

(143) 実験に基づいた洞道―地盤間の動的相互作用に関する考察

中部電力(株)○土山茂希、早川誠、永楽開発(株) 坪井利弘
佐藤工業(株) 中村晋、佐藤潔、小林恒一、末富岩雄

1. はじめに 地中送電用洞道の様な地中線状構造物の耐震設計は、応答変位法つまり地震時における構造物周辺地盤の変形を地盤―構造物の動的相互作用を表す地盤ばねを介して作用させ構造物の応答を求める手法により行われている。この方法では、地盤―構造物の動的相互作用を表す地盤ばねの値は、地中線状構造物の耐震計算を行う上で重要な因子のひとつとなっている。しかし、その値の評価手法は、現行の各種耐震設計指針間でも異なっており、統一的評価手法が示されていないのが現状である。

地盤ばねの評価手法を確立するため、従来より地中線状構造物の小型模型またはガス管の様な埋設管の静的載荷実験¹⁾、起振機、振動台を用いた動的載荷実験^{2, 3)}等の実験的研究や地盤―構造物の動的相互作用を考慮した解析的研究⁴⁾が各所で行われている。しかし、実験結果が直接的に設計指針に反映された例は、埋設管の様に実験条件が実際と同程度に設定できる構造物を除き少ない。これは、地盤―構造物の動的相互作用のメカニズムが十分に明らかとされていないことに起因していると考えられる。

著者らは、洞道―地盤間の動的相互作用つまり地盤ばね定数を評価する手法を確立するために洞道の小型模型を静的・動的に載荷する実験を実施した^{5, 6)}。ここでは、静的実験と動的実験により得られた荷重―変形関係を比較し、洞道―地盤間の動的相互作用のメカニズムについて考察を行った。なお、実験では洞道軸方向の地盤ばね定数(せん断ばね)を対象とした。

2. 実験手法 1) 実験概要 実験は、図-1に示す様に洞道の小型模型(中実RC構造)を盛土中に埋設し、油圧ジャッキ(静的載荷)、大型起振機(動的載荷)により荷重を模型に加えることにより行う。加力には、油圧ジャッキ(静的載荷)、または大型起振機(動的載荷)と模型をロッドにて連結することにより、模型軸方向に直接荷重を加える。なお、盛土とロッドとは力の伝達がないよう盛土中のロッドはシース内に配置した。また、模型と地盤の間の地盤ばねがすべてせん断ばねとなる様に鋼板製のプロテクターおよびスポンジを用い、模型両端部では地盤と接触しない構造とした。

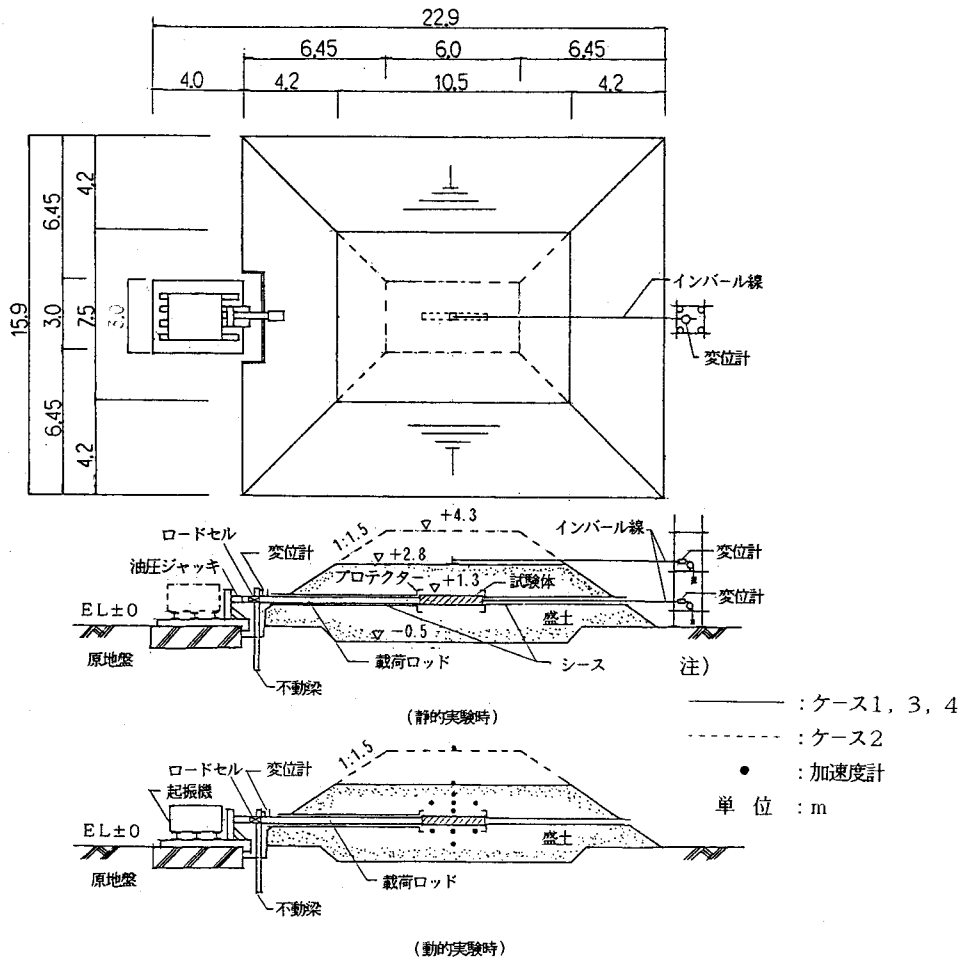
静的載荷による模型の変形は油圧ジャッキと盛土の間に設けた不動梁とロッドの変位およびその反対側の模型端面での変位とにより測定する。地盤の変形として、新たに工夫した装置⁵⁾による模型上約30cmの地盤変位および盛土天端変位を測定した。動的載荷による模型と地盤の変形は、模型(3か所)や盛土内(19~20か所)に設置した加速度計により測定された加速度波形を積分して求めた。模型に作用する荷重は、模型と油圧ジャッキの間に設けたロードセルで測定を行った。

