

常時微動計測に基づく低層 RC 造建物の伝達関数推定にレーリー波による 回転入力を与える影響

INFLUENCE OF ROTATIONAL FOUNDATION INPUT MOTION DUE TO RAYLEIGH WAVE ON TRANSFER FUNCTION ESTIMATION OF LOW-RISE R.C. BUILDINGS BASED ON MICROTREMOR OBSERVATION

八木 茂治*, 福和 伸夫**, 飛田 潤***

Shigeharu YAGI, Nobuo FUKUWA and Jun TOBITA

It is investigated that influence of rotational foundation input motion due to Rayleigh wave on the transfer function estimation of low-rise R.C. buildings. The discussion is based on the vibration tests on four low-rise R.C. buildings that have same foundation type, shape of plan and structural condition with different height. Microtremor observation was made with and without traffic vibration. Earthquake response is also observed and compared with microtremor case. The result shows that the transfer function estimation of low-rise R.C. buildings is affected by the rotational foundation input motion due to Rayleigh wave. The general feature observed of transfer function is confirmed by sway-rocking model subjected to Rayleigh wave.

Keywords : low-rise R.C. building, transfer function, microtremor, soil-structure interaction, natural frequency, Rayleigh wave
低層 RC 造, 伝達関数, 常時微動, 動的相互作用, 固有振動数, レーリー波

1. 序論

都市部に多く存在する軟弱地盤上の中低層 RC 造建物の場合、地盤に比べて建物の剛性が大きく、相互作用の影響が強いと考えられる。耐震設計に相互作用効果を取り入れることは重要な課題であるが、中低層 RC 造建物の地盤・基礎条件は多種多様であり、都市部では隣接しているなど、その相互作用の影響の理論評価は難しく、地震記録に基づく検討が重要である。しかし、既往の地震観測に基づく研究の多くは高層建築物などの重要構造物を対象としており、中低層 RC 造の検討例は少ない^{例えは 1)~5)}。このため、容易に実施でき、多数の建物のデータを収集できる常時微動計測の重要性は高い^{例えは 6), 7)}。

常時微動計測に基づく建物の振動特性の検討は数多く行われてきた^{例えは 6), 7)}。中低層 RC 造の常時微動計測では、地盤の影響が強く、最上階のスペクトルだけでは振動特性の検討が困難な場合が多い。このため、地盤もしくは建物基部と建物最上階の伝達関数による検討が行われている^{8)~11)}。多くの場合、入力を地盤もしくは建物基部への水平入力と仮定し、地盤・建物連成系の特性を建物頂部/地表（以下、Top/GL）から、また基礎固定系（正確には基礎スウェイ固定系）の特性を建物頂部/1階（以下、Top/1FL）から、それぞれ評価している。しかし、中低層建物では、常時微動から求めた伝達関数の振幅に固有振動数に対応する明確な卓越ピークが見られなかったり、ピーク付近での位相が反転しないなどの特徴を示すことが多く、正確なパラメータ推定が困難なことがある。このように伝達関数を乱す要因の一つに、風による上部入力の影響があり、和泉ら⁸⁾、石橋ら⁹⁾により検討されている。しかし、風外力の影響が小さい条件で計測された低層建物でも、伝達関数が乱されることが多い¹⁰⁾。石橋ら¹²⁾は、Top/1FLの伝達関数は基礎のロッキングの影響を受けていることを指摘し、入力が地盤の水平入力のみである場合についてロッキングの影響を除いた基礎固定系の伝達関数推定式を求めた。山谷ら¹³⁾は、この式に基づいて実際の建物の特性を推定している。このようなロッキング動の影響を考えると、地盤の回転入力がある場合には、その影響は

さらに大きいと考えられる。筆者らは既報¹⁴⁾で、軟弱地盤上の低層 RC 造では、常時微動計測による Top/GL, Top/1FL の伝達関数推定では、固有振動数が同定できるような良好な推定結果が得られない場合が多いことを示し、その原因の一つとして、レーリー波が卓越するエアリー相では基礎・地盤条件によっては回転入力が生じ、伝達関数を乱す可能性があることを指摘した。常時微動計測は種々の制約から、周辺地盤上に多くの人工振動源がある状況で行われることも多い。このような場合、地盤の振動は表面波が支配的になっていると考えられる。従って、このような条件下での伝達関数の特性について検討を行うことは重要である。

本論では、地盤・基礎条件が比較的揃っている階数の異なる4棟の低層 RC 造学校建築物を対象に、周辺地盤上に人工振動源がない時と、交通振動が存在する時に地盤・建物の高密度常時微動計測を行った。内1棟では、基礎のロッキングも含めた強震観測を行った。これらを基に、特に交通振動によるレーリー波の伝播に着目し、建物への入力条件が異なる場合の伝達関数の特徴を比較検討する。また、レーリー波入射を考慮した SR モデルを用いて数値解析を行い、実測に現れる伝達関数の特徴の検討を行う。以上から、低層 RC 造建物の常時微動における振動システムにレーリー波入射が与える影響を明らかにし、相互作用系の特性評価のための知見を得ることを目的とする。

2. 対象建物及び計測概要

本論で対象としたのは、名古屋大学工学部四号館（以下、四号館）および名古屋市立見付小（以下、見付小、3棟）である。対象の4棟は、同一の洪積台地上に位置し、表層地盤条件は概ね等しい（図1）¹⁵⁾。地盤条件は、図2に示すように、洪積層が露頭しており、GL-10m以深には風化した新第三紀層がある。図3、4に、対象建物4棟の立・平面図を計測点配置と共に示す。階数は、四号館は4階建（一部5階）、見付小は北棟が3階、中棟が2階、南棟が4階建である。なお、見付小の北棟は、4階まで増築を見込んで設計されており、南棟との構造

* ㈱飯島建築事務所 修士(工学)

** 名古屋大学大学院環境学専攻都市環境学専攻
教授・工博

*** 名古屋大学工学部社会環境工学科 助教授・工博

Iijima Structural Design Office, M. Eng.

Prof., Division of Environmental Eng. and Architecture, Graduate School of
Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Nagoya Univ., Dr. Eng.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} U \\ U_b \\ \Theta \end{Bmatrix} &= [H(\omega)] \begin{Bmatrix} F_w/m_s \\ U_0 \\ \Phi_0 \end{Bmatrix} \\ [H(\omega)] &= \frac{1}{\Delta(\omega)} \begin{bmatrix} 1 + \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2} \mu_1 + \frac{\omega_s^2}{\omega_R^2} \mu_2 - \left\{ \frac{1}{\omega_H^2} + \frac{1}{\omega_R^2} + \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2 \omega_R^2} (\mu_1 + \mu_2) \right\} \omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_H^2 \omega_R^2} & \omega_s^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_R^2} \right) & \omega_s^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_H^2} \right) H \\ \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2} \mu_1 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_R^2} \right) & \omega_s^2 - \left\{ 1 + (1 + \mu_2) \frac{\omega_s^2}{\omega_R^2} \right\} \omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_R^2} & \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2} \mu_1 \omega^2 H \\ \frac{\omega_s^2}{\omega_R^2} \mu_2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_H^2} \right) \frac{1}{H} & \frac{\omega_s^2}{\omega_R^2} \mu_2 \omega^2 \frac{1}{H} & \omega_s^2 - \left\{ 1 + (1 + \mu_1) \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2} \right\} \omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_H^2} \end{bmatrix} \quad (1) \\ \Delta(\omega) &= \omega_s^2 - \left\{ 1 + (1 + \mu_1) \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2} + (1 + \mu_2) \frac{\omega_s^2}{\omega_R^2} \right\} \omega^2 + \left\{ \frac{1}{\omega_R^2} + \frac{1}{\omega_H^2} + (1 + \mu_1 + \mu_2) \frac{\omega_s^2}{\omega_H^2 \omega_R^2} \right\} \omega^4 - \frac{\omega^6}{\omega_H^2 \omega_R^2} \end{aligned}$$

