

# 埋土地盤上に建つ構造物の振動特性

名古屋大学工学部 正会員 ○ 今岡克也  
同 多賀直恒

## 1. 序論

丘陵地において切り盛り造成された地盤は、地表面形状や地下構造の不規則となるいわゆる不整形地盤である。この種の地盤では大地震により、平坦地の場合と異なった様相の著しい被害がこれまでに多くみられた。主なものをあげると<sup>1)</sup>、1968年十勝沖地震の異種地盤上にまたがる構造物の被害(八戸東高校校舎地下柱の破壊)、1978年宮城県沖地震の丘陵造成地における斜面すべりによる構造物被害(仙台市緑ヶ丘)等がある。これらの被害の根本原因は、地盤の不整形性による局所的な増幅効果にあるといわれている。この種の被害を防止・軽減するには、不整形地盤の振動性状ならびに構造物-地盤の相互作用性状を明らかにしなければならない。

そこで本研究では、丘陵地における実地盤のうちトラフ状の谷底を埋土造成した地盤とその上に埋土、切土をまたいで建てられた構造物を対象として常時微動観測と平面歪でモデル化した2次元境界要素法による定常応答解析から、①埋土層の形状が地盤振動に及ぼす影響を探り、あわせて②構造物がうける地盤振動の影響を構造物の設置位置に対して検討し考察する。

## 2. 地形及び構造物概要

対象とした地盤はまわりに標高80m程度の山に囲まれた丘陵地にあり、小学校施設を建設するため東西方向約110m、南北方向約190mの敷地造成が行われた。図-1に造成前後の地形と建物配置を示す。地質調査は造成前後で20地点あまり行われているがそのうち教室棟付近の東西方向の推定地層断面図を図-2に示す。この図より、埋土はN値10前後の砂質土から成り、最大厚さは10m前後でありその下層には沖積層等が、西側で1~2m、東側で4m程度存在していることがわかる。図-1に示す建物のなかで、今回対象とした構造物は埋土と切土にまたがる教室棟と埋土を完全にまたいで建てられた管理棟である。図-4、5に断面を示すが、これらは、RC造の4階及び3階建の学校建築で、基礎構造は教室棟が杭径400mm、鉄板厚さ9mmのSC杭であり、管理棟が杭径800mmの場所打ち杭である。杭長は支持地盤までの深さに応じ6~12mと変化している。

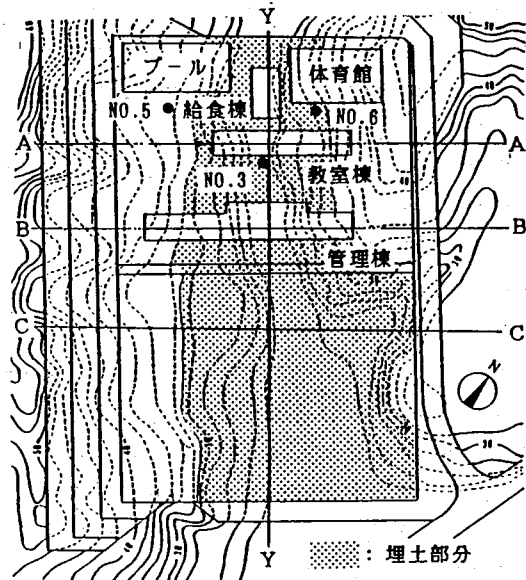


図-1 造成前後の地盤概要と建物配置

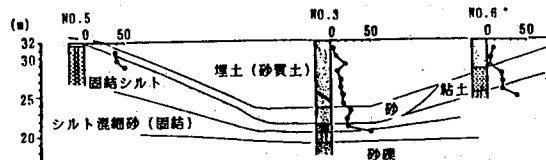


図-2 地質柱状図と推定地質断面 (A-A)

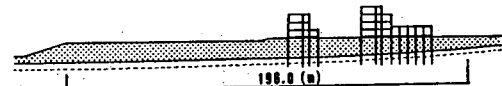


図-3 南北方向断面 (Y-Y)