2) 実験条件 実験は表-1に示す4つの条件について行った。ここではケース1を標準実験とし、土被り(模型に作用する土圧)の異なるケース2、地盤の密度が異なるケース3により地盤条件の差異が地盤ばね定数に及ぼす影響を検討出来るようにした。ケース4はケース1で用いた模型と断面形状が異なる模型を用い、構造物の断面形状の差異が地盤ばね定数に及ぼす影響も検討出来るようにした。

盛土材料は、瀬戸産の山砂である。地盤の密度は盛土作成時におけるまき出し厚さと締め固め回数により調整し、現場密度試験(コアカッター法)により確認した。また、原位置においてS波探査(板叩き法)および標準貫入試験を実施するとともに、種々の室内土質試験により盛土材料の特性を詳細に把握した。表-2に盛土の土質定数を示す。

3) 載荷方法 静的実験の載荷方法は『杭の水平載荷試験方法(土質工学会)』に準じ、模型壁面の摩擦抵抗により推定した最大作用荷重を5段階に分け、各段階の目標荷重までの載荷、除荷を繰り返し、最大作用荷重まで荷重を増加することにより行った。荷重の載荷、除荷は最大荷重の1割程度の荷重で行った。動

的実験では、加振力として最大加振力までの4段階で加振力を設定し、小さい加振力から始めて順々に加振力を段階的に増加して载荷した。各加振力では、周波数を1～8Hzの間で1Hzごとに変化させた。表－1に静的・動の実験で設定した模型への最大作用荷重を示す。



図－1 実験概要図

表－1 実験条件

ケース		1	2	3	4
模型形状 (m)	幅	0.2	同左	同左	0.5
	高さ	0.3	〃	〃	0.3
	長さ	3.0	〃	〃	3.0
土被り (m)		1.5	3.0	1.5	1.5
最大作用荷重 (t)	静的	2.1	3.8	4.6	4.9
	動的	1.2	1.8	1.5	1.5

表－2 盛土の土質定数

	ケース1、2、4	ケース3
比重	2.67	
粒度分布	礫分	16 %
	砂分	50 %
	シルト分	27 %
	粘土分	7 %
粘着力 (kg/cm ²) *	0.0	0.09
内部摩擦角 (度) *	31.3	31.8
平均湿潤密度 (tf/m ³)	1.63	1.81
平均含水比 (%)	14.7	14.6
せん断弾性係数 (tf/m ²) **	2800	5340

* 三軸圧縮試験による

** S波検層によるせん断波速度より算出

3. 実験結果および考察 静的実験と動的实验により得られた模型に作用する荷重と変形の関係を図2～4に示す。静的実験時の変形は模型中央における载荷時の変位、動的实验時の変形は模型中央の加速度波形より求めた変位とした。同一荷重に対する模型の変形は、動的实验により得られた変形が静的実験により得られた変形より大きくなっていることが分かる。