的相違は階数のみと見なせる。基礎平面形状は、桁行方向に細長く、桁行/張間基礎幅の比は4.3~4.8で概ね一定であり、張間方向の高さ/幅比は、四号館で1.2、見付小・南棟で1.6、北棟で1.2、中棟で0.8である。構造形式はラーメン構造で、耐震壁は桁行方向にはほとんどないが、張間方向には多い。基礎は、いずれもGL-5m前後の礫層を支持層とする既製杭であり、地下階はない。1階床スラブは土間コンクリートである。周辺の道路の状況は、四号館では建物南側の私道に二つの段差、敷地西側の幹線道路の路面に多数の段差、見付小では敷地南側の幹線道路の交差点付近に顕著な段差が見られ、交通に伴う振動源となっている¹⁰⁾。

微動計測は、建物内は柱わき、屋上では柱直上、地盤上は建物から離れた舗装された地点とし、張間方向の基礎のロッキング動を把握するために1階の両端部で上下動を計測している。微動計は、動コイル型、固有周期1秒であり、変位を計測した。サンプリング振動数は100Hzである。四号館、見付小ともに、計測は夕方から翌朝までの夜間に行った。計測中は、微風もしくは無風であった。

四号館では、交通振動の伝播方向の違いによる影響を考察するために、西側の幹線道路で大型車両が通行した際の交通振動計測に加えて、南側の私道に総重量約3tの車両を単独走行させて計測を行った(図3)。また、四号館では強震観測を行っており、センサー配置を図3に☆印で示す。検討する地震記録は図5に示す3地震であり、張間方向の地表面(正確にはGL-1m、以下GLと表記)最大加速度は8.8gal(1998年11月9日)である。

以下、ロッキングの影響が大きい張間方向で検討を行う。図6に、本論の検討で用いる座標系と一質点系SRモデルを示す。

3. 回転入力がある場合の一質点SRモデルの伝達関数

図6の一質点系SRモデルで、常時微動の振動システムを考察する。入力として、地盤の水平入力 u_0 だけでなく、回転入力 ϕ_0 、および文献8)、9)で影響が指摘されている上部構造への風入力 f_w を考慮する。計測可能な成分は、質点応答 u と基礎応答 u_b 、 θ 、および地盤水平変位 u_s である。基礎入力 u_0 、 ϕ_0 は直接計測できないが、一般に u_0 は地盤水平変位 u_s で近似されている。 u 、 u_b 、 θ 、 u_0 、 ϕ_0 、 u_s 、 f_w のフーリエ変換対を U 、 U_b 、 Θ 、 U_0 、 Φ_0 、 U_s 、 F_w とし、剛性は複素剛性として、 $\omega_s^2 = (k_s + i\alpha\omega_s)/m_s$ 、 $\omega_H^2 = (k_H + i\alpha\omega_H)/m_b$ 、 $\omega_R^2 = (k_R + i\alpha\omega_R)/I_b$ 、基礎と質点の質量比、および回転慣性比を $\mu_1 = m/m_b$ 、 $\mu_2 = m_s I_P / I_b$ とすると、質点と基礎の応答 $\{U, U_b, \Theta\}^T$ は、振動システムへの入力 $\{F_w/m_s, U_0, \Phi_0\}^T$ と伝達関数マトリクス $H(\omega)$ により式(1)で与えられる。

本論で扱った計測では、風の影響は十分に小さいので、上部入力 $f_w=0$ とすると、式(1)より、任意の水平入力 u_0 と回転入力 ϕ_0 に対して、基礎固定の伝達関数 $H_{FIX}(\omega)$ は、次式で与えられる。

$$H_{FIX}(\omega) = \frac{U}{U_b + H\Theta} = \frac{\omega_s^2}{\omega_s^2 - \omega^2} \quad (2)$$

これは、地盤の水平入力のみを考慮した石橋ら⁹⁾の式と一致しており、回転入力が存在しても、基礎のロッキングを考慮した基礎固定の伝達関数の推定式は変化しない。式(2)の上では、建物頂部と基礎の水平動、および基礎のロッキングを計測すれば、基礎固定の伝達関数を推定できる。

一方、地盤・建物連成系の伝達関数は、上部入力 $f_w=0$ のとき、質点応答 u と地盤水平動 u_s によって、次式で与えられる。

$$\frac{U}{U_s} = \frac{1}{\Delta(\omega)} \left\{ \omega_s^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_R^2} \right) \frac{U_0}{U_s} + \omega_s^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_H^2} \right) \frac{H\Phi_0}{U_s} \right\} \quad (3)$$

式(3)より、地盤・建物連成系の伝達関数は、水平入力 u_0 と回転入力 ϕ_0 の比率と、 ω_H と ω_R によって左右される。一般に、回転入力 ϕ_0 の計測は困難であり、 u_0 と ϕ_0 の比率も不明である。このため、水平入力 u_0 の伝達関数(右辺、第1項)と回転入力 ϕ_0 の伝達関数(右辺、第2項)とに分離するのは困難である。そこで、次節で実測記録を基に入力特性の違いによる伝達関数の特徴を考察した上で、5節で簡易な相互作用モデルによる検討を行い、伝達関数の特徴を抽出し、低層RC造の振動システムを明らかにする。

なお、実測記録の検討では、 H は計測点位置の実高さで近似する。

4. 常時微動による低層RC造建物の振動システム

4.1 交通振動の地盤伝播性状と建物入力

四号館および見付小の計測記録から、幹線道路で大型車両が通過したデータ区間(1サンプル5.12sec、見付小30サンプル、四号館68サンプル、以下、交通振動時)を抽出した。また、四号館では、南側の私道で車両(総重量約3t)を単独走行させたデータ区間(1サンプル5.12sec、19サンプル、以下、単独走行時)も抽出した。図7に、交通振動時の四号館と見付小の地盤測線(a→b地点間とA→B地点間)の上下動の位相差から求めた位相速度と、図2のPS検層データから