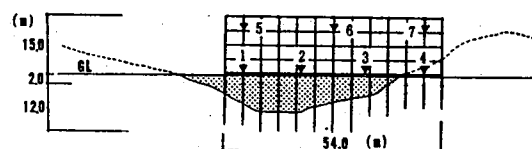


図-4 教室棟断面 (A-A)と観測点位置

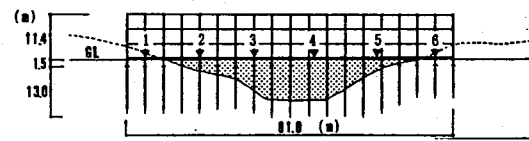


図-5 管理棟断面 (B-B)と観測点位置

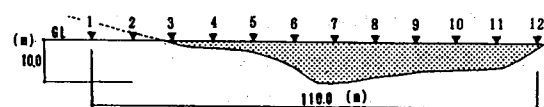


図-6 運動場断面 (C-C)と観測点位置

Dynamic Behavior of Structure Built on Embedded Soil Layer  
K. Imaoka and N. Taga (Nagoya University, School of Engineering)

### 3. 常時微動観測

今回の観測は1989.3月、周囲に人影のない静穏な日曜日の朝から夕方にかけて地盤及び構造物上で東西方向に測線を張り4度に分けて行われ、そのうち構造物上での主要な観測の概要とデータ処理方法を表-1に示す。

1) 埋土地盤観測 初めに埋土地盤の振動特性を把握するために運動場のやや北側に110mの測線を張り(図-6)10m間隔で12台の常時微動計を設置して谷筋(南北)方向と谷筋直角(東西)方向に分けて観測を行なった。切土部を基準にした平均振幅値と各地点のフーリエスペクトル(図-7, 8)から以下に考察する。

- ①埋土部では両方向とも振動レベルが埋土厚に対応して大きくなり、最大部は切土部に比して2倍程度となる。
- ②埋土部の振動性状には方向性があり、増幅される振幅レベルは谷筋方向の方がその直角方向より2割程度大きい。
- ③切土部の卓越振動数は3Hzと5Hz付近に現れ、埋土部でもこれに合わせて3-6Hzにスペクトルピークがある。

2) 両棟同時観測 埋土部で生じる振動の構造物への伝達特性(スラブへの入力効果)を計測するため、教室棟と管理棟の1階スラブ上に微動計を設置して各方向別に観測を行った。(図-4, 5) 平均振幅値と東端の切土部上の値で基準化された埋土中央部のフーリエスペクトル比から以下に考察する。

- ①谷筋方向の平均振幅は埋土地盤上の場合と同様に両棟とも埋土厚に対応して増大し、切土部に対する比は教室棟で1.5倍、管理棟で2~2.5倍である。
- ②谷筋直角方向の平均振幅は、管理棟で沖積層厚が薄い西側切土部だけが小さい以外は、埋土と切土上でほとんど一定であり、埋土による影響をほとんど受けていない。
- ③卓越振動数についても、谷筋方向では埋土部の卓越と考えられる3Hz, 5Hz付近が増幅され埋土地盤による影響が顕著に現れるが、谷筋直角方向では5Hz以下の増幅はほとんどなく、埋土部も切土部とほぼ同じ周期で振動していることがわかる。
- ④以上の事は構造物の形状と埋土の形状が大きく影響し、"谷筋方向では埋土地盤の影響を顕著に受けて切土部を筋に埋土部を腹にして振動するが、谷筋直角方向では建物的一部分にかかる埋土部の影響は受けにくい。"ことがわかり、谷筋方向が特に重要であると考えられる。

3) 教室棟1階最上階観測 構造物の振動特性における埋土部の影響を計測するため、教室棟の1階と4階の各地点に微動計を設置して、主に谷筋方向と谷筋直角方向

表-1 常時微動観測とデータ処理概要

	両棟1階同時観測	教室棟1階最上階観測
観測地点	教室棟:1-4、管理棟:1-6	教室棟:1,4,5-7
観測方向	水平2成分に分けて観測	水平2成分同時観測
観測装置	固有周期1秒の常時微動計を速度成分で使用	
データ収録	約30分の観測を行い50秒間を4~10回収録	
フーリエスペクトル	時間刻み0.05秒でデータ数1024、N*フーリエ変換の幅0.4Hz	

