

電柱基礎地盤の液状化対策に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TELEPHONE POLE STABILIZING
TECHNIQUES AGAINST LIQUEFACTION

中野雅弘*・吉川正昭**・斉藤 進***・荒野政信****

By Masahiro NAKANO, Masaaki YOSHIKAWA, Susumu SAITO and Masanobu ARANO

If the ground where a telephone pole is embedded is susceptible to liquefaction during an earthquake, the telephone pole may sink, lean, or even fall down. A series of model shaking tests were conducted to investigate the failure phenomena due to soil liquefaction, and to examine the effectiveness of four types of telephone pole stabilization techniques against liquefaction. Two types of test patterns were conducted to determine the effects of suspended cables on telephone poles during ground shaking.

After showing measured accelerations and excessive pore pressures, and observed horizontal movements and settlements, this paper describes the effectiveness of stabilizing techniques. A foundation of crushed grain with net was found to be the most effective against pole damage due to soil liquefaction resistance.

Keywords: liquefaction, model shaking test, telephone pole stabilization techniques

1. 緒 言

情報化社会の進展に伴い、電気通信の重要度はますます高まっている。地震による電気通信の途絶は一時的であったとしても情報化社会では大きな社会的混乱を招くであろう。そのため情報機能が健全であることが地震発生時の2次災害の防止活動と、震後の早期復旧対策のため必要であり、電気通信屋外設備の耐震信頼性の向上は自然災害研究における緊急の課題であることはいうまでもない。屋外設備の大半は架空線を利用しているが、都市内では地下管路あるいはとう道（または共同溝）などの地中構造物内に通信ケーブルが納められる傾向にある。最近、地中構造物の被害は地盤振動そのものによる割合が低く、そのほとんどが地盤の液状化や、斜面崩壊など地盤の永久変位によるものとの認識が強くなっている。しかし、地盤の液状化や変状を引き起こす原因は地盤振動である。通信ケーブル-電柱全体系の地震被害例

によると液状化により電柱に傾斜、沈下等が生じるため、電気通信に支障をきたしたと報告¹⁾されている。電柱の支持地盤が液状化現象により支持力を失い、電柱が沈下、傾斜、移動等を生じたと考えられる。電柱の液状化時の耐震安全性の検討にあたっては、支持地盤の安定性すなわち電柱根入れ部の対策が重要であることがわかる。電柱基礎構造に対する対策として、砕石、杭基礎などを用いる方法や、浮力と自重のバランスをとり、沈下を防止する方法などが考えられる。しかしこれらの有用性は明らかでない。

一方、これらの研究方法には解析的な方法、実験的な方法と実物観測による方法などがある。解析的な方法で通信ケーブル-電柱全体系の液状化防止効果を求めるには次のような問題がある。地盤の塑性化による材料非線形性の現象のほかに、地盤と電柱の連成振動により、沈下や剝離、滑動などによる幾何学的非線形性が加わるため解析的な方法によって求めることは困難が伴う。

そこで、振動台を用いて、電柱縮小模型と緩詰め飽和砂地盤全体系の模型振動実験を行った。振動台を水平一方向に加振することにより、周辺地盤が液状化し、電柱の根入れ部が支持力を失い、電柱が沈下、傾斜を生じる際の過剰間隙水圧、応答加速度、沈下などの経時変化を求めた。次いで、根入れ部に砕石、根かせ（後述の

* 正会員 工修 日本電信電話(株)筑波フィールド技術開発センタ主幹技師 (〒305 つくば市花畑1-7-1)

** 正会員 工博 (株)奥村組筑波研究所耐震研究課主任研究員 (〒300-33 つくば市大学大砂387)

*** 日本電信電話(株)筑波フィールド技術開発センタ技師 (〒305 つくば市花畑1-7-1)

**** 正会員 工修 (株)奥村組筑波研究所耐震研究課研究員 (〒300-33 つくば市大学大砂387)

Fig.2 参照) 補強などの対策を施して模型振動実験を行い同様の項目を計測した。これらの結果から対策工種による効果を比較した。なお、通信ケーブル-電柱-地盤全体系における通信ケーブルの役割は地盤が電線線路方向に振動すると電柱の振動を拘束し、地盤が線路直角方向に振動すると通信ケーブルの電柱振動への拘束効果はほとんどないと考えられる²⁾。したがって模型電柱は通信ケーブルによる拘束効果を考えた場合と考えない場合の両者を同時に実験した。

2. 実験の方法

対象電柱は、標準サイズのコンクリート電柱(平均直径 19.3 cm, 長さ 8 m) が液状化層厚 3.5 m の飽和地盤に 1.3 m 根入れされた場合を想定している。電柱の地盤条件は種々であるが、日本海中部地震で液状化層厚 3.5 m 程度の砂質地盤に対して根入れ長 1.3 m の電柱の被害例があるため、これを模型化した。縮尺 1/5 の模型電柱は、Fig.1 に示すように電柱の頂部より 10 cm の位置に通信ケーブルを取り付け、通信ケーブルの拘束効果を実験できるように配慮した。図中の左側の電柱は線路方向に加振されるため、電柱頂部で振動が拘束される場