図1 対象建物の位置とボーリング地点

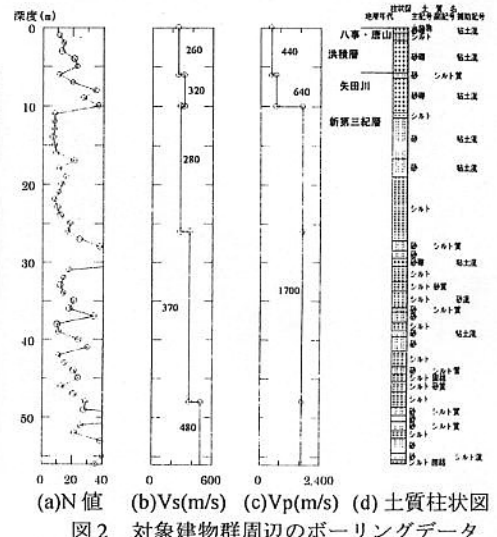


図2 対象建物群周辺のボーリングデータ

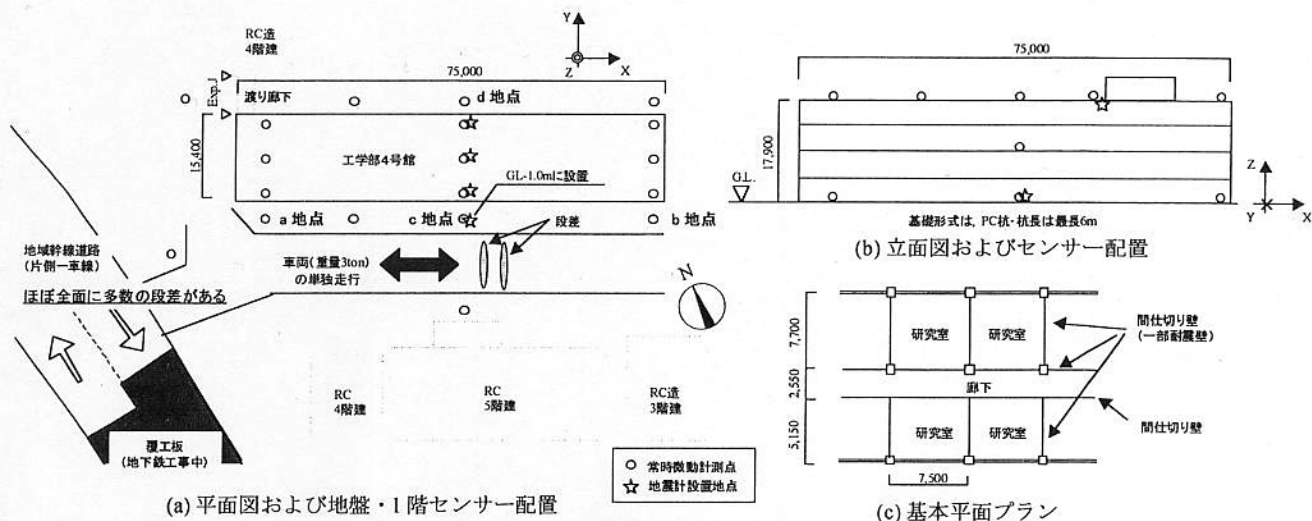


図3 名古屋大学工学部四号館 建物および計測点の概要

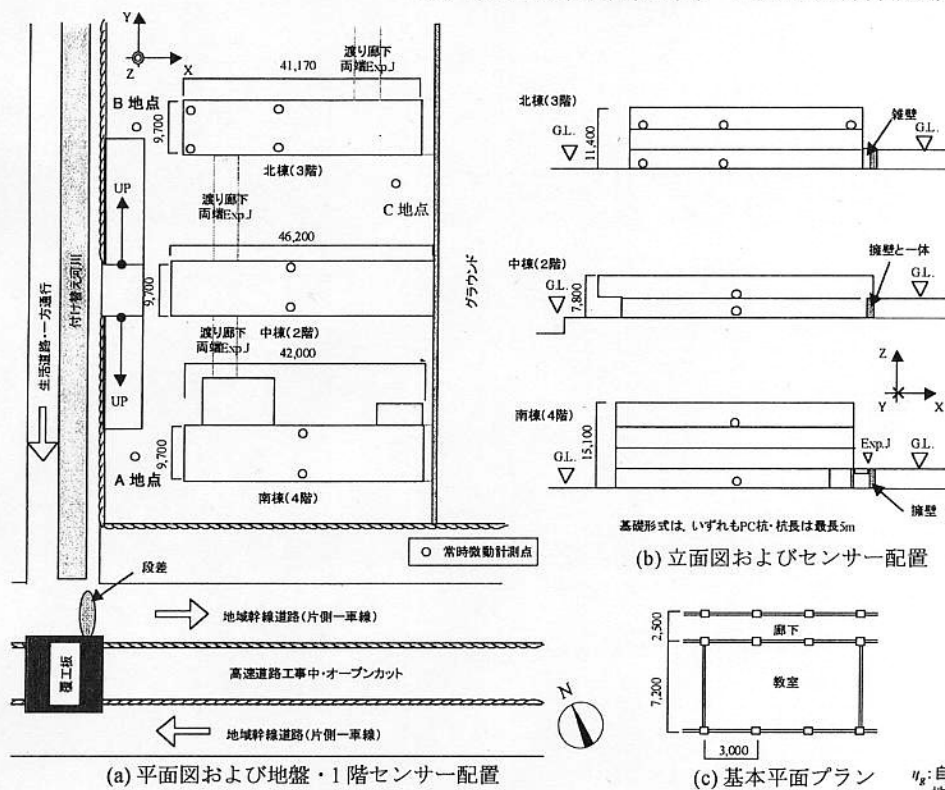
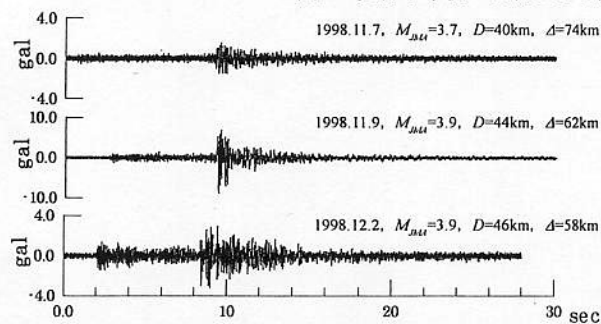


図4 見付小学校 建物および計測点の概要



求めたレーリー波の理論分散曲線, およびコヒーレンスを示す。4~6Hzで2点間のコヒーレンスは比較的高く, 地盤を伝播する成分が考えられる。位相速度には分散性があり, 四号館と見付小ではほぼ一致しており, 理論分散曲線とも概ね対応している。位相速度に分散性がある

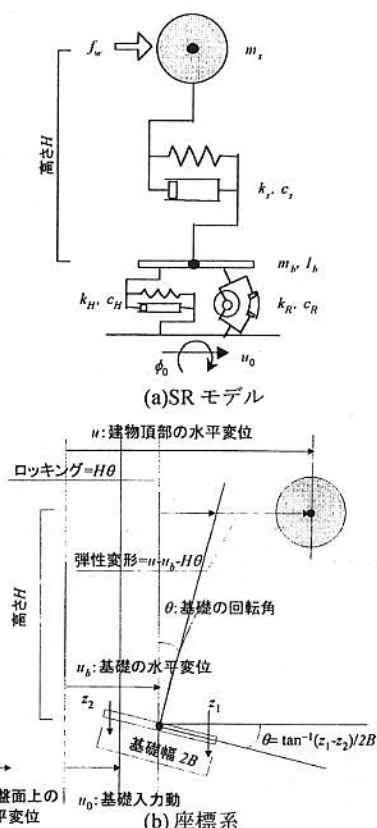


図6 SR モデルと座標系

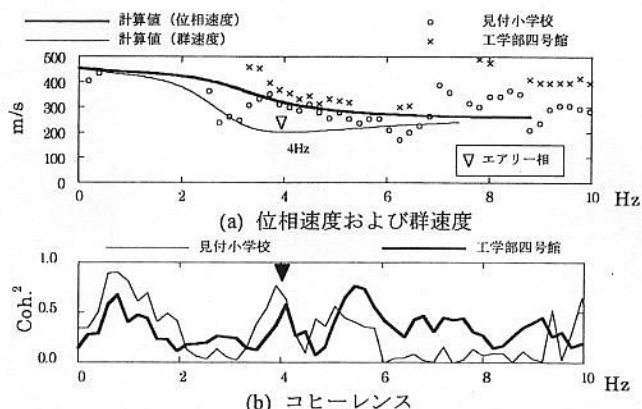


図7 交通振動時の地盤上下振動の振動伝播 (工学部四号館 a→b 地点間, 見付小学校 A→B 地点間)

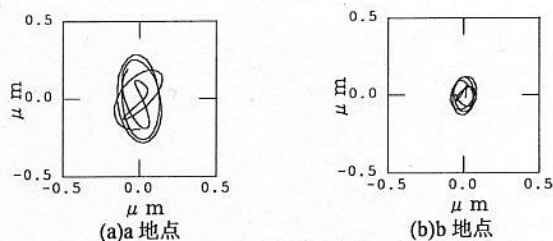


図8 工学部四号館における交通振動時の地盤計測点オービット (桁行方向鉛直面内, 4~6Hz)

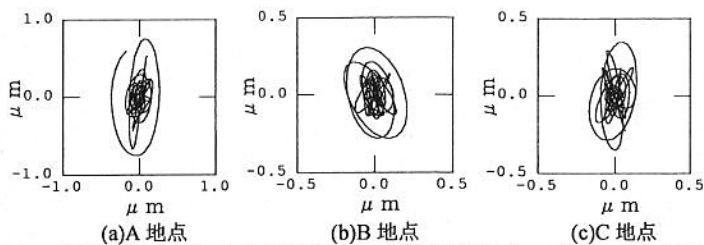


図9 見付小学校における交通振動時の地盤計測点オービット (地表面の各計測点と南側道路の段差とを結ぶ方向の鉛直平面内, 4~6Hz)

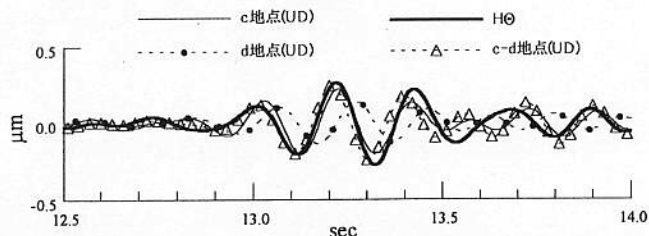


図10 工学部四号館において車両が建物南側の段差を通過した際の地盤計測点上下動とロッキング波形 (4~6Hz)