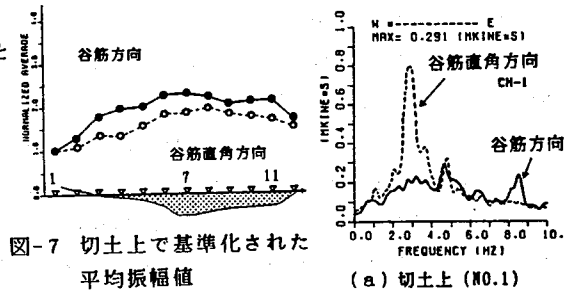


図-7 切土上で基準化された平均振幅値

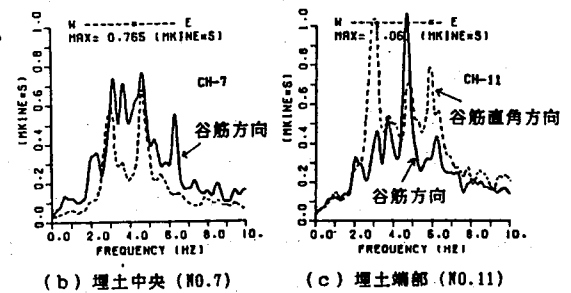


図-8 各地点のフーリエスペクトル

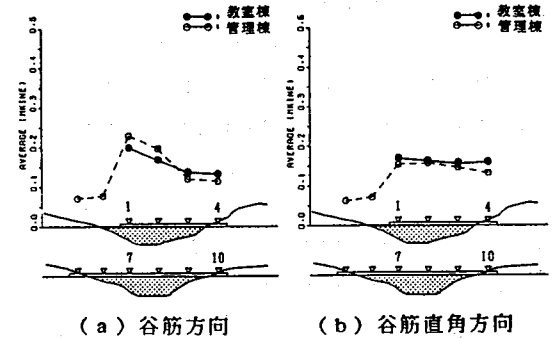


図-9 1階スラブ上の平均振幅値

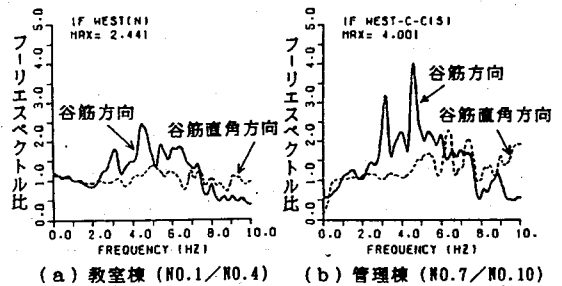


図-10 切土上1階に対するフーリエスペクトル比

で同時観測を行った。平均振幅値と東端の1階スラブ上に対するフーリエスペクトル比から以下に考察する。

① 1階スラブ上では2)と同様に谷筋方向では切土部を節に埋土部を腹にして振動し、谷筋直角方向では埋土切土部が一体となって振動しており、その大きさは切土部ではほぼ等しい。最上階(4階)スラブ上でも振動形は1階と同様であるが振幅は谷筋方向よりその直角方向のほうが全体的に大きい。これは構造物の剛性が谷筋直角(桁)方向よりも谷筋(梁間)方向の方が高いためと考えられる。

② 構造物の卓越振動数を見ると特に谷筋直角方向で5Hz付近の卓越が顕著である。谷筋方向にも埋土厚の大きいところで同じように5Hz付近の卓越が顕著であるが、切土上で1階スラブ上がこの振動数で卓越しない部分の最上階はあまり増幅せず、基礎固定時の建物の1次振動数と思われる6-7Hzで増幅している。

③ このため谷筋直角方向ではこの5Hzの埋土の卓越振動数で構造物全体が一体となって振動するため問題はないが、谷筋方向では埋土部上だけがその影響を受けるために切土部上と振動形状が異なり切盛り境界部上の構造物には水平方向に局部的な応力が発生すると考えられる。

#### 4. 境界要素法による理論解析

この解析では地盤-構造物系を平面歪状態にあるとして二次元均質等粘弾性体と仮定し、鉛直下方より上昇する調和SH波に対する地盤-構造物各点の応答倍率と位相遅れを求めた。なお、解析で扱う変位は全て面外(谷筋直角)方向である。

##### 4-1 解析手法

voigt型の内部粘性減衰を考慮した弾性体のSH波に関する2次元波動方程式は

$$((\mu + \eta \partial_t)(\partial_{xx} + \partial_{yy}) - \rho \partial_{tt})u = 0 \quad (1)$$

