機器の耐震設計基準の再検討が行なわれることとなり, 現在各所で研究が行なわれている。

東京電力KK技術開発研究所土木研究室では, 電力機器が各種の方法で支持される場合について応答解析の結果, 電力機器に架台, コンクリート基礎体および支持地盤を含めた振動系の場合に回答が最も大きいことが明らかになったので, 地盤や基礎体の影響を考慮した電力機器の動的耐震設計を行なう上が必要となる基礎体の動特性について実験検討を行なっている。

この報文は, 電力機器の基礎として使用される実物大の各種コンクリート基礎体とローム質地盤上に作成し, これについて加振実験を行ない, 主として基礎体の接地面積と動的地盤反力係数の関係について検討した結果を述べたものである。

2. 実験概要. 実験はローム地盤を対象に電力機器に使用する規模の数種コンクリート基礎体と地盤上に作成し, 起振機を据付けて上下方向および水平方向に加振を行ない, 共振を動時における各部分の振動状態を測定し, コンクリート基礎体の動特性を調べたもので, 一部の基礎体底面には土圧計を配置し, 振動時の土圧分布を測定した。実験は下記に示す天然不攪乱ローム質地盤と埋立地盤のスケ所で実施した。

#### 2-1 実験 I (天然不攪乱ローム地盤)

##### 1) コンクリート基礎体なりびに設置

実験に使用したコンクリート基礎体は A, E, H および I の4種類であり各基礎体の諸元を表-1に示す。基礎体の設置は表土部分を約1/4削り, 天然不攪乱ローム層を露出せしめ, コンクリートを直接打設して作成した。

表-1 コンクリート基礎体の諸元

H基礎底面には土圧計10個を配置した。

##### 2) 起振機なりびに加振方法

実験に使用した起振機は2種類で表-2に示す性能表のとおりであり, 加振実験は起振力一定として行なった。

##### 3) 実験場の地質

この実験場は東京都調布市西つつじヶ丘, 東京電力KK技術開発研究

|                |                                    | A基礎                   | B基礎                   | E基礎                   | H基礎                   | I基礎                   |
|----------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $L/B$          | 奥行長/巾                              | 0.6                   | 0.6                   | 0.6                   | 0.6                   |                       |
| A              | 底面積 (cm <sup>2</sup> )             | 240×10 <sup>4</sup>   | 470×10 <sup>4</sup>   | 735×10 <sup>4</sup>   | 1500×10 <sup>4</sup>  | 2852×10 <sup>4</sup>  |
| W              | 重量 (kg)                            | 3.76×10 <sup>3</sup>  | 6.62×10 <sup>3</sup>  | 17.35×10 <sup>3</sup> | 53.60×10 <sup>3</sup> | 71.21×10 <sup>3</sup> |
| m              | 質量 (Ton)                           | 3.84                  | 6.75                  | 17.71                 | 54.73                 | 72.67                 |
| d              | 重心位置 (cm)                          | 46.4                  | 41.6                  | 79.9                  | 79.7                  | 62.07                 |
| J <sub>g</sub> | 重心周りの慣性モーメント (cm <sup>4</sup> )    | 14.01×10 <sup>8</sup> | 41.21×10 <sup>8</sup> | 208.4×10 <sup>8</sup> | 1236×10 <sup>8</sup>  | 1469×10 <sup>8</sup>  |
| J <sub>B</sub> | 底面すべり軸心の慣性モーメント (cm <sup>4</sup> ) | 22.27×10 <sup>8</sup> | 52.90×10 <sup>8</sup> | 321.5×10 <sup>8</sup> | 1583×10 <sup>8</sup>  | 1749×10 <sup>8</sup>  |
| I <sub>0</sub> | 底面の断面2次モーメント (cm <sup>4</sup> )    | 80.00×10 <sup>8</sup> | 307.3×10 <sup>8</sup> | 750.3×10 <sup>8</sup> | 3125×10 <sup>8</sup>  | 5029×10 <sup>8</sup>  |
| $i_g^2$        | $J_g/m$                            | 3.65×10 <sup>5</sup>  | 6.11×10 <sup>5</sup>  | 11.77×10 <sup>5</sup> | 22.58×10 <sup>5</sup> | 20.21×10 <sup>5</sup> |
| $i_B^2$        | $J_B/m$                            | 5.80×10 <sup>5</sup>  | 7.84×10 <sup>5</sup>  | 18.16×10 <sup>5</sup> | 28.93×10 <sup>5</sup> | 24.07×10 <sup>5</sup> |

