

東京電力 技研 野口俊郎 ○坂口潤一
横手敏郎 入田 孝

1 まえがき

最近10年間の間に送電電圧の高圧化が進み154KV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の機番は逐次変化した。特に我国では被害対策の肉脛で長入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。このため電機機番の耐震設計基準の再検討が行なわれている。筆者らはこれら検討の一部として500KV昇圧のため試作されている500KV級空気しや断番を例にとり、地震およびコンクリート基礎体を含む振動系として扱い理論計算、加振実験を行ない耐震性の検討を行なっている。

本報告はこの機番について自由減衰振動実験および固有振動数計算を行なったので、その結果について述べるものである。

2 理論計算

2.1 500KV級空気しや断番の構造概要と振動モデル

本理論計算は図2.1に示す試作検討中の500KV級空気しや断番を対象とした。今回は図2.2に示す実験で固めてあるしや断部のみについて、このような牙組構造物の振動特性の概考を知ることを目的として実施したものである。

この空気しや断番支持構造のうち支持碍子部は碍子を剛に連結したもので一般のウーメン構造とみなせるが、ステー碍子部はピン接合してあるので引張力のみに関与があり、圧縮力は働かない構造になっている。このためステー碍子部に引張力を加え、引張構造として扱う。コンクリート基礎体は水平、回転変位を伴うロッキング振動を伴うものとする。また振動方向は剛性の低いX-Y面での振動を考え、その振動モデルを図2.3に示す。

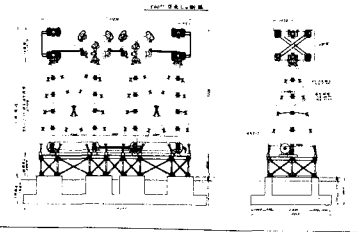


図 2.1 500KV級空気しや断番

2.2 運動方程式と剛性および質量マトリックス

2.2.1 運動方程式

構造全体についての運動方程式は2.1式で表わされる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \quad \dots\dots\dots 2.1$$

M; 質量マトリックス C; 減衰マトリックス

K; 剛性マトリックス U; 変位ベクトル

固有振動計算においては減衰マトリックスおよび外力ベクトルを0とおいて2.2式を解くものとする。M, Kは部材各々の質量マトリックスm, 剛性マトリックスkとすれば

$$M = \sum A^T m A + \sum m_0$$

$$K = \sum \bar{A}^T A$$

m_c : 集中質量×回転慣性 i : 部材全体について j : 集中質量全体について
 A : 基準座標から部材座標系への変換マトリックス

図 2.2 500kV 級空気しき断器 (油断電断器)
 (A 座標系 - 500 座標系)

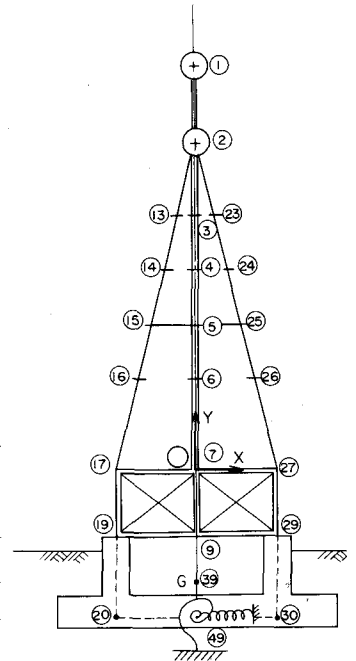
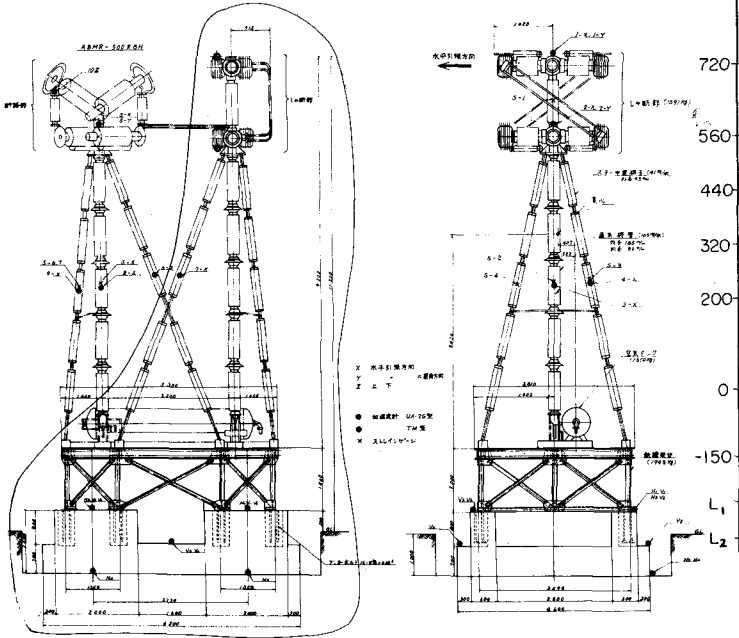