である。ここに、 $\mu$ はせん断弾性定数、 $\rho$ は質量密度、 $x, y$ は水平、鉛直座標、 $u$ は面外方向変位、 $t$ は時刻を $\partial_i$ は $i$ についての偏微分を意味する。また $\eta$ は粘性係数であり、系の卓越振動数 $f_p$ とその時の減衰定数 $h$ とにより、次式で与えられるものとする。

$$\eta = 2\mu h / f_p \quad (2)$$

ここで、場が定常であるとしてそのときの円振動数を $\omega$ とすると、波動方程式は次式で書き直される。

$$(\partial_{xx} + \partial_{yy} - \beta^2)u = 0 \quad (3)$$

$$\beta^2 = \rho \omega^2 / (\mu + i\eta \omega)$$

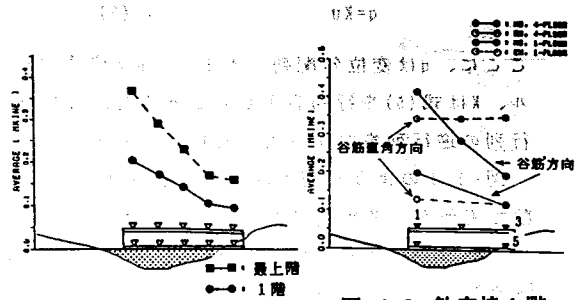


図-11 教室棟1階、最上階の平均振幅値(10点観測)

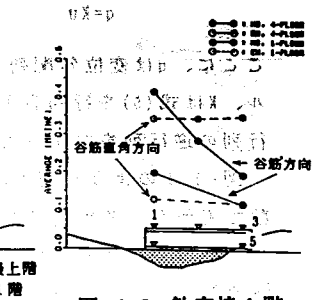


図-12 教室棟1階、最上階の平均振幅値(両方向同時)

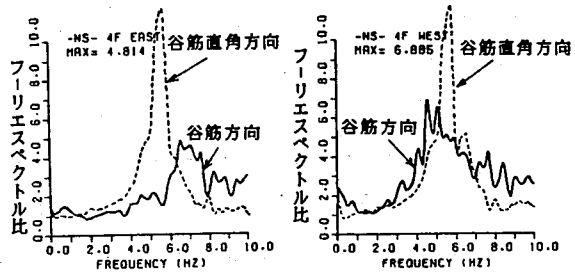


図-13 教室棟最上階の切土上1階に対するフーリエスペクトル比

地表面( $y=0$ )で応力零の条件を加えた(3)の基本解は、

$$u^* = (H^{(2)}_0(\beta r_1) + H^{(2)}_0(\beta r_2)) / 4i \quad (4)$$

$$r_1 = ((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)^{0.5}$$

$$r_2 = ((x-x_0)^2 + (y+y_0)^2)^{0.5}$$

である。ここに、 $(x_0, y_0)$ は基本解算定のときの集中外乱源の座標であり、 $H^{(2)}_0$ は零次第2種ハンケル関数である。重み付き残差法により境界積分の形で式(3)を書き直すと、

$$c_i u_i + \int u q^* d\Gamma = \int u^* q d\Gamma \quad (5)$$

を得る。ここに、 $c_i$ は集中外乱源点の位置 $i$ が(滑らかな)境界上であれば0.5の定数、 $q^* = n u^*$ 、 $n$ は境界面の方向余弦である。

ここで、境界 $\Gamma$ の変位 $u$ と変位勾配 $q$ を離散化する。境界 $\Gamma$ を $N$ 個の要素に分割し、各要素内では場の量が一定であるとして、式(5)を書き直すと、

$$c_i u_i + \sum u_j q^* d\Gamma = \sum q_j u^* d\Gamma \quad (6)$$

を得る。集中外乱源位置 $i$ を各要素の中心に作用させ、未知量 $u$ をすべて境界 $\Gamma$ 上で定義させるようにすると、次式のマトリクス方程式を得る。