所屋外実験場で実施した。実験場はローム質地盤の表面を整地して造成したものであり、地表付近約0.6mは埋戻砂質土やカレキ等の混入した表土であり、その下の約2mには天然不攪乱ロームがある。更にその下は良く締った砂礫や砂層と becoming なる。

コンクリート基礎体の接地面である地表から1m下りの個所における平板載荷試験(載荷板寸法30×30cm)の結果は沈下量0~2.5mmの部分で平均地盤係数 $4.6 \times 10^4$ 程度であり、沈下量が2.5mmを越すと $1.9 \times 10^4$ 程度となる。またこの地質で杭打ちと板たつきを行なった弾性波の測定を行なった結果を表-3に示す

## 5.2 実験Ⅱ(埋立地盤)

### 1. コンクリート基礎体ならびに設置

実験に使用したコンクリート基礎体はA、B、Eの3種類であり、各コンクリート基礎体の諸元を表-1に示す。基礎体は地表部分を約20cm削り取った面を攪乱した状態に仕上げコンクリートを打設して作成した。A基礎底面には土圧計を6ヶ配置した。

### 2. 起振機ならびに加振方法

実験に使用した起振機は表-2に示す性能表のとおりであり、前述の実験と同様に加振を行なった。

### 3. 実験場の地盤

実験は品川区大井ふ頭埋立地の東京電力KK大サウカ発電所建設敷地内で行なった。実験場は浚業埋立により土地造成を行なった地域であり、地表部分ス〜2.5mは粘土または粘土質ロームの埋立土で表面付近には工事残材等も混入してゐる。その下はN値10程度の砂層と becoming なる。実験個所で行なった平板載荷試験(載荷板寸法30×30cm)の結果、沈下量0~2.5mmの部分で平均地盤係数 $2.2 \times 10^4$ 程度であった。また弾性波測定の結果は表-3に示すとおりである。

## 5. 実験結果

A・B・E、HならびにI基礎の上下方向ならびに水平方向加振時の変位共振曲線のうち1例としてH基礎の共振曲線を図-1に示す。表-4には共振々動数を示す。また、共振々動時における実験IのH基礎の底面土圧分布を図-2示す。

表-4 共振振動数

|          | 基礎体 | 1 回 目    |            | 2 回 目    |            | 3 回 目    |            |
|----------|-----|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
|          |     | 起振力 (kg) | 共振振動数 (Hz) | 起振力 (kg) | 共振振動数 (Hz) | 起振力 (kg) | 共振振動数 (Hz) |
| 上下振動時    | E   | 500      | 17.5       | 700      | 17.5       | 900      | 17.5       |
|          | H   | 1000     | 10.0       | 2000     | 10.0       | 3000     | 9.2        |
| ローリング振動時 | A   | 100      | 16.7       | 200      | 15.9       | 300      | 15.4       |
|          | E   | 300      | 12.2       | 400      | 12.1       | 500      | 12.1       |
|          | H   | 1000     | 10.0       | 2000     | 9.6        | 3000     | 9.4        |
|          | I   | 1000     | 9.7        | 2000     | 9.3        | —        | —          |

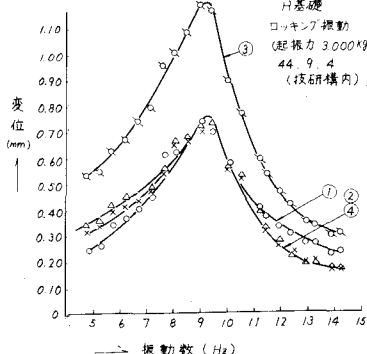
表-2 起振機の性能

|           | ABE基礎用            | HI基礎用             |
|-----------|-------------------|-------------------|
| 起振機寸法(mm) | 120               | 4000              |
| 振動数範囲(Hz) | 0~25              | 0~15              |
| 最大起振力(kg) | 3000              | 10000             |
| 起振方向      | 上下・水平             | 上下・水平             |
| 自重(kg)    | 80                | 1800              |
| 起振機高さ(mm) | 上下 180<br>水平 28.0 | 上下 360<br>水平 60.4 |

表-3 弾性波測定結果

| 記号                        | 不攪乱ローム質地盤 | 埋立地盤  |
|---------------------------|-----------|-------|
| $V_L$ (m/sec)             | 1.30      | 1.57  |
| $V_T$ (m/sec)             | 1.10      | 1.20  |
| $V_L$ (m/sec)             | 3.10      | 3.50  |
| $V_T$                     | 0.43      | 0.43  |
| $G$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 158       | 230.5 |