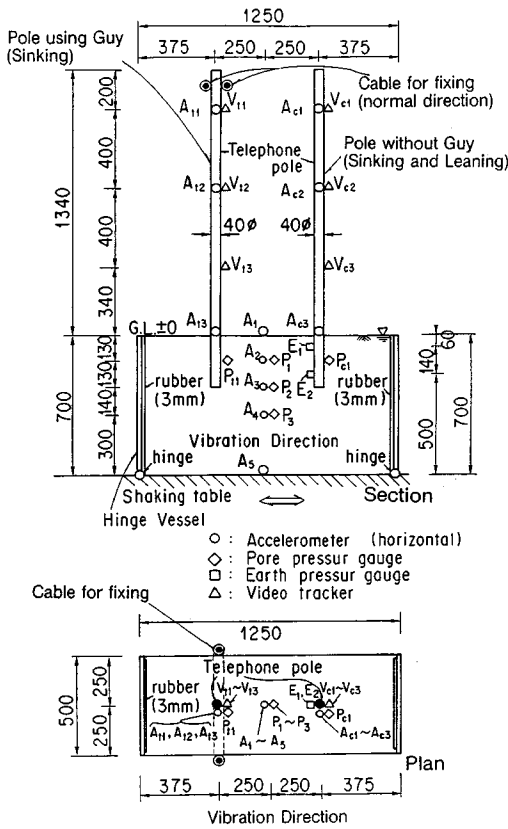


Fig. 1 Ground-Telephone Pole Model.

合を実験しようとしたものである。図中の右側の電柱は線路直角方向に加振され、電線の拘束効果を減じた実験になることを考えている。以下前者を沈下柱、後者を沈下・傾斜柱と称することにする。基礎の形式は Fig.2 に示すように砕石を根入れ部に用い、砕石部を網で囲わない形式と囲った形式(平面形状は矩形のものと同円形のもの)と、さらに根かせ補強の計4種類に変化させて実験を行った。その実物想定値を Table 1 に示し、計測項目を次に示す。

(1) 計測項目

- a) 微小入力時に電柱-地盤の動的相互作用により生じる現象を観察し、共振振動時の応答倍率、減衰定数などの連成振動特性を把握する。
- b) 液状化進行時と完全液状化時に生じる電柱の沈

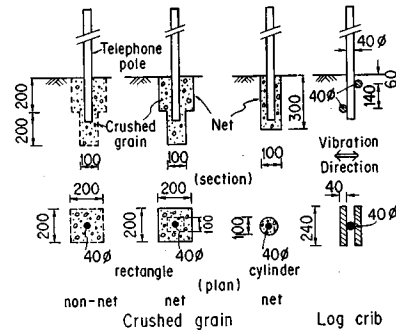


Fig. 2 Telephone Stabilization techniques.

Table 1 Design Details of Prototype and Model.

	Prototype	Model Aim
TELEPHONE POLE		
Material	R. C.	Vinyl Chloride
Length (m)	8	1.6
Diameter (m)	0.19	0.03
Mass (kg)	460	3.7
Density (g/cm ³)	2.4	2.4
Elastic Modulus (MPa)	2.1	0.4
Poisson's Ratio	0.17	0.17
Natural Frequency(Hz)	1.3	3.0 (3.1)
SOIL SYSTEM		
Material	Saturated Sand	Sengenyama Sand
Depth (m)	3.5	0.7
Dry Density (g/cm ³)	Max. 1.7 Min. 1.4	Max. 1.76 Min. 1.44
Relative Density (%)	35	30 (25~30)
Vs (m/s)	100	45 (50)
Coefficient of Permeability (cm/s)	9×10 ⁻³	4×10 ⁻³ (7.5×10 ⁻³)
Natural Frequency (Hz)	7	16 (18)
STABILIZING METHOD		
Crushed Grain		
Shape of Crushed Grain Zone	Rectangle or Cylinder	Rectangle or Cylinder
Grain Size (mm)	30~40	6~8 (5~10)
Net Material	Polyethylene	Stainless Steel
Mesh of Net (mm)	20~30	4~6 (0.25)
Log Crib		
Material	Wood	Wood
Length (m)	1.2	0.24
Diameter (m)	0.2	0.04

() Value in execution

下と傾斜の動特性を把握する。そのため主として沈下が発生した電柱と沈下と傾斜が同時に発生した電柱について、過剰間隙水圧、応答加速度、沈下と傾斜などの時刻歴特性を比較する。

c) 電柱の沈下と傾斜の防止効果を求める。このため、根入れ部に前記の対策を行った場合と、対策なしの場合の過剰間隙水圧、沈下などの液状化特性を比較する。

(2) 模型と実物との相似則および模型材料

模型と実物の相似則と相似比の関係を Table 2 に示す。これを用いて Table 1 の実物想定値から、模型目標値を求めて Table 1 に併記する。相似則は両者の物理現象に関連する主要 π 値^{(2)~(6)}が等しいとして求めた。

実験に用いた模型地盤材料は千葉県浅間山産の山砂で平均粒径 D_{50} が 0.33 mm から 0.44 mm、均等係数 U_c が 2.2 の粒のそろった細砂で乾燥密度の最大値が約 1.7 g/cm³、最小値が 1.4 g/cm³ である。重要な目標値の 1 つであるせん断波速度 V_s を、板たたき法により求めると、 D_r が約 25 から 30 % の模型飽和地盤の V_s は約 40 から 45 m/s となる。模型地盤の作成には空中落下法を用い、水面上 40 cm の高さから相対密度 D_r が約 30 % になるように、4 か所から乾燥砂を水中に自然落下させた。各種対策に用いた模型地盤の密度は乾燥砂の重さを

Table 2 Similarity and Scale Factor.

Function	Similar Systems	Scale Factor
Length	l_m/l_p	1/5
Deflection	l_m/l_p	1/5
Volume	$(l_m/l_p)^3$	1/125
Density	ρ_m/ρ_p	1
Unit Weight	$(\rho_m/\rho_p)(g_m/g_p)$	1
Mass	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^3$	1/125
Time	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	1/2.24
Period	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	1/2.24
Frequency	$(l_m/l_p)^{-1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	2.24
Velocity	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1/2.24
Elastic Modulus	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	1/5
Stress	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	1/5
Moment of Inertia	$(l_m/l_p)^4$	1/625
Strain	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1
Poisson's Ratio	ν_m/ν_p	1
Damping Constant	h_m/h_p	1
Acceleration	α_m/α_p	1

Table 4 Instrumentation.