$$q = Ku \quad (7)$$

ここに、 $q$ は変位勾配列ベクトル、 $u$ は変位列ベクトル、 $K$ は式(6)を行列表示したときの左辺行列に右辺行列の逆行列を左から乗じた行列である。

図-14のような埋土地盤に入射角 $\theta$ をもつ調和関数で表わされる平面SH波が入射する場合を考える。領域1と2で成立する式(7)と境界 $\Gamma$ での変位・応力の連続条件より、

$$(K_1 + \alpha K_2)u = K_1 u_0 - q_0 \quad (8)$$

$$\alpha = \mu_2 / \mu_1$$

を得る。ここに、 $K_i$ は $i$ 領域の $K$ 行列、 $u_0, q_0$ は領域1が領域2と同一媒体としたときの境界 $\Gamma$ 上の各要素中点の変位と変位勾配であり、次式で示される。

$$u_0 = 2 \exp(-i\omega x \sin \theta / V_s) * \cos(\omega y \cos \theta / V_s)$$

$$q_0 = (\partial_x u_0) n_x + (\partial_y u_0) n_y \quad (9)$$

ここに、 $V_s$ は領域 $i$ のせん断波速度、 $n_x, n_y$ は法線の $x, y$ 方向の方向余弦である。

境界 $\Gamma$ 上の変位場は式(8)を解いて決まる。領域1の地表面変位は、境界 $\Gamma$ 上の変位 $u$ 、変位勾配 $q$ とを式(6)に代入して求まる。

#### 4-2 埋土地盤の解析結果と考察

1) 解析モデルの設定 解析の対象は常時微動観測を行った埋土地盤であり、境界要素法により図-14のように31要素でモデルした。地盤の弾性定数については単位体積質量は埋土層、基盤とも $1.8 \text{ t/m}^3$ とし、

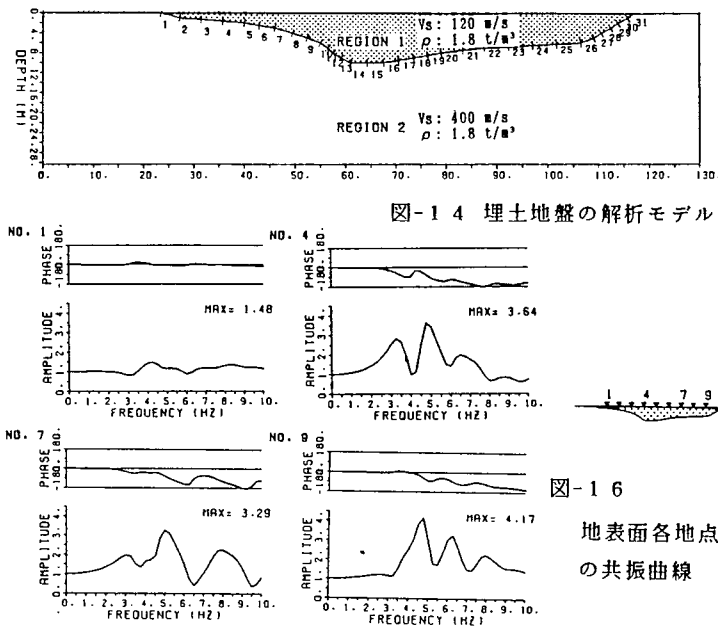


図-14 埋土地盤の解析モデル

図-16

地表面各地点の共振曲線

せん断波速度は、 $N$ 値・土質・地質よりせん断波速度を推定する正木らの実験式<sup>2)</sup>に基づいて基盤では $N$ 値50以上の砂れきより $400 \text{ m/s}$ 、埋土部では $N$ 値10の砂質土より $120 \text{ m/s}$ の値を設定した。地盤の減衰については、地盤の1次卓越振動の減衰定数を2%とした。

2) 解析結果と考察 モデル解析は入力振動数を $0.25 \text{ Hz}$ 刻みで40回行い、地表面における応答倍率の分布と各地点の共振曲線を求めた。応答倍率ピークの中には位相の変化を明確にするため入射波のそれを基準として同位相の場合○印、逆位相の場合●印で示す。これらの図より以下に考察する。