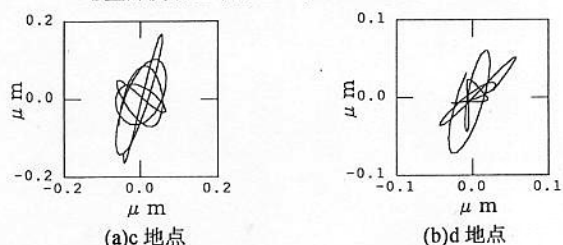


図11 工学部四号館において車両が建物南側の段差を通過した際の地盤計測点オービット (張間方向鉛直面内, 4~6Hz)

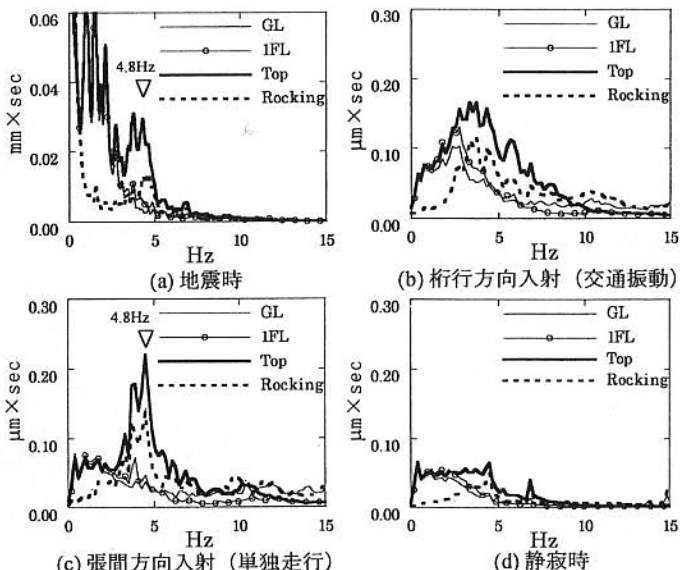


図12 工学部四号館での各計測の平均フーリエスペクトル

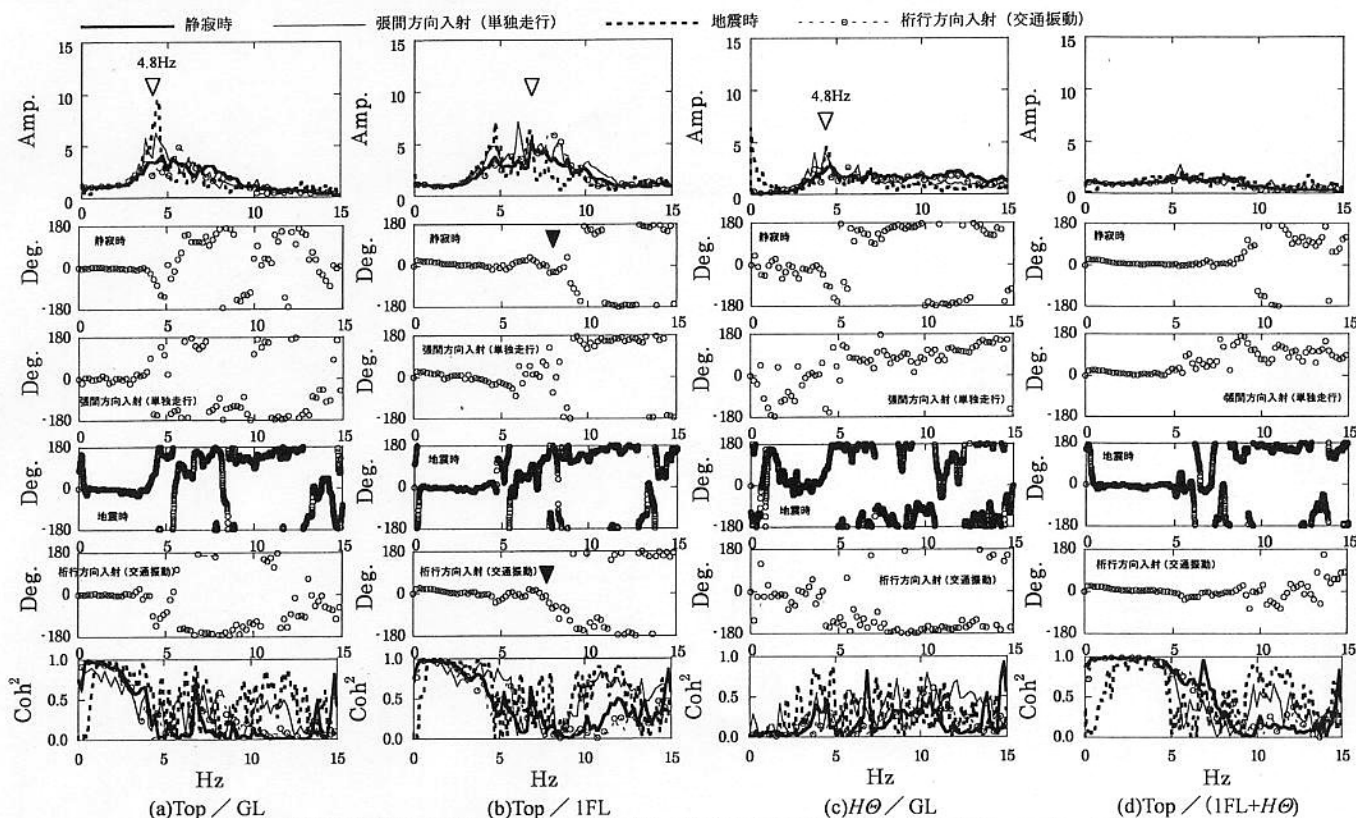


図13 工学部四号館での伝達関数 (Hv 推定法, 各項目上段より, 振幅, 位相遅れ, コヒーレンス)

る4~6Hzで、四号館では桁行方向、見付小では地表面の各計測点と南側道路の段差を結ぶ方向について、鉛直面内のオービットを図8、9に示す。各計測点でレーリー波の性質が見られる。以上より、交通

振動による地盤上下動は、四号館では西側の幹線道路から桁行方向、見付小では南側の幹線道路から張間方向にレーリー波として伝播していると考えられる¹⁶⁾。図7の分散曲線から、エアー相は4Hz前後と

推定される。

四号館で、単独走行車両が段差を通過した際のc, d地点における4～6Hzの地盤上下動とその差(c-d)、および基礎のロッキング波形を図10に、張間方向鉛直面内のオービットを図11に示す。建物を挟んだc, d地点の地盤上下動には明確な位相差が見られる。基礎のロッキングは、地盤2地点の上下動の差と対応しており、張間方向に伝播する位相差のある地盤上下動によってロッキングが励起されると推察される。

4.2 入力の違いによる伝達関数の特徴

図12に四号館での各計測ケースの平均フーリエスペクトルを示す。静寂時は、深夜で周辺地盤上に人工振動源がないデータ区間(1サンプル5.12sec, 268サンプル)を抽出した。地震記録では、各地震のGLの水平動RMS値で規準化してアンサンブル平均した。図13に、各計測の伝達関数推定結果(Hv推定法¹⁹⁾、アンサンブル方法は平均フーリエスペクトルと同じ)を示す。以下、図中の▽は卓越振動数を示し、▼は考察で注目した振動数を示す。Top/GL、Top/1FLのほか、ロッキングの影響を考察するためにロッキング/地表(以下、H θ /GL)と、基礎固定系の伝達関数を推定するためにTop/(1FL+H θ)も求めた。地震時のフーリエスペクトルとTop/GLの卓越振動数および位相の反転から、地盤・建物連成系の固有振動数は4.8Hzと推定される。

図12より、静寂時や桁行方向にレーリー波が入射する交通振動時と比べ、張間方向に位相差のある地盤上下動が入射する単独走行時では、3.9～4.9Hzの限定された振動数帯域でロッキングとTopに明確なピークが見られる。この振動数帯域は、地盤・建物連成系の固有振動数およびエアリー相とほぼ一致している。

図13より、Top/1FLの卓越振動数は、地震時と静寂時のピーク振動数から7Hz前後と推定される。基礎固定の固有振動数は、Top/(1FL+H θ)の振幅に明確な卓越はないが、地震時の位相で0°から正(Topの位相が遅れる)の180°に変化する振動数帯域から、6～8Hzと推定される。Top/(1FL+H θ)の振幅に卓越がないのは、相互作用の影響が大きいから、基礎固定の固有振動数と考えられる6～8Hzで、弾性変形(=Top-1FL-H θ)が十分励起されないためと推察される。