Gage Type	Weight (g)	Size (mm)	Capacity	Frequency (Hz)	Pick Up Type
Accelerometer					
Semiconductor strain gage	0.7	5, 10, 5	0.5 G	1~100	AL 5-05
Strain gage	40	18, 18, 24	2.0 G	0~60	ASW-2A
Pore pressure gage	2	12φ, 6	19.6 kPa	(Semiconductor strain)	PM-10-02
Earth pressure gage	1	10φ, 25	19.6 kPa		PMS-10-02
Displacement transducer	600	33φ, 330	±50 mm	(Inductance type)	DLT-50BS

Table 3 Dimensional 6 Freedom Shaking Table.

Table Size (m)	4 × 4
Carrying Weight (MN)	Max: 0.6, Standard: 0.2
Directions of Excitation	3-Dimensional & 3-Rotational
Max. Displacement (mm)	X & Y = ±125, Z = ±75
Max. Velocity (cm/s)	X & Y = ±100, Z = 50
Max. Acceleration (G)	X, Y & Z = 3
Frequency Range (Hz)	00 ~ 70

管理することにより D_r が約 25~30 % の範囲に収まるようにした。

原地盤と同じ砂と水を用いたため、模型地盤の目標深さの有効上載圧は原地盤での応力状態を模型で再現したことにならない。原地盤より模型地盤は小さなひずみで過剰間隙水圧が有効応力に達しやすく、液状化しやすい。一方地表への距離が原地盤より短く、透水係数も小さくならないため、過剰間隙水圧は消散しやすい状態にある。これらの問題に対し、入力振動数と、入力加速度、地盤の層厚などの最適な組合せを選ぶことにより、液状化現象を強調して求めたことになる。

次に、電柱模型は塩化ビニルパイプ、根かせ模型は丸木を用いて作製した。模型と実物の電柱の曲げ剛性の相似則を近似的に満足させるため、塩化ビニルパイプを用いた。パイプの中に碎石、砂と水を入れ、その重さを変えて、模型電柱の固有振動数が下端固定時の目標固有振動数に近くなるようにした。

(3) 実験設備と実験条件

振動台の性能⁽⁹⁾を Table 3 に示す。液状化特性を解明する実験においては水平一方向加振で十分であると考え⁽⁶⁾、水平一方向加振とした。Fig. 1 に示すように側方拘束の影響を小さくし、SH 波入力時の変位モードである 1 次のせん断振動を生じやすくした土槽、すなわち、側方ヒンジ支承にした土槽を用いた。側方からの反射を少なくするため側方内側に厚さ 3 mm のゴムを用いた。測定に用いる加速度計、間隙水圧計、土圧計、変位計の仕様を Table 4 に示す。

加速度、間隙水圧、土圧の測定は地盤系で生じる振動が小さくなるように軽量小型な半導体ひずみゲージ型を

用い、これらの計器の密度が周辺地盤とほぼ同じになるようにした。測定位置は Fig. 1 に示すように側壁底部ヒンジ、側方ゴムばね支承の土槽に設置した電柱の柱上部 GL+114 cm と中部 GL+74 cm に、加速度計 A_{n1} , A_{n2} (左側の電柱), A_{c1} , A_{c2} (右側の電柱) および電柱の地表に A_{n3} (左側の電柱), A_{c3} (右側の電柱) とした。2本の模型電柱の中間の地表に加速度計 A_1 , 地中には加速度計 $A_2 \sim A_5$ と間隙水圧計 $P_1 \sim P_3$, 電柱の根入れ部 GL-13 cm に P_{n1} および P_{c1} を図のように配置した。振動モードを求めるため、電柱の上部、中部と中底部 GL+34 cm にはビデオトラッカー用の測点 V_{n1} , V_{n2} , V_{n3} および V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} を配置した。ビデオトラッカーは電柱の水平と上下の振動軌跡を求めるために用いた二次元軌跡計測装置である。一般に、変位の測定には光学式変位計や渦電流式変位計が用いられるが、電柱のように細長い構造物の上下と水平の変位を沈下柱と沈下・傾斜柱で同時に4点測定することは難しい。そのため、ビデオトラッカーを用いることにより、浮き上りと沈下と傾斜を繰り返しながら転倒する様相を把握しようとした。このモニターテレビは縦 384 ドット、横 512 ドットで構成されている。電柱-地盤全体系の縦が約 2 m と長いので、分解能は約 5 mm となる。電線の拘束効果の低い電柱は傾斜が生ずると予想されるので、根入れ部の上部 GL-13 cm と底部 GL-25 cm に土圧計を配置した。土圧の初期値が静止土圧 ($1/2 rh$) に近い状態を示すように均質に地盤を作成し、振動成分を測定する。対策として碎石で囲った場合には、碎石の底部 GL-40 cm に間隙水圧計 P_{n2} および P_{c2} を配置した。入力波は同一の模型に対し微小入力時は、加速度振幅 10 ガルのホワイトノイズと周期的スイープ波動を用いた。加速度振幅 120 ガルと 220 ガルの液状化発生時は正弦波を用い、液状化時の破壊現象を強調して求めた。まず、ホワイトノイズは 1 Hz から 20 Hz までフラットな振動数特性を有するランダム波を 20 秒間用い、スイープ加振は 30 Hz から 1 Hz まで 1 Hz まで低下させるランダウ方式を用い、線形領域での共振特性を求めた。次いで、正弦波加振の入力波数は 20 波とし入力振動数は単一系電柱の共振振動数約 3 Hz と地盤-対策のない電柱系の FEM 固有値解析による固有振動数が 1 Hz 近傍になることなどを参考にして 2 Hz とした。正弦波加振の入力時間は 10 秒となる。加速度振動は液状化進行時と完全液状化時の両特性を求めるためにそれぞれ 120 ガル、220 ガルを用いた。なお本研究では地中深部の過剰間隙水圧が有効上載圧にほぼ等しくなる状態を完全液状化時、至らない状態すなわち 120 ガル入力時を液状化進行時と称した。