図 2.3 500kV 級空気しき断器のモデル
 (しき断部)

2.2.2 部材の剛性マトリックス

支持部材の剛性マトリックス K は直線要素の剛性マトリックス K_e で剛性を表わすことができる。スレーブ部材は部材部材がピン接合の状態では直線上に直列に並んだ構造様式であるので、この構造は直交方向に剛性をもたない。したがってこのような部材をもつ構造は不安定であるので、この点を解決するため、初期張力を考え、引張構造として非線型項を導入し、形状剛性マトリックス K_G を作り弾性剛性マトリックス K_E との和でスレーブ部材の剛性マトリックスを表わす。

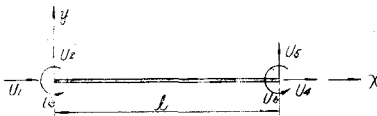


図 2.4 支持部材部梁要素の変位



図 2.5 ピン接合部要素の変位

2.2.3 質量マトリックス

支持部材部、スレーブ部ともかなり重量のある部材で成り立っているので *Rumped Mass* として質点に集中させず分布質量として取扱った。またしき断部は集中質量として回転慣性があるものとして取扱う。

2.3 諸元

2.3.1 上部構造

上部構造は図2-1に示す通り、しゃ断部とこれを支える支持脚管、スレー脚子および鉄構架台、空気タンクとする。その諸元を以下に示す。

	外径(m)	内径(m)	断面積(m ²)	慣性モーメント(m ⁴)	ヤング率	重量(kg)
支持脚管	18.5	8.0	218.5	5548.7	0.65×10^9	105
スレー脚子	9.5	—	70.88	—	0.65×10^9	41

しゃ断部; 1660kg, 空気タンク; 1600kg, 鉄構架台; 1495kg

2.3.2 下部構造

下部構造は地盤とコンクリート基礎体とする。コンクリート基礎体の大きさは図2-2に示す通りで、その諸元は長さ57.13m(コンクリート密度2.4t/m³)、コンクリート基礎体重量の質量回転慣性 $12.06 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{deg}$ である。また図2-3に示す振動モデルにおいて赤全体を支えている鉛直および水平地盤反力係数を求めるため、実験場の不覚乱ローム地盤に図2-2に示すコンクリート基礎体を設置し、これに起振機を据えつけ起振力一定(2t)で加振しロッキング共振振動時の振動数、加速度を測定し、この加速度を変位に換算し動地盤反力係数を求めた。水平加振力2tで共振振動数は 9.3 Hz であり、見掛けの鉛直方向地盤反力係数 $K_v = 2.40$ 、水平方向地盤反力係数 $K_h = 1.01$ と求めた。

この K_v と K_h を使用して、水平方向ばね k_H と回転ばね k_R を2-3式より求めた。

$$k_H = A \cdot K_h, \quad k_R = I_B \cdot K_v \quad \dots \dots \dots 2-3$$

$A = 2.852 \times 10^5 \text{ cm}^2$; 基礎体底面積

$I_B = 5.029 \times 10^9 \text{ cm}^4$; 基礎体底面の断面2次モーメント

$$k_H = 3.42 \times 10^5 \text{ kg/cm}, \quad k_R = 1.21 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{rad}$$

2.4 固有振動数の計算

前述の上部構造、下部構造の諸定数を使用して空気しゃ断系(しゃ断部のみ)の固有振動数を計算した。スレー脚子荷付 $T = 500 \text{ kg}$ 時の固有振動モードを図2-6に示す。この図でわかる通り空気しゃ断系全体の一次振動数は 2.64 Hz である。また参考のためスレー脚子のみ固有振動数を求めると図2-3に示すモデルの③~④間の連結鋼棒のある場合、ない場合において表2-1に示すとおりである。