伝達関数の特徴は、静寂時と桁行方向にレーリー波が入射する交通振動時で概ね一致している。これらのケースでは、地震時と比べ、Top/GLは地盤・建物連成系の卓越振動数での振幅は小さく、位相は一度負(Topの位相が進む)となってから正の180°になる。H θ /GLでも同様の位相特性が見られるが、コヒーレンスは低いことから、ロッキングは水平入力ではなく主に回転入力によって励起されると推察される。また、地震時を除くTop/1FLでは、8Hz付近から位相が負となっている。入力が基礎の水平動の場合、固有振動数付近で基礎に対して頂部の応答の位相が遅れる(0→180°)。一方、レーリー波が入射する場合は、回転入力が生じ、それによってロッキングが励起され頂部の応答が生じ、これに伴う慣性力によって基礎の水平変位が遅れて励起されることが考えられる。この場合、位相特性は頂部が基礎よりも先行する(0→180°)。このような回転入力の影響は、レーリー波が卓越するエアリー相と地盤・建物連成系の固有振動数が近接

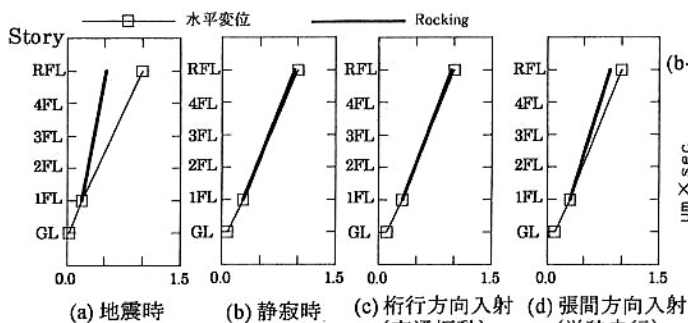


図14 工学部四号館 時刻歴波形の最大値から推定した地盤・建物連成系の振動モード形(3～5Hz)

していることにより、さらに明確になっていると考えられる¹⁹⁾。

張間方向に位相差のある上下動が入射する単独走行時では、静寂時や桁行方向にレーリー波が入射する交通振動時と比べて、Top/GL、Top/1FL、H θ /GLで振幅にピークが見られる。これは、張間方向に入射する位相差のある上下動によって回転入力が生じ、ロッキングが励起されるためと推察される。

Top/GLの推定結果は、計測ケースによって振幅に変動が見られるが、卓越振動数には大きな変動は見られない。

図14に、各計測記録に3～5Hzのバンドパスフィルターをかけた波形の最大値から推定した地盤・建物連成系の振動モードを示す。モード振幅は、Topの振幅で規準化した。地震時と比べ、特に静寂時および交通振動時で、ロッキングが支配的になっており、弾性変形は地震時を除き全体に小さい。

4.3 階数と交通振源からの距離の違いによる影響

図15に、見付小での各計測ケースの平均フーリエスペクトル、図16～18に伝達関数推定結果を示す。静寂時のデータ区間は、1サンプル5.12sec, 195サンプルである。以下、張間方向にレーリー波が入射する交通振動時と静寂時を比較して考察を行う。南棟の地盤・建物連成系の固有振動数は、静寂時の平均フーリエスペクトルとTop/GLの卓越振動数および位相の反転から4.2Hzと推定される。張間方向にレーリー波が入射する交通振動時では、南棟では四号館・単独走行時と同様に特定の振動数帯域(3.8～4.8Hz)でロッキングとTopに明確なピークがあるが、北棟と中棟では見られない。

図15の南棟において、ピークが見られる振動数帯域も、地盤・建物連成系の卓越振動数およびエアリー相とほぼ一致している。

図16～18の静寂時のピーク振動数と位相の反転から、卓越振動数は、Top/GLでは、南棟は上述のように4.2Hz、北棟で7.3Hz、中棟で9Hz～10Hz、Top/1FLでは、南棟で4.7Hz、北棟で9.2Hzと推定され、中棟は振幅・位相のいずれからも推定は困難である。伝達関数の卓越振動数のピーク高さは、建物の高さ/幅比が大きいほど高くなる傾向が見られる。静寂時と比較して交通振動時で、南棟、北棟のTop/GL、Top/1FL、H θ /GLの振幅は卓越振動数で大きくなっ

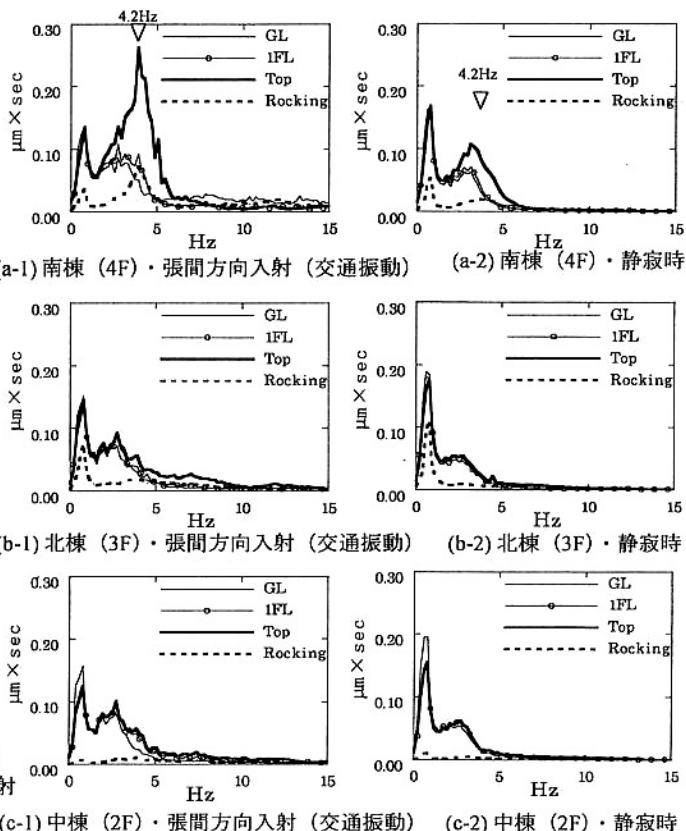


図15 見付小学校での各計測の平均フーリエスペクトル

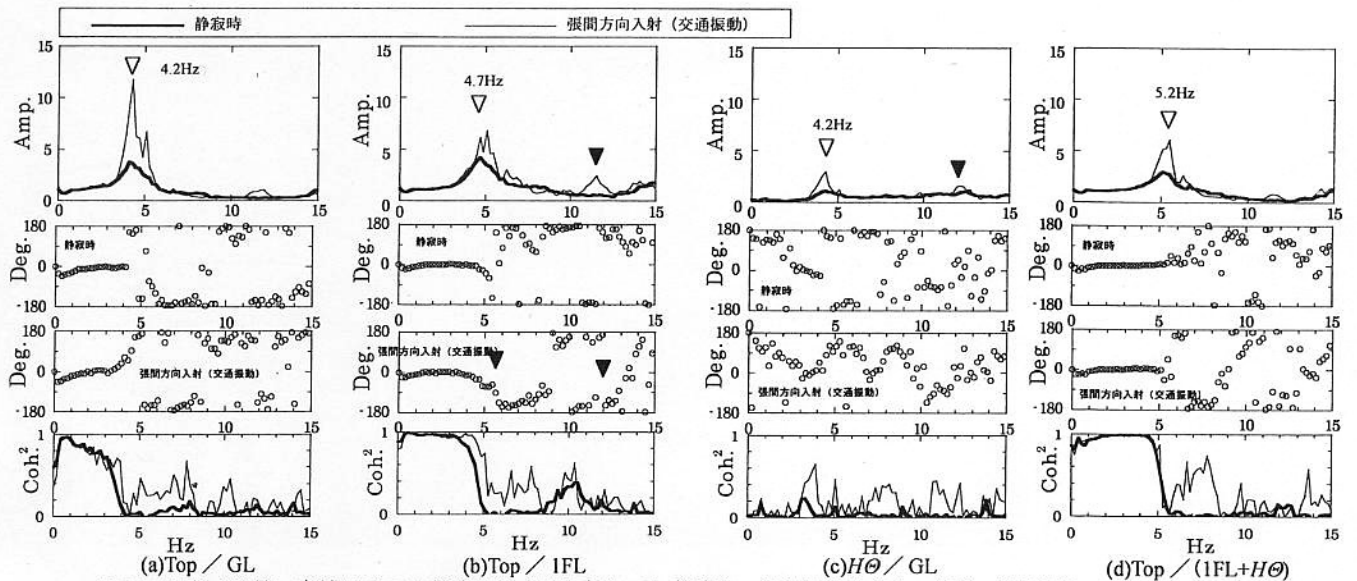


図16 見付小学校・南棟(4F)での伝達関数(張間方向, Hv 推定法, 各項目上段より, 振幅, 位相遅れ, コヒーレンス)