間隙水圧の時刻歴応答波形は移動平均法を用いている。過剰間隙水圧の入力加速度 1 波に対する時刻歴応答

波形は、せん断波振動により過剰間隙水圧のピークが 2 回生じる⁶⁾。入力 1 波ごとの移動平均により時刻歴波形を求めると、加振振動数の 2 倍で振動する過剰間隙水圧の振動成分が除去される。そのため移動平均すると原波形を示さなくなるが、同一条件で各種対策の過剰間隙水圧比の上昇を比較するには、問題とならず、逆に相互の比較が行いやすいため、入力 1 波ごとの離散値 32 個を移動平均した。

本研究の実験種類は単一系の地盤、電柱、地盤-対策のない電柱系、地盤-碎石を施した電柱系 (碎石の形状を矩形状にし、網で囲った場合と囲わない場合、碎石の形状を円筒形にし、網で囲った場合の 3 種類)、および地盤-根かせを施した電柱系の 7 種類とした。単一系電柱を除く 6 種類の実験で、目標せん断波速度の実現値 50 m/s とコーン貫入値とがほぼ同一になるように作製した。

3. 実験結果

(1) 単一系の電柱と地盤

入力加速度 10 ガルのスイープ加振による下端固定の電柱 1, 2 次の共振振動数は、それぞれ 3.1 Hz, 19.6 Hz, 1, 2 次の電柱上部 (A_{n1} or A_{c1}) の応答倍率は 4.4 倍, 3.3 倍, 減衰定数は 5.0%, 2.6% となる。模型電柱用の塩化ビニルパイプ内側に水で溶かした直径 3 mm の玉砂利と粘土を入れ、玉砂利の重さを調節することにより、予備解析から求めた一次の固有振動数 3.0 Hz に電柱単一系の第一次共振振動数を近似させた。地盤単一系の微小入力時のせん断振動の固有振動数を FEM や 1/4 波長則で求めた理論値は 16 Hz となる。模型地盤の微小入力加速度が 10 ガル時のスイープ加振とホワイトノイズ入力による共振振動数と卓越振動数は両者とも 18 Hz 近傍にあり、理論値にほぼ近似できている。減衰定数は $1/\sqrt{2}$ 法によると約 5% となる。

次に、液状化の程度と入力加速度の大きさの関係を求

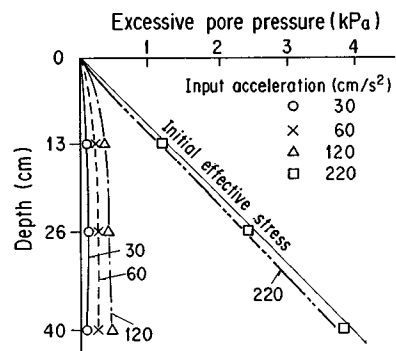


Fig. 3 Vertical Distribution of Excessive Pore Pressure (Ground System).

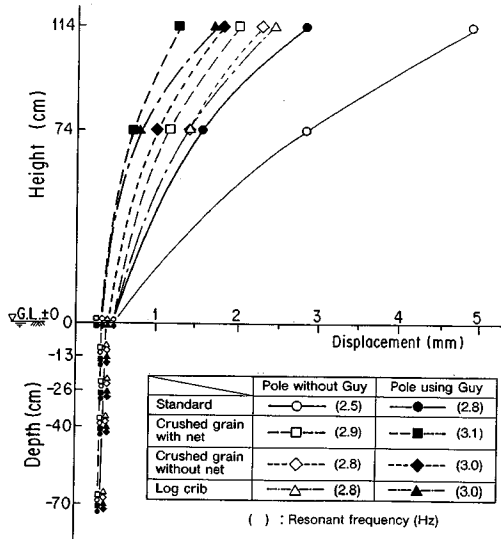


Fig. 4 Displacement Mode (10 cm/s², at the Resonant Frequency).

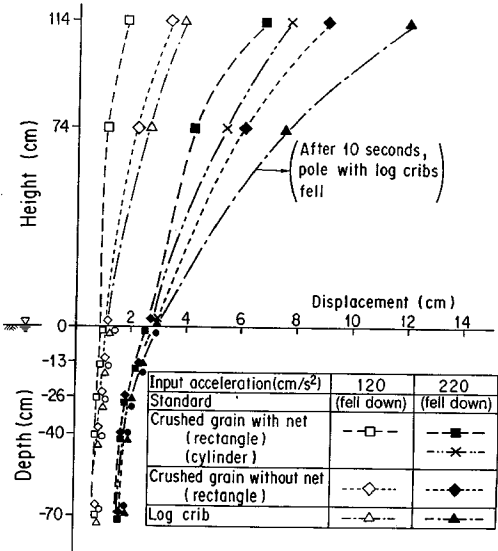


Fig. 5 Displacement Mode of Pole without Guy (120 cm/s² and 220 cm/s²).