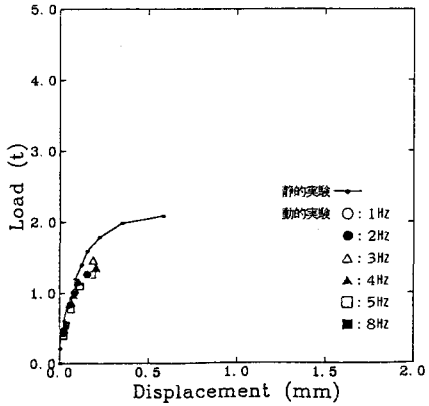


図-2 荷重-変形関係 (ケース1)

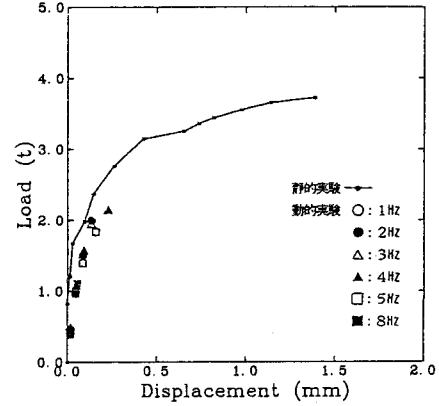


図-3 荷重-変形関係 (ケース2)

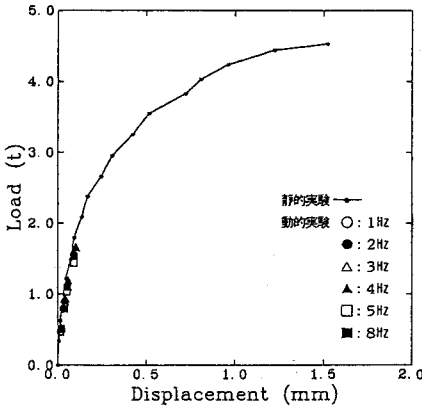


図-4 荷重-変形関係 (ケース3)

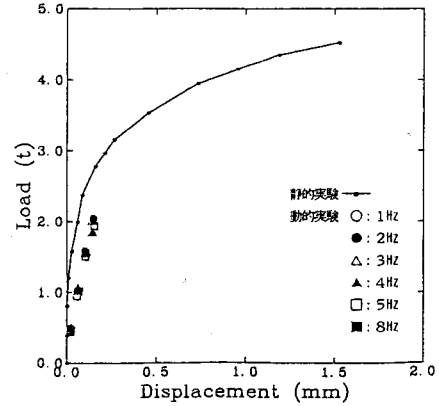


図-5 荷重-変形関係 (ケース4)

静的実験と動的实验により得られた模型の荷重-変形関係の差異に基づき、地盤-模型の動的相互作用について考察する。動的实验による模型の変形には、模型に作用する慣性力の影響が少ないことが指摘されている⁷⁾。すると、動的实验による模型の変形 U_D は、主として式(1)に示す様に二つの変形の和として表すことが出来ると考えられる。

$$U_D = U_{DS} + U_{DR} \quad (1)$$

U_{DS} : 模型に伝達された荷重が静的に作用した際の模型の変形 (以後静的変形成分と呼ぶ)

U_{DR} : 盛土の振動による変形 (この変形は模型に加えられた動的な力が地盤中に逸散していく過程で生じるものであり、以後逸散変形成分と呼ぶ)

逸散変形成分 U_{DR} の分布は、盛土に固有のものと考え、図-6に示す盛土全体の3次元有限要素モデルの固有ベクトルと相似な形状とする。盛土の固有周期は加振周波数より短いので、加振により励起されるのは主に1次モードであると考えられる。前報⁵⁾では、静的実験による盛土の変形は模より30cm程度の範囲内で生じていることを示しており、盛土天端の変位は逸散変形成分 U_{DR} のみにより生じたものと考えられる。

そこで、盛土内の振動による変形分布は、盛土天端の変位を実験により得られた変位とした盛土の固有形分布とする。すると、図-7に示した様に模型の静的変形成分およびそれにより生じた盛土の変形（破線）は、実線で示した動的実験により得られた盛土深度方向の地盤変位分布より2点鎖線で示した模型の逸散変形成分により生じた盛土の変形を除くことにより得られる。