- ①  $2-3 \text{ Hz}$ の低振動数域では埋土部は、埋土厚に比例して振幅が大きくなり、全体では切土部を節に埋土中央部を腹にした振動モードとなり、常時微動観測で得られた結果とよく対応している。(図-15)
- ②  $5 \text{ Hz}$ では埋土中央部を節にした振動モードで卓越し、さらに高振動数になると埋土部の各部に節ができ位相も変化して複雑な振動モードとなるが、応答倍率自体は低下していく。(図-15)
- ③ 埋土部地表各点での振動には3つの卓越振動数域があり、それらは $3 \text{ Hz}$ 、 $5 \text{ Hz}$ 、 $7.5 \text{ Hz}$ 付近である。基盤が平坦な各地点の卓越振動数は埋土厚さの $1/4$ 波長の振動数と大体対応している。(図-16)
- ④ 基盤が傾斜しているNO.9での共振曲線は他の埋土部と異なり1次元では考えられない値になる。
- ⑤ 切盛境界部にあるNO.1ではほとんど埋土部の卓越の影響を受けず、応答倍率は切土部と変わらない。

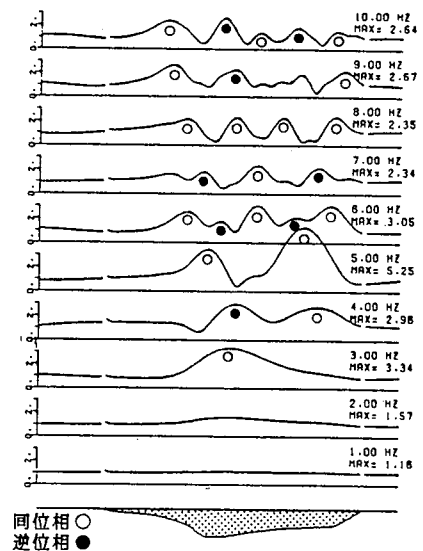


図-15 地表面上の応答倍率分布

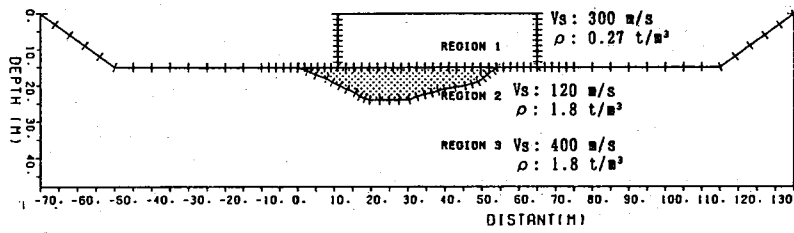


図-17 埋土-切土にまたがる構造物の解析モデル

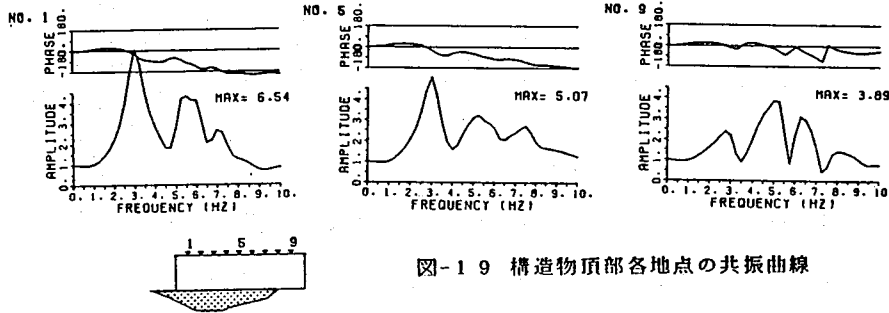


図-19 構造物頂部各地点の共振曲線

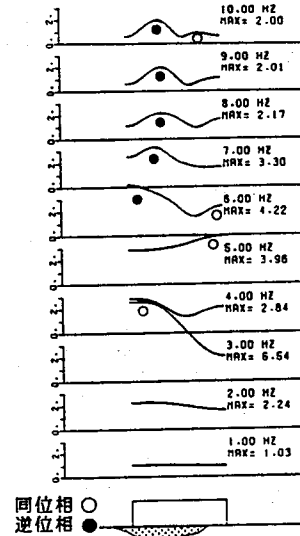


図-18 構造物頂部上の  
応答倍率分布

#### 4-3 埋土-切土にまたがる構造物の振動特性

1) 解析モデルの設定 解析モデルは常時微動観測を行った教室棟の東西方向断面(図-4)の構造物-地盤系を図-17のように115要素でモデル化した。その際、構造物も中実の長方形形状の均質等方粘弾性体とし、またこの系に半無限体の基本解が利用できるように、基盤を広い範囲にわたり陥没させた形でそのカルデラ内中央に構造物を設置して陥没深さは構造物の高さと一致させている。なお、このモデル化で両端の斜面上の要素は、構造物内の変位応答に影響を与えない程度に構造物から遠く離している。