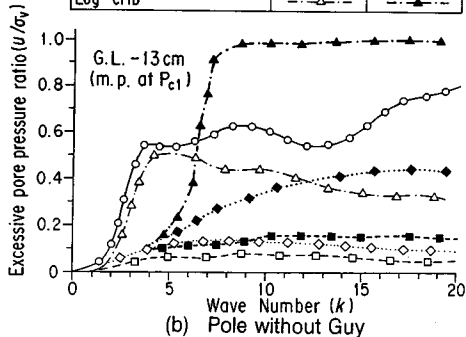
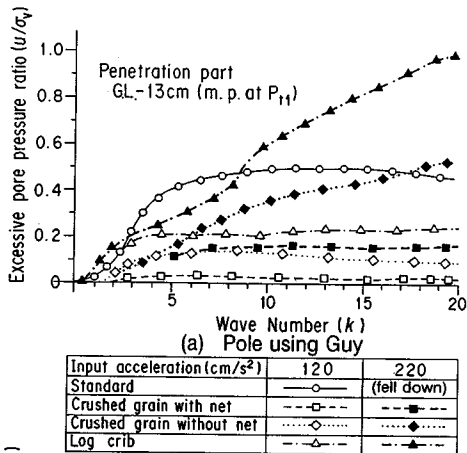


Fig. 6 Time Histories of Excessive Pore Pressure.

めるため、地盤単一系に30ガル、60ガル、120ガル、220ガルと順次、入力加速度を大きくして、2Hzの正弦波加振実験を行った。各入力加速度ごとに過剰間隙水圧

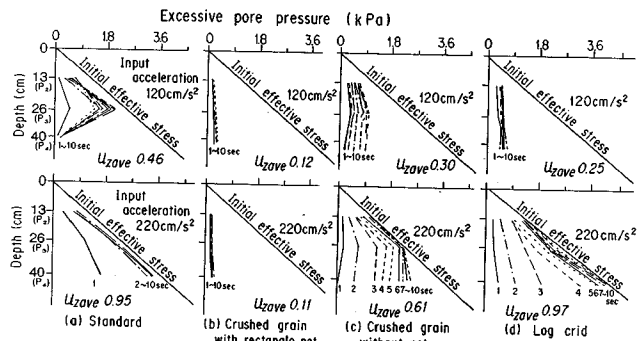


Fig. 7 Vertical Distribution of Excessive Pore Pressure (Time Histories).

の深度分布を求めた結果を Fig. 3 に示す。同図に併記した初期有効上載圧直線と過剰間隙水圧の最大値分布から、入力加速度 30 ガルから 120 ガルまでは液状化進行時、220 ガル時は完全液状化時といえる。

(2) 電柱-地盤全体系

微小加速度 10 ガルのスイープ加振による電柱-地盤全体系の最大応答加速度を変位に換算して、モードを求め Fig. 4 に示す。同図に 1 次の共振振動数を併記した。電線の拘束効果のため沈下柱はあまり応答せず沈下・傾斜柱の方が大きな応答倍率を示す。正弦波加振による 120 ガルと 220 ガル時の沈下・傾斜柱の応答変位の最大値を Fig. 5 に示す。対策なしのケースは電柱が 20 波の正弦波加振中に転倒したため電柱部は同図に示していない。これらの図から、電柱-地盤全体系の最大応答変位分布は電柱頂部が最大値を示し、一次モードに類似すること

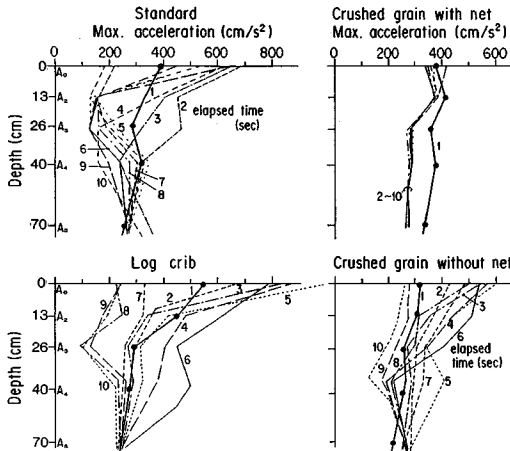


Fig. 8 Vertical Distribution of Response Acceleration.

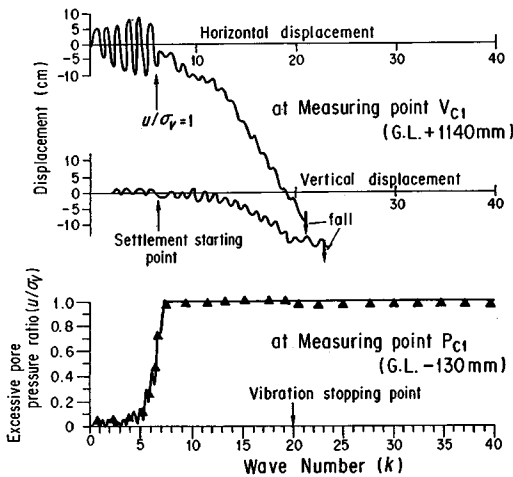


Fig. 9 Response Displacement of Pole without Guy (Log crib, 220 cm/s²).