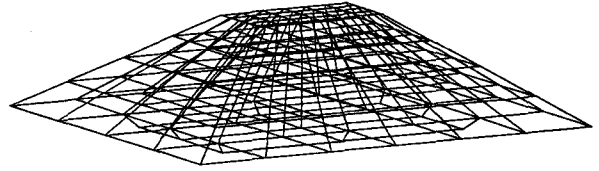


図-6 盛土全体モデル

この様にして求めた U_D 、 U_{DS} と静的実験により得られた模型の変形 U_S の関係を、ケース1について図-8に示す。静的変形成分 U_{DS} は、周波数にかかわらず U_S とほぼ一致していることが分かる。他の実験ケースについても同様な結果が得られている。このことは、動的実験により得られた地盤-模型の動的相互作用効果（地盤ばね特性）は静的実験により得られた地盤-模型の相互作用として評価を行うことが可能であることを示していると考えられる。

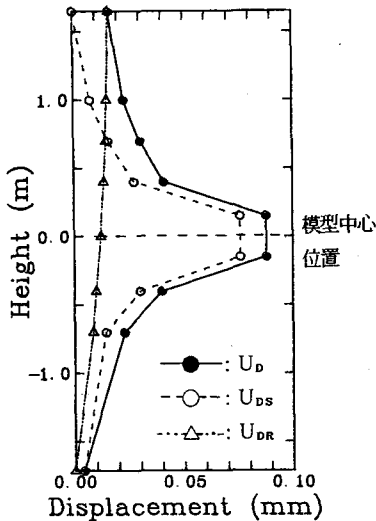


図-7 逸散変形成分により生じる盛土の深度方向変位分布

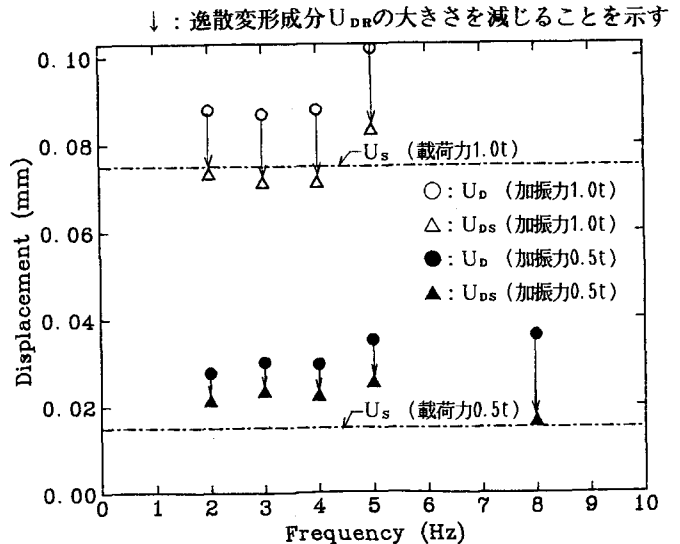


図-8 静的変形成分 U_{DS} と静的実験による変形 U_S （ケース1）

5. あとがき ここでは、地中送電用洞道と地盤間の動的相互作用つまり地盤ばね定数を評価する手法を確立するために実施した洞道の小型模型に対する静的・動的载荷実験に基づき、地盤-模型間の動的相互作用について考察を行った。参考文献

その結果、地盤-模型の動的相互作用（地盤ばね特性）は、静的実験により得られた地盤-模型の相互作用として評価を行うことが可能であることが分かった。

- 1) 西尾宣明、高木真人、吉越亘、管軸方向の地盤の拘束力に関する研究、埋設管に関するシンポジウム、pp. 25 ~ 30、1975年10月
- 2) 例えば高津和義、山田淳、志波由紀夫、伊藤文雄、沈埋トンネルの地震応答解析に用いる地盤ばね定数に関する実験および解析、第19回地震工学研究発表会、pp. 489 ~ 492、1988年
- 3) 例えば栗林栄一、岩崎敏男、川島一彦、宮田忠明、埋設管と埋土間の動的相対変位および抵抗力に関する実験的研究、建設省土木研究所資料、第1266号、1977年7月
- 4) 例えば高田至郎、高橋俊二、山部泰男、硬質塩化ビニール管の地震時挙動シミュレーション、水道協会雑誌、pp. 27 ~ 39、1980年4月
- 5) 土山茂希 et al、地中線状構造物の地盤ばね定数に及ぼす地盤条件の影響について（静的実験結果）、第24回土質工学研究発表会、1989年6月（投稿中）
- 6) 土山茂希 et al、地中線状構造物の地盤ばね定数に及ぼす地盤条件の影響について（動的実験結果）、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、1989年10月（投稿中）
- 7) 高田至郎、埋設管路-地盤系の復元力特性と地震応答解析、土木学会論文報告集、第249号、pp. 1 ~ 11、1976年5月