

柳奥村組 技術研究所 正員 ○吉川正昭 黒岩真彦
京都大学工学部 正員 山田善一

1. まえがき

大型送電線鉄塔に関する設計は通常、下端固定として、3次元的考慮に基づいた風荷重による解析がなされ、杭基礎の引抜き荷重時、地盤の弾塑性を考慮した静的解析がなされているのが現状のようである。

しかし、風荷重のほか、地震荷重時、地盤・杭・鉄塔の連成による動的相互作用に関して、軟弱地盤における大型鉄塔の振動時性（長周期構造物）を考慮するとき、問題があるように考えられる。

ここでは、軟化が考慮できる模型地盤を用いて、地盤の軟化が杭基礎と地盤の相互作用に与える影響、および杭基礎と鉄塔の連成系に与える影響に関する模型実験を小型振動台を用いて行っている。その結果、地盤軟化の影響を受けた連成振動特性図が理論的に求められている傾向と一致したので報告する。

なお、実験計画の参考のために、モードと周波数応答関数を等価線形化法による2次元FEMで求めた。

2. 予備解析

実物鉄塔に相似則を適用し、モデル化を行った結果を図-1に示す。

対象鉄塔は杭径1.5m、杭長20.0m、杭本数16本の場所打ち杭と4基のフーチングから構成され、杭先端はN値50以上の支持層に根入れされている。

地盤部の G_e 、 h_e と γ を、入力加速度10ガルと100ガルの2ケースについて求める。次に周波数応答関数と固有値を地盤、鉄塔、地盤-杭-鉄塔の場合について求めて、図-2, 3, 4, 5に示す。

入力加速度振幅 (cm/s ²)	10	100
最大せん断応力 (σ (有効ひずみ比))	3.06×10^6 2.0 $\times 10^6$	1.85×10^6 1.20×10^6
G_e (kg/cm^2)	9.19	1.29
h_e (m)	3.0	13.0
γ (%)	32.0	12.0
ρ (g/cm^3)	0.88	0.88
ν (ポアソン比)	0.45	0.46

1 kgf/cm² = 98 kPa

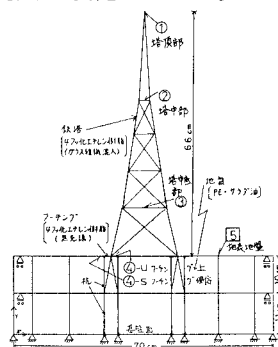


図-1 模型鉄塔

以上、単一系と連続系モデルの比較から、次の 表-1 模型地盤物性値予備知識が得られる。

① 固有振動数低下の割合から、硬地盤 ($G_e = 9.19 \text{ kgf/cm}^2$) の場合は、鉄塔質量効果の方が、地盤剛性効果よりも優勢で、軟弱地盤 ($G_e = 1.29 \text{ kgf/cm}^2$) の場合は、その逆となる。

② 応答倍率の低下の割合から、地盤が軟化すると、鉄塔の1次の応答は低下し、2次の応答が増加する可能性が示唆される。

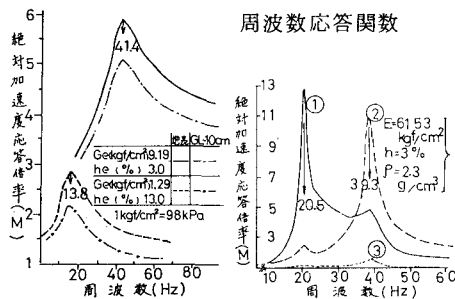


図-2 地盤単一系

周波数応答関数

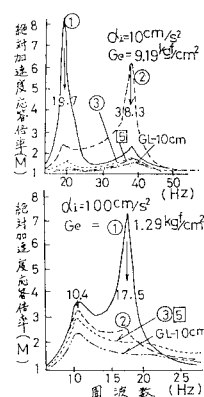


図-3 鉄塔単一系

③ 全体系の応答特性は、硬地盤のとき、鉄塔の動特性が卓越し、軟弱地盤のとき、地盤の動特性が卓越することが示唆される。

図-4 全体系

3. 実験方法

地盤模型材料は、原料ポリエチレンとサラダ油を練混ぜて、地盤収納箱の側壁に設けられた厚さ5cmの発泡スチロール製チップ層の中に造られ、予備実験と解析ではぼせん断振動することが

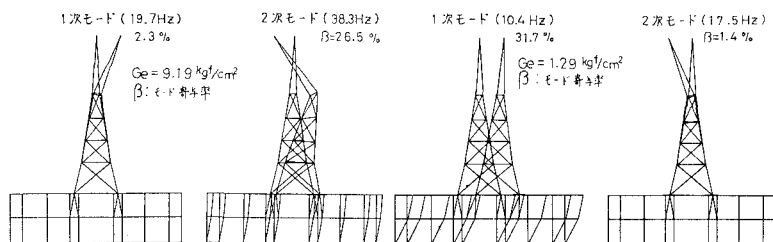


図-5 固有モード (全体系モード)

確められている¹⁾。鉄塔と杭基礎はエチレン樹脂で造られ、1次固有振動数と曲げ剛性を近似させる。

地盤の相似則は、物理現象に関連する主要πナンバが等しいとして求められ、Geとheのγ依存性を近似させ、同一の重力場で実験を行うので、γ，he，ポアソン比，加速度の相似比を1としている。