がわかる。また変位分布の差から液状化程度の差がわかり各種対策による効果の違いがわかる。次に各種対策による過剰間隙水圧比の時刻歴の代表例として、根入れ部 (GL-13 cm) を Fig. 6 に示し、正弦波加振による 120 ガルと 220 ガル時の液状化の程度を比較する。縦軸には過剰間隙水圧の発生量を初期有効上載圧で除した過剰間隙水圧比を用い、横軸の波数 20 は加振時間 10 秒に相当する。深さ方向の過剰間隙水圧を 1 秒から加振終了の 10 秒まで 1 秒間隔で Fig. 7 に示し、各種対策による液状化の深度分布程度を比較する。

Fig. 6 では周辺地盤部の過剰間隙水圧の経時変化は省略したが、同図で過剰間隙水圧比の大きいものは Fig. 7 からわかるように深さ方向の分布でもほとんどの測点で有効上載圧に近づいていることがわかる。また、各種対策時、周辺地盤部の応答加速度の最大値の深度分布を

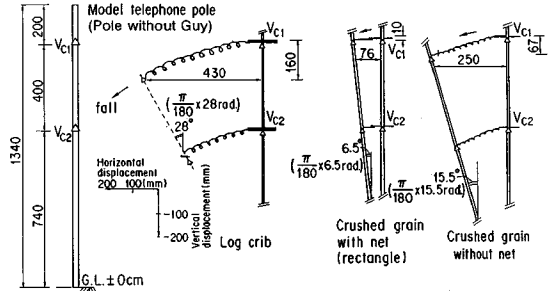


Fig. 10 Orbit of Pole without Guy (220 cm/s²).

Table 5 Settlement.

Cases	Measuring Point		Ground (①)		Pole (②)		Relative Settlement ②-①	
	S (=S+L)	S (=S+L)	S	S+L	S	S+L	S	S+L
Input Acceleration (cm/s ²)	120	220	120	220	120	220	120	220
Condition	S (=S+L)	S (=S+L)	S	S+L	S	S+L	S	S+L
Ground System	15	25	-	-	-	-	(15)	(15)
Combined System							(25)	(25)
Standard	16	27	26	FAL	220	FAL	10	FAL
Crushed grain with net								
Rectangle shape	12	15	3	10	8	10	-9	-2
Cylinder shape	-	20	-	48	-	48	-	28
Crushed grain without net	13	23	5	18	48	67	-8	5
Log crib	12	24	12	15	55	FAL	0	3

unit; mm, S: Sinking, S+L: Sinking under Leaning, FAL: fall

Fig. 8 に示す。同図は入力波形 2 波に相当する 1 秒間の応答加速度の最大値を 1 秒さきで振動終了時の 10 秒まで求めたものである。

沈下・傾斜柱の頂部の水平と上下方向の応答変位の時刻歴波形をビデオトラッカーの標点の動きから求めて Fig. 9 に示す。同図は 220 ガル入力時の代表例として根かせ基礎の場合の測点 V_{c1} の変位波形を示したもので、液状化の程度との関係を求めるため、根入れ部の過剰間隙水圧比の上昇曲線を併記した。沈下・傾斜柱の測点 V_{c1}, V_{c2} の振動軌跡を Fig. 10 に示す。対策のない場合は入力後すぐに転倒したため記入していない。同図から、220 ガル入力時の根かせ、碎石網あり、なしの電柱が沈下しながら傾斜していく破壊の形態がわかる。次に、120 ガルと 220 ガル入力時の周辺地盤と電柱の沈下量を Table 5 に示す。同表に周辺地盤の沈下量を基準にした電柱の相対沈下量を併記した。

4. 考 察

(1) 共振特性と応答変位

微小入力時に、各種対策を施した電柱-地盤の動的相互作用により生じる現象を把握するため、共振振動数、応答倍率、減衰定数を求めて Table 6 に示す。沈下・傾斜柱について対策のない場合と碎石網の対策を施した場合を比較すると、共振振動数は 2.5 Hz であったものが碎石を施すことにより 2.9 Hz と高くなる。変位の応答倍率は 12 倍が 8 倍に減少し、減衰定数は 8% が 15%

Table 6 Resonant Frequency, Magnification and Damping constant.

Cases	Resonant frequency (Hz)		Magnification at the top		Damping constant (%)	
	S	S+L	S	S+L	S	S+L
Standard	2.8	2.5	9	12	10	8
Crushed grain with net	3.1	2.9	4	6	14	15
Crushed grain without net	3.0	2.8	7	8	13	12
Log crib	3.0	2.8	6	8	9	11

S: Sinking, S+L: Sinking under Leaning

と大きくなる。砕石網による対策は共振振動数が高くなることから剛性が大きくなる効果を有することがわかる。さらに、共振曲線から求めた電柱部の減衰定数も約2倍大きくなることから、一般に地盤部のみ有する特徴すなわち、剛性が高まると減衰が低下する現象を全体系では示さない。

通信ケーブルの拘束効果を考えない沈下・傾斜柱は拘束効果を考えた沈下柱より電柱部において大きな応答変位を示す。また、地中部は電柱部ほど両者の応答変位に顕著な差はなく、地盤-電柱系の振動に、地盤部より電柱部の振動の方が大きく寄与する。共振振動数を相似則に基づいて実物に換算する。沈下・傾斜柱の対策のない場合と砕石網の対策を施した場合の共振振動数はそれぞれ約1.1 Hzと約1.3 Hzとなる。砕石を施した実物電柱の電線直角方向の常時微動測定結果は約1.2 Hzから3.5 Hzとばらつくが、ほぼ妥当な値を模型実験で再現しているといえる。次に2 Hzの正弦波加振による120ガルと220ガル時の各種対策による沈下・傾斜柱の応答変位 (Fig. 5 参照) から、最大応答変位は対策なし、根かせ、砕石網なし、砕石網ありの対策順に小さくなる。砕石網ありの対策が各種対策の中で一番応答変位は小さいことがわかる。砕石を囲う網の形状が円形よりも矩形の方が応答変位量が小さくなる。これは Fig. 2 で示したように、施工性を考えた円筒形に比べて、矩形では砕石の量が約4倍大きいためである。