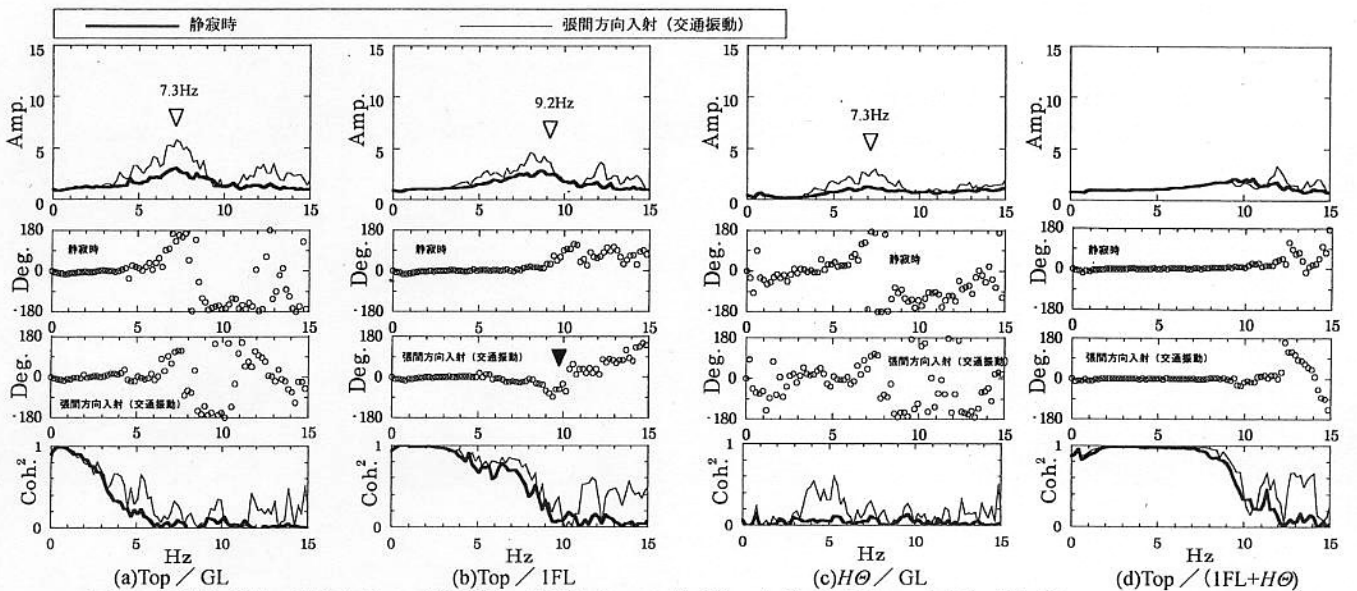


図17 見付小学校・北棟(3F)での伝達関数(張間方向, Hv 推定法, 各項目上段より, 振幅, 位相遅れ, コヒーレンス)

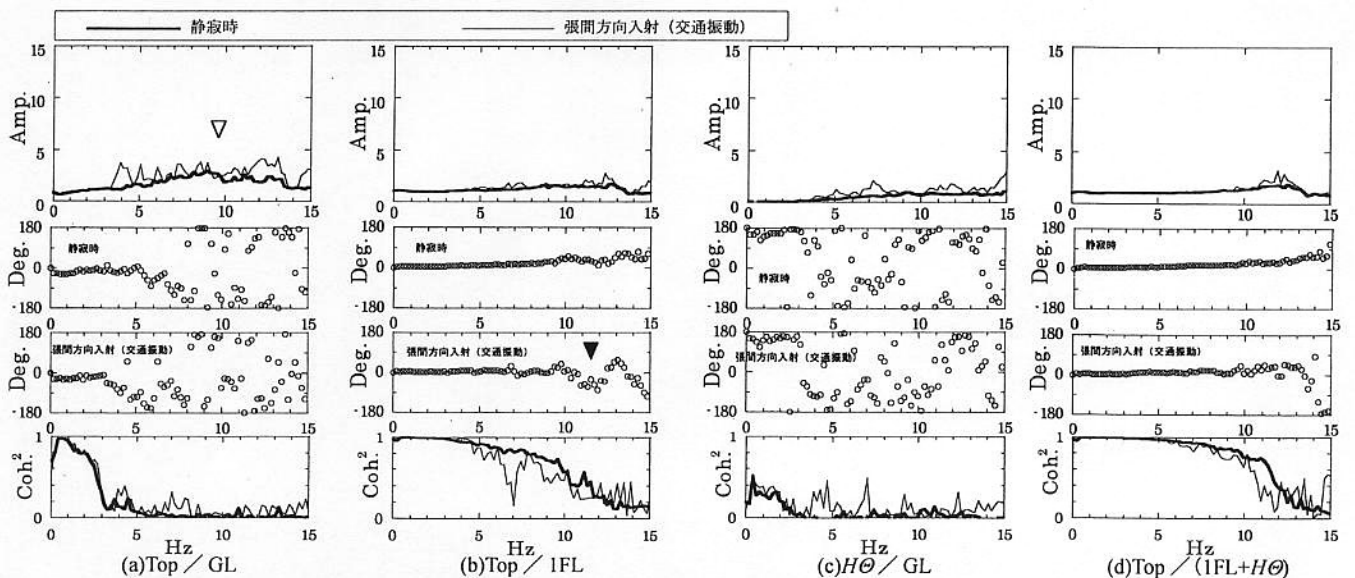


図18 見付小学校・中棟(2F)での伝達関数(張間方向, Hv 推定法, 各項目上段より, 振幅, 位相遅れ, コヒーレンス)

ているが、中棟では明確でない。Top/GLの位相特性は、全ての建物で大きな差はないが、交通振動時におけるTop/1FLの位相特性は、卓越振動数付近で、南棟では負（Topの位相が進む）となり、北棟、中棟では、負となった後に正方向への反転が見られる。H θ /GLの位相特性は、南棟、北棟では卓越振動数付近で正（ロッキングの位相が遅れる）となり、高振動数側で再び位相差が0に近づくが、中棟では明確な特徴が見いだせない。また、南棟では、Top/1FL伝達関数の12Hz付近で特徴的な振幅のピークと位相の反転が見られる。張間方向にレーリー波が入射する交通振動時の伝達関数の特徴は、回転入力の影響として注目しており、次節でモデルにより検討する。中棟、北棟と比べ、南棟で顕著な特徴が現れたのは、他の2棟と比べ高さ/幅比が大きいためロッキングが励起されやすく、交通振動源に近く、かつエアリー相と地盤・建物連成系の固有振動数が近接しているため回転入力の影響を強く受けることによると推察される。Top/(1FL+H θ)は、高さ/幅比が小さい北棟・中棟で明確なピークが現れていない。これは、四号館と同様に、相互作用の影響が強いため、基礎固定系の固有振動数がある帯域（北棟で8~10Hz、中棟で10~15Hz）で弾性変形が励起されないためと考えられる。3節の検討より、Top/(1FL+H θ)の推定結果は、理論上、回転入力の有無に関わらず同一となるが、南棟で計測ケースによって振幅のピーク高さが異なっている。一方、位相特性は、張間方向に位相差のある上下動が入射する見付小の交通振動時、四号館の単独走行時のTop/1FLでは0 $\rightarrow$ -180 $^{\circ}$ に変化しているが、Top/(1FL+H θ)では基礎固定系の伝達関数の位相特性に近い0 $\rightarrow$ 180 $^{\circ}$ となっており、推定結果に改善が見られる。また、四号館と同様に、Top/GLの推定結果は、振幅に変動が見られるが、卓越振動数には大きな変動は見られない。