地盤定数は地盤解析で用いた値をそのまま用い、構造物の弾性定数については、せん断波速度は、構造物の固有振動数を微動観測から求められた5Hzとして1/4波長則より求めて300m/s、重量密度は1t/m<sup>2</sup>から0.27t/m<sup>3</sup>、減衰定数は構造物1次固有振動において5%とした。また地盤と構造物は完全密着接触とし現象を端的にみるために構造物はベタ基礎とした。

2) 解析結果と考察 解析は入力振動数を0.25Hz刻みで40回変化させて行い、構造物頂部の応答倍率の分布と各地点の共振曲線を求めた。これらの図より埋土-切土にまたがる構造物の振動特性を考察する。

①2-3Hzの低振動数域では構造物頂部の各地点のうち埋土部が厚い部分が大きく増幅し、全体では切土部を節に埋土部を腹にした振動モードとなり、常時微動結果とよく対応している。(図-9 a と図-18)

②6Hz以降では構造物のうち埋土部上にある左側は入

力波と逆位相になって振動している。特に6Hzでは構造物の1次固有振動数に近い切土部上でも腹になり、中央の切盛り境界部を節とした2次モードで振動し、その際、水平方向に変位勾配が大きくなる切盛り境界上の構造物には局部的に応力集中が生じると考えられる。(図-18)

③構造物頂部各点での振動には3つの卓越振動数域があり、それらは3Hz、5Hz、7Hz付近である。これらはそれぞれ埋土地盤の1次卓越振動数、構造物の1次卓越振動数と埋土地盤の2次卓越振動数に当たると考えられ、7Hzの卓越は埋土部上(NO.1,5)で逆位相となっている。(図-19)

④常時微動観測の結果と比較すると1階スラブ上のフーリエスペクトル比(図-10, a)とはよい対応を示しているが、4階スラブ上でのフーリエスペクトル比(図-13, b)とはあまり対応していない。これは、この解析モデルが構造物内の増幅特性を的確には評価していないためと考えられる。