(2) 液状化特性

a) 過剰間隙水圧 地盤単一系の正弦波の入力加速度と過剰間隙水圧 u との関係 (Fig. 3) から、120ガル、220ガルの入力時はそれぞれ液状化進行中、完全液状化時であることがわかった。各種対策による根入れ部の過剰間隙水圧比 u/σ_v の経時変化 (Fig. 6) から120ガル入力時、沈下柱、沈下・傾斜柱とも u/σ_v の最大値は対策なし、根かせ、砕石網なし、砕石網ありの対策順に小さくなる。220ガルの入力時も120ガルと同様の順に u/σ_v の値が小さくなる。周辺地盤の過剰間隙水圧の深さ方向の経時変化 (Fig. 7) から220ガル入力時、対策なしは加振2秒目から初期有効上載圧曲線に過剰間隙水圧が接近し、完全液状化の状態となる。砕石網ありの場

合の周辺地盤は u/σ_v が1に至らず液状化を完成していない。砕石網ありは砕石による排水効果と囲い網による補剛効果のため、周辺地盤も液状化の程度が小さくなる。砕石網なしの地中部の過剰間隙水圧は地表部の過剰間隙水圧ほど上昇しないが、砕石網なしの場合を砕石網ありと比較すると過剰間隙水圧の値は大きくなる。この現象は砕石の囲い網がないため電柱の振動と周辺地盤の液状化により根入れ部を取り囲む砕石がくずれ、液状化した砂が砕石の中に流入し、砕石が目詰まりを生じ、排水効果が少なくなるためと考えられる。根かせの場合は120ガル入力時、液状化の進行状態にあり、水平支持力を失わない。220ガル入力時に、加振5秒後、 u/σ_v が1に至り液状化を完成し、根かせは砕石のように過剰間隙水圧の上昇を抑制する効果がないため、電柱は大きく傾斜する。

次に液状化の程度を1測点ではなく、地盤全体で表現するため、次式を用いて、地盤全体の平均過剰間隙水圧比 $U_{z,ave}$ の最大値を求め、Fig. 7 に併記した。

$$U_{z,ave} = \int_0^z u dz / \int_0^z \sigma_v dz$$

$U_{z,ave}$: 深さ Z の平均過剰間隙水圧比

σ_v : 初期有効上載圧

各測点の分布を用いて求めた各種対策の液状化の程度と $U_{z,ave}$ の最大値による各種対策の液状化の程度は一致し、 $U_{z,ave}$ は各種対策に関する液状化の程度の指標になることがわかる。対策を施さない場合と根かせを用いた場合、120ガル入力時 $U_{z,ave}$ 0.46, 0.25 と差がある。220ガル入力時は0.95, 0.97 と差がなくなる。これは前述の根かせの過剰間隙水圧のところで説明したように液状化を完成しない入力120ガル時は根かせによる水平支持効果があり、電柱の振動が小さいため、対策なしに比べて $U_{z,ave}$ が小さくなる。一方220ガル入力時は完全液状化のため根かせの効果がなく対策なしとほぼ同じ $U_{z,ave}$ になることがわかる。

b) 応答加速度 各種対策の周辺地盤部の最大応答加速度の経時変化を示した Fig. 8 から液状化していくと、最大応答加速度が低下する特性⁴⁾が求められる。砕石網ありの最大応答加速度は、加振2秒後から加振終了時の10秒間でほとんど変化せず液状化の程度が小さいことがわかる。対策なし、根かせ、砕石網なしは砕石網ありと異なり、加振時間の経過に伴い、最大応答加速度が増加し、次いで、液状化により減少していくことがわかる。また前述の電柱-地盤全体系の変位 (Fig. 5) から、応答加速度から求めた電柱頂部の変位が対策なしに比べて根かせ、砕石網なし、砕石網ありの順に小さくなる。液状化すると応答加速度は小さくなり、地盤の変位は逆に大きくなるため、その影響を電柱は受けている。

c) 沈下特性 沈下量を求めた Table 5 によると、一番小さな沈下量は砕石網ありの電柱である。電柱の沈下より周辺地盤の沈下が大きいと、電柱は沈下地盤面を基準にすると、逆に浮き上がったように見える。液状化の程度が小さい順に沈下量は小さく、対策なしの沈下柱に比べ、対策を施した砕石網あり、砕石網なし、根かせはそれぞれ約 0.03~0.11, 約 0.19~0.21, 約 0.25~0.46 程度に沈下が抑えられる。沈下・傾斜の大きな結果として示した根かせを施した場合の水平移動と沈下の経時変化は Fig. 9 より、過剰間隙水圧が上昇中の 1 から 6 波目は主として水平方向に振動する。過剰間隙水圧が有効上載圧に至る 7 波目から沈下を開始し、電柱は傾斜する。水平と上下変位の軌跡を示した Fig. 10 からも、根かせを有する電柱の沈下・傾斜の挙動は、他の対策より大きいことがわかる。電柱は浮き上がりながら傾斜を少しだけ回復し、沈下しながら傾斜する動作を繰り返す。この特徴のある軌跡は入力振動数 2 Hz より小さい振動数で繰り返すことがわかる。