バンドパスフィルター（南棟では3~5Hz、北棟では6.5~8.5Hz）をかけた波形の最大値から推定した振動モードを図19、20に示す。南棟、北棟ともに、静寂時と比べて張間方向にレーリー波が入射する交通振動時のロッキング成分の比率が増加している。特にエアリー相と地盤・建物連成系の固有振動数が近接している南棟で顕著であり、レーリー波入射に伴う回転入力によってロッキング成分が励起されることが分かる。図14、19より、見付小・南棟では静寂時の弾性

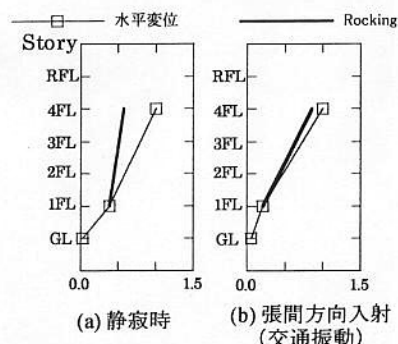


図19 見付小学校・南棟 時刻歴波形の最大値から推定した地盤・建物連成系の振動モード形（3~5Hz）

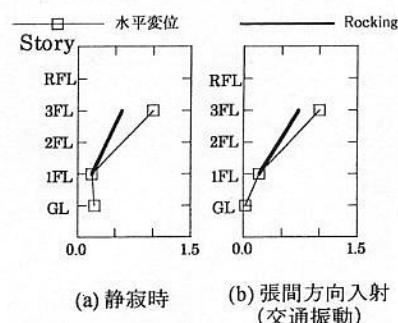


図20 見付小学校・北棟 時刻歴波形の最大値から推定した地盤・建物連成系の振動モード形（6.5~8.5Hz）

変形の比率が高いが、四号館では計測ケースに関わらずロッキング率が高い。この結果は、図13、16の伝達関数とも整合している。

5. SRモデルによるレーリー波入射の影響の検討

前節の伝達関数に現れた特徴について、半無限一様地盤 ($V_s=200\text{m/s}$, $\rho=1.8\text{t/m}^3$, $\nu=0.4$) 上の直接基礎建物を対象とするSRモデルを用いて検討を行う。上部構造物は、計測結果や設計図書等に基づいて、床の見なし荷重を1FLで1.4tf/m 2 、他階で1.2tf/m 2 、固有周期は四号館では0.16(s)、見付小ではn階のとき0.042n(s)とし、一次モードを逆三角形分布と仮定して、等価一質点系モデルを作成した。減衰定数は3%とする。地盤バネは、矩形基礎を水平方向では面積等価、回転方向では断面二次モーメント等価となる円形剛基礎に置き換し、静的地盤バネと波動インピーダンスから求めた。地表面変位は、基礎の中心位置の自由地表面で定義した（図21(a)）。基礎入力は、水平入力に基礎範囲の自由地表面の水平動の平均値、回転入力に基礎半幅での傾きによる三角形の面積と地表面上下動分布の面積が等しくなる回転角から近似した（図21(b)）。図22に、地表面正方形剛基礎にレーリー波が入射する場合の基礎入力について、近似解と吉田¹⁸⁾による境界要素法の結果を比較して示す。 $a_0=3$ 程度までは近似解は境界要素解に概ね近似している。 $a_0=3$ となる振動数は、四号館で7.3Hz、見付小で12Hzである。レーリー波入射が伝達関数に与える影響を評価するために、鉛直下方からのせん断波入射（以下、水平入力）による地表面変位 U_g と、レーリー波入射による地表面変位 U_g と U_θ の振幅の比を変化させて伝達関数を求めた（図23）。ここでは2つの入力成分 U_g と U_θ とは互いに無相関であると仮定し、周波数領域における統計的な伝達関数の計算において U_g と U_θ のクロススペクトルを0としている。

図13と図23(a)との比較より、四号館では、地震時では水平入力と見なせる。また、静寂時や桁行方向からレーリー波が入射する交通振動時では、Top/GL、H θ /GLの位相特性（卓越振動数で負になってから正の180 $^{\circ}$ になる）は再現されていないが、Top/1FLの位相特性（8Hz前後で負になる）は $U_g:U_\theta=1:1\sim1:2$ の結果と概ね対応している。張間方向からレーリー波が入射する見付小の交通振動時

には、南棟では、Top/1FL（図16）の12Hz付近に現れる振幅のピークや位相の再反転（-180 $\rightarrow$ 0 $^{\circ}$ ）は、モデルの $U_g:U_\theta=1:4\sim0:1$ （図23(b)）でも確認できる。北棟および中棟では、Top/1FL（図17、18）の振幅に特徴的なピークはないが、北棟では10Hz付近に、中棟では12Hz付近に特徴的な位相特性（負となった後に正方向への反転）があり、これらは図23(c),(d)の $U_g:U_\theta=1:4\sim0:1$ でも確認できる。Top/1FLの伝達関数に特徴的な位相変化およびピークが現れる振動数帯域は、四号館、および見付小の3棟とも、 $a_0=2\sim3$ 付近である。図17、18の北棟と中棟で、振幅に特徴的なピークが見られないのは、基礎固定系の固有振動数と $a_0=2\sim3$ が近接したため、二つのピークが重なったためと推察される（図23(b),(c)）。以上より、見付小では、 $U_g:U_\theta$ は静寂時で1:0~1:1、張間方向からレーリー波が入射する交通振動時で1:4~0:1程度の比となっていると推察される。

一方、Top/GLの伝達関数は、実測結果と同様に、数値解析結果でも、建物条件およびレーリー波入射の割合に関わらずレーリー波入射の影響が大きくなると、振幅が大きくなる（減衰が過小評価される）が、その卓越振動数は、ほとんど変化しない。