図-1 変位共振曲線



#### 4. 動的地盤反力係数の算定方法

共振々動数、加速度振中を実験で求め、観振中を加速度振中から換算し、観値をばね支持の式より算出する方法により算定するものとした。上下方向振動および並進回転を伴うばね支持のロッキング振動をモデル化して一般に図-4に示すように画かれる。

a). 上下振動、図-3(a)に示す上下振動モデルにより実測共振振動数 $\omega_r$ を使用し、ばね定数 $k$ と地盤反力係数 $K_v$ を定める式は(1)式とする。この場合 $\omega_r$ は基礎体と同時に振動する土の質量すなわち付加質量の影響が含まれている実測された共振円振動数であり、計算に使用する質量 $m$ は基礎体のみの質量で付加質量は考慮していないことになり、求められる観値は見掛け上の動的観値である。

$$\omega_r = \sqrt{k/m} \quad , \quad K_v = k/A \quad (1)$$

b). ロッキング振動、図-3(b)に示すロッキング振動モデルの固有振動数は(2)式で与えられる。この式に実測共振々動数を用いてばね定数を求めることができるが、この場合、 $K_{Kv}$ は一般に後述の(3)式で求める観値を使用する。

$$\left\{ \frac{\omega_{Kv}}{\omega_r} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{C_0^2}{k^2} + \frac{k^2}{C_0^2} \mp \sqrt{\left( 1 + \frac{C_0^2}{k^2} + \frac{k^2}{C_0^2} \right)^2 - \frac{4C_0^2}{k^2}} \right\} \quad \dots (2)$$

また、中川は実測共振々動数、変位振中を用いて見掛のばね定数を求める式として(3)式を与えている。

#### 5. 実験結果の考察

本研究における加振実験は底面積 $24 \sim 28.5 \text{ m}^2$ 、重量 $3.68 \sim 7.12 \text{ t}$ の範囲の基礎体5種をローム質地盤上に打設して作製し、起振機を据付け、上下、水平方向に加振した。ロッキング振動実験では回転角 $\theta = 10^\circ/10^\circ$ 程度の起振力を加え、行ない基礎体および地盤の動特性を検討したものである。

検討の結果下記の傾向がみられる。

##### 1) 動地盤反力係数の計算結果

上下方向振動時の実測共振々動数を使用し、(1)式より上下方向の地盤反力係数を算出し、表-5(a)に示す。またロッキング振動時の実測共振々動数 $\omega_{Kv}$ に基礎体天端と下端の水平変位量を使用し、(3)式より $K_h$ 、 $K_r$ を算出し、表-5(b)に示す。

##### 2) 基礎体底面に発生する地盤圧力分布

図-2に示す通り、上下方向振動時およびロッキング振動時において基礎体底面に発生する土圧分布は周辺部分に応力集中の傾向があり粘性地盤の特色がみられる。

##### 3) 基礎体底面の寸法による $K_v$ 値

動的地盤反力係数は粘性地盤の場合、周辺の反力集中により弾性理

図-2(a) 上下振動時土圧分布 (H基礎)

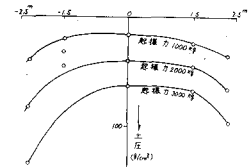


図-2(b) ロッキング振動時土圧分布 (H基礎)

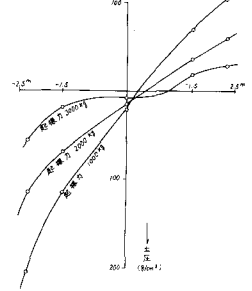
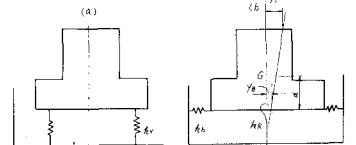


図-3 振動モデル



$$K_h = \omega_{Kv}^2 m \left\{ 1 + \frac{H_v}{H_r} \left( \frac{Y}{Y_0} - 1 \right) \right\} \quad (3)$$

$$K_r = \omega_{Kv}^2 J_0 \left\{ 1 + \frac{H_v H_r}{J_0^2} \left( \frac{1}{Y_{Y_0}} - 1 \right) \right\}$$