d) 液状化防止対策効果 各種対策時の電柱の沈下と傾斜に対する防止効果を過剰間隙水圧比の最大値に到達する時間、地盤の応答加速度の変化、電柱の水平移動と沈下などから考えて、砕石網ありは液状化防止対策として過剰間隙水圧の上昇を少なくし、水平支持力を有する対策といえる。砕石を取り囲む網がない場合は、液状化時に砕石が散らばり、目詰まりを生じる。根かせは対策なしより電柱部の振動を小さくでき、その結果沈下量を低減できる。しかし、根かせを用いても過剰間隙水圧を消散させる効果は砕石層を設置する場合ほどはないため、周辺地盤が完全液状化し、支持力を失ったとき、液状化を防止する効果は砕石層に比べて少ない。相似則から Table 5 を用いて実物の沈下量を換算すると、対策なしの場合 96.5 cm の沈下となる。日本海中部地震 (1983 年 5 月 $M=7.7$) で、地表面から比較的浅い 1 m 前後に約 3 m の砂層地盤 (湿潤密度約 1.8 g/m^3 , 地下水位 GL-1 m) の電柱の沈下は 1~2 m 程度が多くみられた。これらの結果から判断して本実験は沈下現象をほぼ再現していると考えられる。また対策を施した場合の沈下量は砕石網なし、根かせ、砕石網あり (円形) のそれぞれで 12.5 cm, 15.5 cm, 14 cm となり、対策の効果が認められる。なお沈下した地表面を基準にすると砕石網あり (矩形) は逆に浮き上がったように見える。

5. まとめ

対策前の電柱-地盤全体が地盤の液状化により生じる動特性を対策を施した結果と比較し、要約すると以下のとおりである。

(1) 電柱根入れ部の過剰間隙水圧比の最大値は周辺

地盤と同様対策なし、根かせ、砕石網なし、砕石網ありの対策の順に小さくなる。

液状化防止効果は、砕石網あり、砕石網なし、根かせの順になる。砕石網ありでは地中部の最大応答加速度が液状化に従い低下し応答変位が増加する現象が生じにくくなることと電柱部の応答変位が砕石網ありでは他の対策に比べて小さいことから、砕石網ありがよい液状化防止効果を有することがわかる。

(2) 砕石網なしは砕石が砂の中へ散らばり電柱が支持力を失い、砕石の目詰まりのため消散効果が砕石網ありに比べて悪くなる。根かせは、液状化進行中は制振効果を有するが、過剰間隙水圧を消散させる効果がないため、液状化完成時の防止対策としては適当ではない。

(3) 沈下量は液状化の程度が小さい順に小さい。砕石網ありの電柱は沈下量が最も小さく、対策なしの沈下柱に比べ、対策を施した砕石網あり、砕石網なし、根かせはそれぞれ、約 0.03~0.11, 約 0.19~0.21, 約 0.25~0.40 程度沈下が抑えられる。実物の沈下量を換算すると、対策なしの場合 96.5 cm の沈下となる。日本海中部地震での電柱沈下は 1~2 m 程度であることから本実験が沈下現象をほぼ再現していると考えられる。また対策を施した場合の沈下量は砕石網なし、根かせ、砕石網あり (円形) のそれぞれで 12.5 cm, 15.5 cm, 14 cm となり、対策の効果が認められる。

(4) 根かせを有する電柱の水平移動と沈下の様相は、液状化進行中は水平振動が卓越し、完全液状化時は沈下と傾斜を開始する。砕石網あり、砕石網なしに比べて沈下と傾斜の挙動が大きく、浮き上がり沈下と傾斜を繰り返す。

6. あとがき

以上の考察から電柱の液状化防止対策として砕石網ありを行うと、根入れ部の補剛効果による制振効果、過剰間隙水圧の消散効果による液状化防止対策効果があることを示し、有力な液状化防止工法の開発を進めるうえでの有益な資料を得ることができた。

本研究は地震波 (SH 波) が鉛直下方から入射する場合を対象としたものであり表面波が入射する場合は扱っていない。また通信ケーブルの拘束効果を考えない沈下・傾斜柱は拘束効果を考えた沈下柱より、電柱部において大きな応答変位を示す。地中部は電柱部ほど両者の応答変位に顕著な差がないため、全体系に電柱部の振動が大きく寄与し、通信ケーブルの拘束効果による影響が重要な要因となることがわかった。一方電線を介した電柱間の干渉により電柱が傾斜することも考えられる。そこで電柱 3 本による電線を含めた 2 径間全体径の模型振動実験を行うことが今後の課題として残される。なお、

本実験で得られた成果については、まだこれらの検討課題が残されているものの、電柱の液状化対策の第1歩として、今後現場施工に活用していく予定である。

謝 辞：本研究は地下構造物の地盤変状対策に関する調査・研究に関する委員会（委員長：久保慶三郎東大名誉教授）の指導で行われた。実験ならびに本論文のとりまとめにあたり久保慶三郎東大名誉教授、建設省土木研究所の岩崎敏男研究調整官、佐々木康振動研究室長には貴重なご示唆をいただいた。また、地震予知総合研究振興会の池田潤一氏、日本技術開発の佐伯光昭氏には実験計画の検討にあたりご助力をいただいた。ここに記して以上の方々に深謝の意を表したい。

参 考 文 献

1) 土木学会, 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1986

年10月。

- 2) 吉川正昭・黒岩真彦・山田善一：模型地盤を用いた鉄塔-杭基礎-地盤の非線形連成振動に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第334号, pp.53~61, 1983年。
- 3) 吉川正昭・吉川 実・土岐憲三：高架橋基礎の制振効果に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.26, No.1, pp.163~173, March, 1986.
- 4) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：模型砂層地盤の液状化現象, 土と基礎, No.1654, pp.45~51, December, 1986.
- 5) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：模型杭基礎と液状化現象, 土と基礎, No.1687, pp.31~36, April, 1987.
- 6) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：上下・水平同時加振時の模型杭基礎と液状化現象, 土質工学会論文報告集, Vol.27, No.4, pp.197~204, December, 1987.
(1988.5.18・受付)