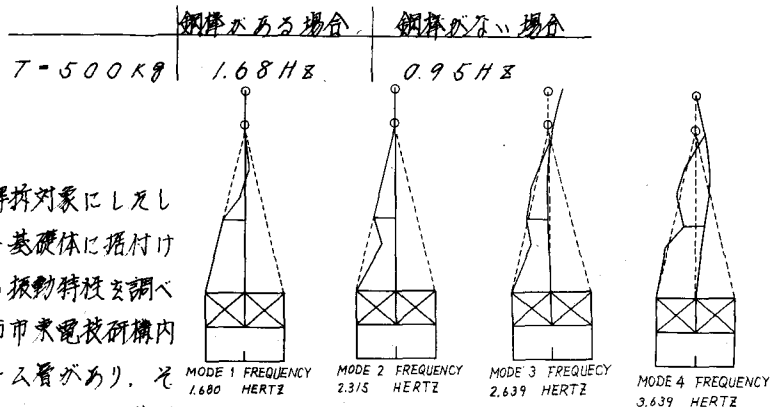


図 2.6 固有振動モード

3 加振実験概要

3.1 加振実験方法

本実験は図2-2に示す解体対象にししゃ断部のみをコンクリート基礎体に据付け自由減衰振動実験を行ない振動特性を調べた。実験場は東京都調布市東電技研構内で地盤は8mの不覚乱ローム層があり、その下は砂礫層である。コンクリート基礎

体は表面ノミ振削し、不意乱ロース着上にコンクリートを打設作成した。またこの基礎体は前述の通りこの機器を振付ける前にX型起振機を振付け、水平方向に加振し基礎体ロッキング振動時の動的K値を求めたものである。今回の自由減衰振動実験においては高さ15mのPC柱を使用しワイヤロープにてレッキ断部先端を水平に引張り、これを切断して加振する方法をとった。

3.2 実験結果

ステー碍子締付力および水平引張力を変えて減衰振動で求めた一次固有振動数(レッキ断部先端に取り付け加速度計番号1・Xにて計測した振動数)を表3.1に示す。

表 3.1

$T \setminus P$	100 kg	300 kg	1000 kg	P ; 水平引張力
100 kg	1.68 Hz	1.64 Hz	1.50 Hz	T ; ステー碍子締付力
500 kg	2.48 Hz	2.44 Hz	2.42 Hz	
1000 kg	2.58 Hz	2.55 Hz	2.53 Hz	

$T=100$ kg時の振動波形は乱れた波形であるが $T=500$ kg, 1000 kgにした場合はレッキ断部、基礎全体が同一振動数で振動し良、単弦振動波形を示した。この時の減衰定数 $\alpha=2\sim3\%$ 程度であった。また図2.3に示す振動モデル Node 1, Point ⑬～⑮間のステー碍子の連結鋼棒を取去った場合の一次振動数は $T=500$ kg, $P=500$ kg時1.43 Hzとなり鋼棒を取去った前に比較して約1 Hz低下し波形も乱れた。なおステー碍子の固有振動数について図2.2に示す

表 3.2

⑬～⑮間の連結鋼棒がある場合となつた場合について	鋼棒がない場合	鋼棒がある場合
自由減衰振動より求めた振動数を表3.2に示す。	$T=500$ kg 1.25 Hz	1.80 Hz

4 考察

1) ステー碍子部の重さがかなりあるのでステー碍子締付力100 kg程度である、ステー碍子部の振動が影響し振動波形は乱れ、またレッキ断部先端の変位もその締付力500 kg, 1000 kg時に比較して大きい。またステー碍子締付力500 kg以上になると系全体がほぼ同一振動数で振動し波形もほぼ単弦振動波形を示した。なおステー碍子と支持碍子の連結鋼棒を取去ると $T=500$ kg以上でも波形は乱れ振動数は低下する。

2) $T=500$ kg時のレッキ断部一次固有振動数は計算値2.64 Hz, 実験値2.48 Hz($P=100$ kg時)であった。またステー一次振動数については $T=500$ kg時ステー碍子と支持碍子連結鋼棒がない場合、計算値0.95 Hz, 実験値1.25 Hz, ある場合前者1.68 Hz, 後者1.80 Hzであった。

5 あとがき

現在レッキ断部と断路部を各々1個設置し図2.2に示す各相分の状態で同時に自由減衰振動させ、振動特性を調査中であり、この自由減衰振動実験終了後、起振機による強制振動実験、自然地震による応答観測を実施予定である。この実験実施については東大生研久保教授の御指導を頂いた。

参考文献

W.C. Hurty, M.F

Dynamics of Structures.

J.S. Przemieniecki

Theory of Matrix Structural Analysis.