また、入力波形は、地盤が軟化し易いため、周期的スweep波形（5～50Hz，12秒）が使用されている。

4. 実験結果

図-6, 7に単一系と全体系の入力と応答の関係を示す。

図-6の単一系のfn, he, Mとαiの関係から、地盤で入力依存性が示され、鉄塔では示されない。また、予備解析と一致する。

図-7の全体系では、入力増加に伴う地盤軟化により、地表とフーチングに非線形関係が生じていることが示される。

図-8に、各入力ごとに各測点共振時における1, 2次の変位モードを示す。

5. まとめ

図-7, 8と図-6の単一系鉄塔のfn-αiを考慮すると図-9の連成振動特性が求まる。ここで8次の実験値は、計測されて図-6 入力(αi)と応答(fn, he, M)の関係がないので推定値を示している。以上の考察結果は次のように要約される。

- ①人工地盤模型で、所定の軟化特性（入力強度依存性，振動数依存性，ひずみ依存性）を表現できた。
- ②地盤と杭の相互作用に関して、模型地盤の共振振動数は入力増加に伴い、45 Hzから5Hz近傍まで低下し、軟化現象がみられる。またheは30%に増加する。
- ③杭基礎は地盤より剛性が大きいために、地盤に比べて共振振動数の低下が45 Hzから20Hz近傍までと少なくなり、heも約20%に止まる。
- ④鉄塔下部は杭基礎と同様、fnが低下するのに対し、鉄塔頂部は地盤軟化の影響を受けない。このことから、柔性構造物は剛体のように、地盤軟化による減衰効果は期待し難い。
- ⑤連成振動数特性は、非比例減衰を用いた解析結果と同様の傾向を示す²⁾。
- ⑥微小入力時、鉄塔が主体に揺れ、100ガル近傍でむち打ち現象が現われ、地盤が微小振動でも、鉄塔は大きく揺れる。入力が200ガル近傍で、杭基礎のheが20%に近づき、応答は多少減少する。入力が約220ガルで、杭基礎1次と鉄塔単一系1次が共振した結果、連成系1次と2次が連成し、杭と鉄塔ともに大きく揺れる。
- ⑦杭基礎の適切な剛性を選び、連成振動数特性を調節することにより、経済設計への示唆が得られる。

- ⑧連成振動数特性は、非比例減衰を用いた解析結果と同様の傾向を示す²⁾。
- ⑨微小入力時、鉄塔が主体に揺れ、100ガル近傍でむち打ち現象が現われ、地盤が微小振動でも、鉄塔は大きく揺れる。入力が200ガル近傍で、杭基礎のheが20%に近づき、応答は多少減少する。入力が約220ガルで、杭基礎1次と鉄塔単一系1次が共振した結果、連成系1次と2次が連成し、杭と鉄塔ともに大きく揺れる。
- ⑩杭基礎の適切な剛性を選び、連成振動数特性を調節することにより、経済設計への示唆が得られる。

6. あとがき

当該実験で実土質材料を模型地盤に使用せず、人工模型材料を使用した最大の理由は、地盤の所定の軟化が可能で、相似性に有利と考えたからである。もし、実土質材料を小型材料に使用すると、剛性が強すぎ、軟化現象が所定通り現われないことが容易に理解できよう。

参考文献

1) 吉川，黒岩：軟弱地盤模型材料の動特性，第16回土質工学研究発表会，pp1257～1260，1981. 5
2) 山田善一他：長大つり橋主塔橋脚の振動特性と地震応答解析に関する諸考察，土論集，第207号，1972,11

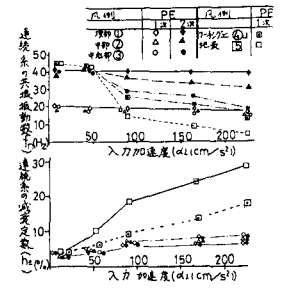
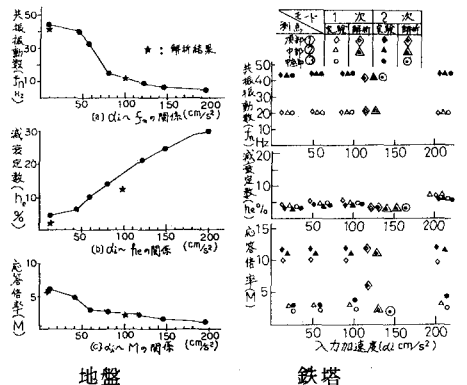


図-7 αiとfn, heの関係 (全体系)



図-9 連成振動数特性 (模式化)

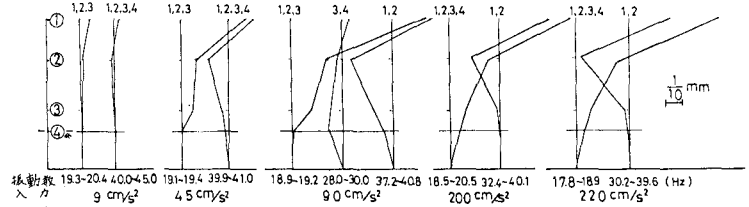


図-8 全体系変位モード