以上の考察から、前節で指摘した伝達関

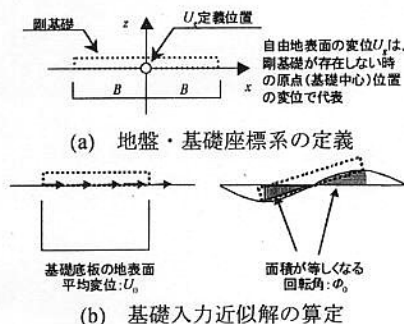


図21 地盤・基礎座標系の定義と基礎入力近似解の算定の概要

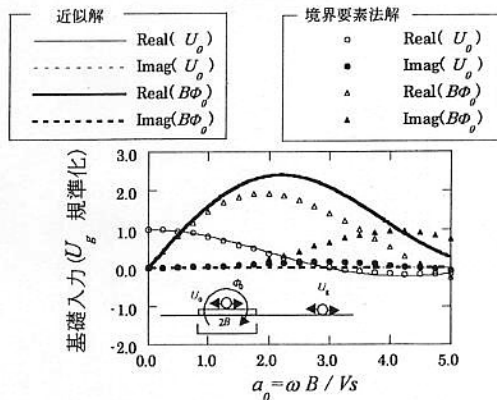


図22 レーリー波入射時の基礎入力の近似解と境界要素法解¹⁸⁾の比較

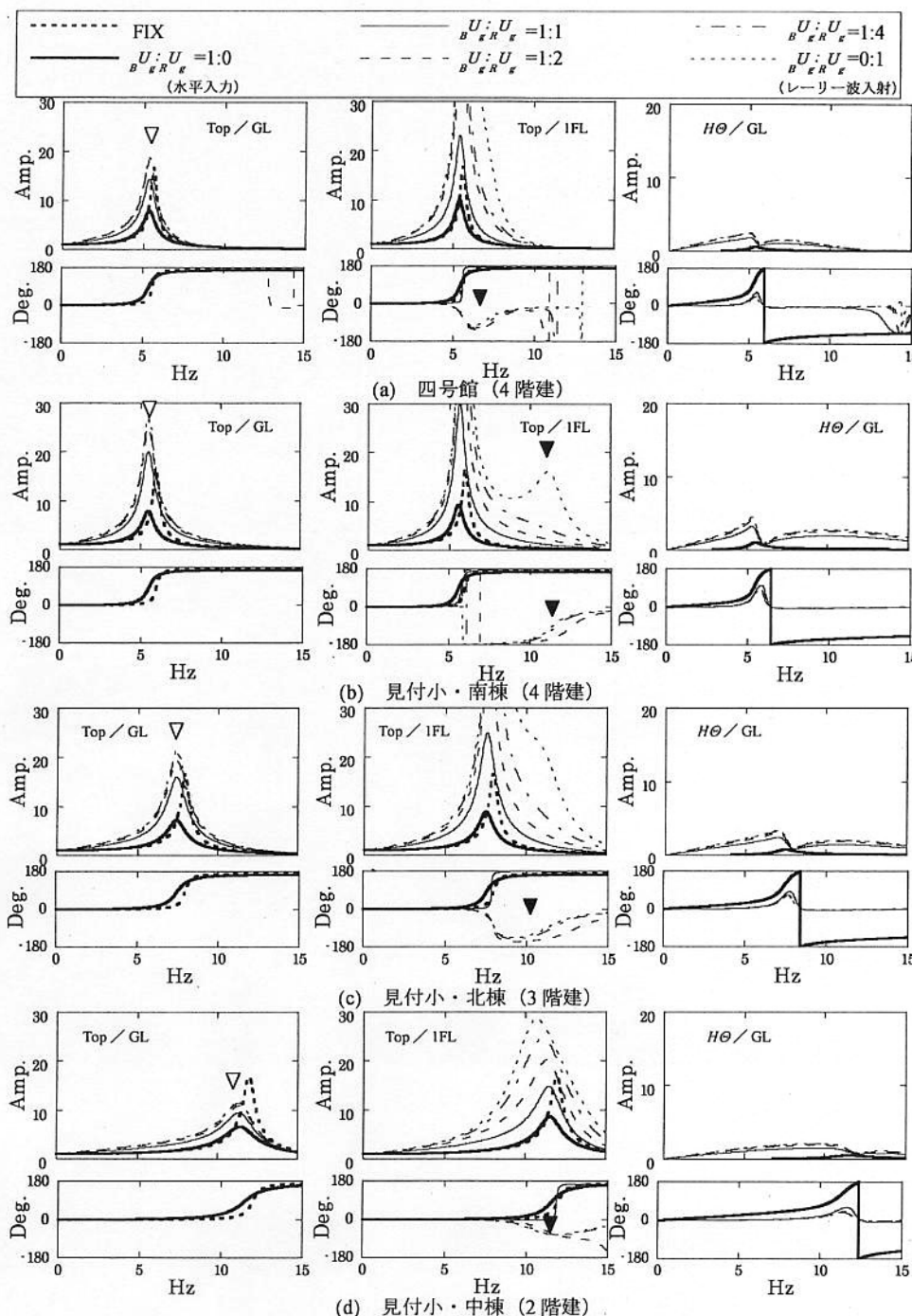


図23 レーリー波入射が伝達関数に与える影響のSRモデルによる検討
($V_s=200\text{m/s}$, 各図とも, 上段は振幅, 下段は位相遅れ)

数の特徴は, レーリー波入射を考慮したモデルからも確認された。また, 本研究で対象とした建物では, レーリー波入射の割合が $U_g/U_g = 1:2$ より大きければ, 伝達関数 (特に Top/1FL) に前述の特徴が現れる。この特徴とモデルの計算結果を比較することによって, レーリー波入射による影響を定量的に推定できる可能性が示唆された。

6. 結論

本論では, レーリー波入射による回転入力, 低層RC造の伝達関数推定に与える影響について検討を行った。

Top/1FL, Top/GLの伝達関数推定は, 主にレーリー波入射により生じる回転入力によって励起される基礎のロッキング動の影響を受ける。常時微動においてレーリー波入射の主な要因は交通振動と言える。この影響は, 建物高さが高い場合や, 地盤・建物連成系の固有振

動数とエアリー相が近接している場合に顕著になる。水平入力とレーリー波入射が混在する場合, その比により, 伝達関数, 特に Top/1FL が特徴的な形状を示すことを, 実測とモデルの対比により明らかにした。本論で対象とした建物では, 水平入力とレーリー波入射の比が 1:2 以上の場合, $a_0=2\sim3$ の振動数域で伝達関数に特徴的な位相の変化, およびピークが現れると推察される。この伝達関数の特徴に注目すれば, レーリー波入射の影響の度合いを評価することができる。

また, ロッキングを考慮した基礎固定の伝達関数の推定式は, 回転入力が存在しても成り立つことを示した。これを実測に適用すると, 推定される伝達関数の位相特性は基礎固定系に近くなる傾向にあり, 固有振動特性の推定に有用である。一方, 振幅の推定は計測条件によってばらつきが見られ, 今後の検討を要する。これらの結果からみて, 振動システムを適切に理解するためには, 水平動だけでなくロッキングを計測することが重要と考えられる。

謝辞

本研究で実施した常時微動計測では, 名古屋市立見付小の各位, 名古屋大学美原義正技官に多くのご協力を頂きました。また, 査読者から貴重なご意見, ご指摘を頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 林田敏弘: 建築物を支持する杭の地震時応力ならびに力の伝達機構に関する実証的研究, 東北大学学位論文, 1988
- 2) 安井謙, 井口道雄, 赤木久真, 林康裕, 中村充: 1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, pp.111-118, 1998
- 3) 滝田 貴, 飛田 潤, 毛呂 眞, 伊藤敬一: 多点同時記録による応答モードの評価, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.493-502, 1997
- 4) 鈴木敏夫, 山本稔威夫, 小林勝己他: 10層住宅における地盤一抗一建物の地震観測 (その1~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.703-706, 1984: pp.159-160, 1985: pp.541-542, 1986: pp.613-614, 1987: pp.853-854, 1988
- 5) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp.87-94, 2001
- 6) 島海 勲: 住宅公園アパートの固有振動数集団計測, 日本建築学会論文報告集, 第116号, pp.21-26, 1965
- 7) 大場新太郎: 基礎・地盤条件が実在建築物の固有周期に及ぼす影響, 日本建築学会論文報告集, 第317号, pp.23-31, 1981
- 8) 和泉正哲, 勝倉 裕, 飛田潤: 構造物の常時微動における振動システム, 日本建築学会構造系論文集, 第409号, pp.83-93, 1990
- 9) 石橋敏久, 内藤幸雄: 常時微動による高層構造物の振動特性推定に及ぼす風の影響の検討, 日本建築学会論文報告集, 第464号, pp.71-80, 1994
- 10) Ali, G. M., J. Tobita, N. Fukuwa, M. Nakagawa, R. Nishizaka and E. Koide: A Study of the effect of soil-structure interaction on the dynamic properties of RC structures based on the microtremor records, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.441-450, 1997
- 11) 飛田潤, 八木茂治, 福和伸夫, 西阪理永: 常時微動計測による低層RC造建物の振動性状と耐震指標に関する考察, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.1671-1676, 1998
- 12) 石橋敏久, 内藤幸雄: 基礎のロッキングを考慮した伝達関数評価法の検討, 鹿島技術研究年報, 第42号, pp.199-203, 1994
- 13) 山谷博愛, 内藤幸雄, 石橋敏久: 地盤・構造物相互作用が構造物の振動特性推定に及ぼす影響-2質点系モデルによる検討手法の検討-, 鹿島技術研究年報, 第42号, pp.169-174, 1994
- 14) 八木茂治, 飛田潤, 福和伸夫: 常時微動計測による低層RC造建物の伝達関数に地盤・建物動的相互作用が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.435-444, 2000
- 15) 土質工学会中部支部: 最新名古屋地盤図, 1988
- 16) 福和伸夫, 西阪理永, 浅野三男, 多賀直恒, 寺村彰: 自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究・実測記録の解析と薄層法によるシミュレーション解析, 構造工学論文集, Vol.39B, pp.95-104, 1993
- 17) Vold, H., J. Crowley and G. T. Rocklin: New Ways of Estimating Frequency Response Functions, Sound and Vibration, November, 1984
- 18) Yoshida, K.: Fundamental Studies on Soil-Structure Interaction Problems, Ph.D. Thesis, Tohoku Univ., 1995

(2001年7月9日原稿受理, 2001年10月30日採用決定)