#### 4-4 埋土をまたぐ構造物の振動特性

1) 解析モデルの設定 解析モデルは常時微動観測を行った管理棟の東西方向断面(図-5)の構造物-地盤系を図-20のように121要素でモデル化した。

その際の要領と弾性定数、減衰定数等は前節のモデルと同様に行った。

2) 解析結果と考察 解析は入力振動数を0.25Hz刻みで40回変化させて行い、構造物頂部の応答倍率の分布と各地点の共振曲線を求めた。これらの図より埋

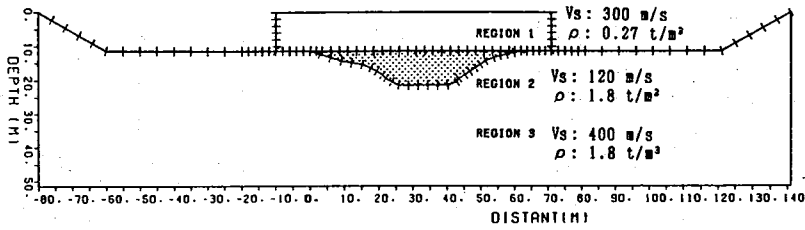


図-20 埋土をまたぐ構造物の解析モデル

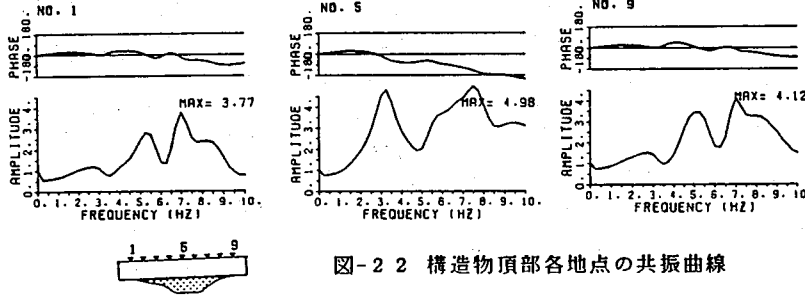


図-22 構造物頂部各地点の共振曲線

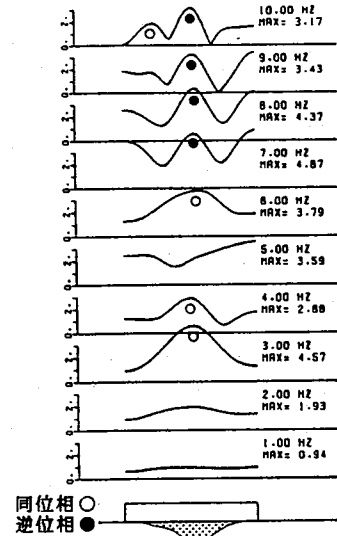


図-21 構造物頂部上の  
応答倍率分布

土-切土にまたがる構造物の振動特性を考察する。

①2-3Hzの低振動数域では構造物頂部の各地点のうち埋土部が厚い部分が大きく増幅し、全体では切土部を節に埋土部を腹にした振動モードとなり、常時微動結果とよく対応している。(図-9 aと図-21)

②7Hz以降では構造物のうち埋土部上にある中央部は入力波と逆位相になって振動している。特に7Hzでは構造物の1次固有振動数に近いため切土部上でも腹になり両側の切盛り境界部を節とした2次モードで振動し、その際、水平方向に変位勾配が大きくなる切盛り境界上の構造物には局部的に応力集中が生じると考えられる。(図-21)

③構造物頂部各点での振動には3つの卓越振動数域があり、それらは3Hz、5Hz、7Hz付近である。これらはそれぞれ埋土地盤の1次卓越振動数、構造物の1次卓越振動数と埋土地盤の2次卓越振動数に当たると考えられ、7Hzの卓越は埋土部上(NO.5)では切土部上と逆位相となっている。(図-22)

④常時微動観測結果のうち管理棟1階スラブ上のフーリエスペクトル比(図-10、b)と比較すると、解析結果では構造物の1次卓越振動である5Hzの卓越が生じていないが、3Hzと7Hzのピークについてはよい対応を示している。(図-22)

## 5. 結論

不整形地盤のなかでトラフ状の谷底を埋土造成した地盤を取り上げ、その上に埋土-切土をまたいで建てられた構造物を対象として常時微動観測と2次元

解析を行い得られた結論を以下にまとめる。

- (1)埋土地盤の振動レベルは埋土厚に応じて大きくなるが、その増幅の割合は谷筋方向がその直角方向より2割程度大きい。
- (2)低振動数域では、切土部を節に埋土中央部を腹にした1次モードとなり、次に埋土中央部を節にした2次モード、さらに高振動数になると埋土部の各節に節ができ位相も変化して複雑な振動モードとなるが、応答倍率自体は低下していく。
- (3)埋土をまたいで建つ構造物は、谷筋方向では埋土地盤の影響を顕著に受けて切土部を節に埋土部を腹にして振動するが、谷筋直角方向では建物の一部にかかる埋土部の影響は受けにくい。
- (4)地盤の2次卓越振動数域が構造物の1次固有振動数に近い場合には、この振動数域では切盛り境界部を節とした2次モードで振動し、その際、水平方向に変位勾配が大きくなる切盛り境界上の構造物には局部的に応力集中が生じると考えられる。

## < 参考文献 >

- 1)多賀直恒;地盤震動における地形・地盤の不整形性の影響、第10回地盤震動シンポジウム、日本建築学会1982、pp.45-56
- 2)正木和明、坪井利弘、谷口仁士、飯田波事;名古屋地盤のS波増幅特性、愛知工業大学研究報告、No.14B 1979、pp.138-14.
- 3)富樫豊、横井薫;谷を埋め造成された地盤の常時微動観測、18回土質工学会、1983、pp.665-666
- 4)今岡克也、加藤嘉昭;境界要素法を用いた不整形地盤の振動特性、19回土質工学表会、1984、pp.619-620
- 5)多賀直恒、今岡克也、吉川由数;造成地盤上に建つ構造物の振動性状、23回土質工学会、1988、pp.795-796