表-5(2) 上下振動時の $K_v$ 値

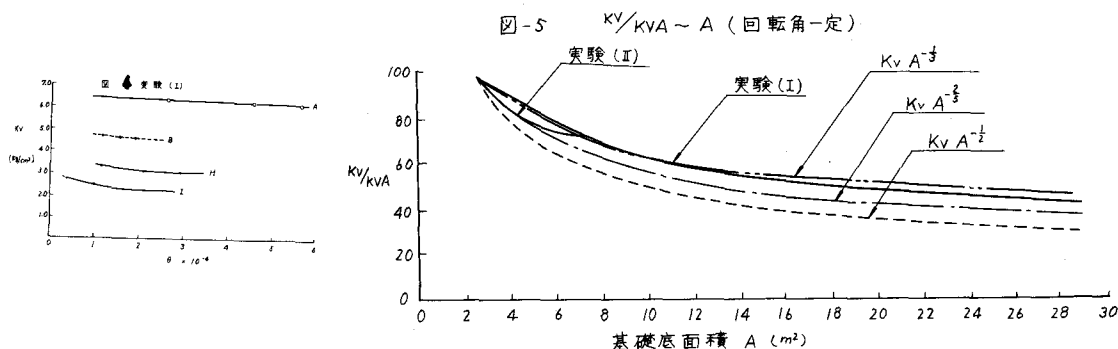
|      | 基礎体名 | $K_v$ (kg/cm²) |
|------|------|----------------|
| 実験 I | E    | 2.91           |
|      | H    | 1.22 ~ 1.44    |

表-5(6) ロッキング振動時の $K_h$ 、 $K_r$ 値

|       | 基礎体名 | $K_h$ (kg/cm²) | $K_r$ (kg/cm²) | $K_{Kv}$ (kg/cm²) |
|-------|------|----------------|----------------|-------------------|
| 実験 I  | A    | 1.1 ~ 6.27     | 1.91 ~ 2.38    | 0.03 ~ 0.38       |
|       | E    | 4.56 ~ 4.63    | 1.92 ~ 2.01    | 0.42 ~ 0.43       |
|       | H    | 3.01 ~ 3.22    | 1.67 ~ 1.76    | 0.55 ~ 0.61       |
|       | I    | 2.46 ~ 2.73    | 1.01 ~ 1.09    | 0.40 ~ 0.41       |
| 実験 II | A    | 3.62 ~ 3.88    | 1.06 ~ 1.30    | 0.24 ~ 0.34       |
|       | B    | 3.10 ~ 3.36    | 1.05 ~ 1.16    | 0.34 ~ 0.35       |
|       | E    | 3.07 ~ 3.30    | 0.96 ~ 1.22    | 0.33 ~ 0.37       |

論的には底面積の平方根に反比例するが、土が完全な弾性体でなく基礎体周辺部には土の破壊部分が発生し、通常その関係は必ずしも理論値のとうりなうない。

この実験はロッキング振動時の際基礎体回転角 $\theta \approx 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の状態で行なわれ、その振動数は一般に起振力が入さくれば減少し、見かけの $K_v$ 値も減少を示すものと考えられ、(回転角と見かけの $K_v$ 値の関係を図示すると図-4の通りである) 回転角一定( $\theta = 2.4 \times 10^{-4}$ )とし $K_v$ の推定を行なう底面積との関係を図示すると図-5の通りになる。(図中には $A^{\frac{1}{2}}$ ,  $A^{\frac{2}{3}}$ ,  $A^{\frac{1}{3}}$ に比例するものとした場合の曲線が記入してある) 図に示されるとうり底面積と $K_v$ 値の関係は弾性理論による $A^{\frac{1}{2}}$ よりもむしろ $A^{\frac{2}{3}}$ に近い値を示した。しかし基礎体の比較的小さいA, B基礎程度ならば理論値である $A^{\frac{1}{2}}$ に比例するものとしても、誤差は10%以下であることが推定される。



#### 6. あとがき

本報告は、各種支持地盤における一連実験の一部を述べたものであり、引き続き砂利基礎、砂質基礎、その他の実験を継続中であり、逐次機会を得て報告したい。

本実験において付加質量の影響を無視した見かけの $K_v$ 値について考察した。現在付加質量の影響、 $K_v$ 比、上下およびロッキング振動時の $K_v$ 値の比較検討も実施中である。またこの実験値について、F.E.M.による計算も逐次実施中である。

なおこの実験実施にあたっては埼玉大学、岡本教授、東大生研、入保教授の御指導を頂いた。