

3階建家屋における道路交通振動に対する防振対策の研究 A Study of Countermeasures against Road Traffic Vibration for 3-stories Houses

徳永法夫¹ 西村昂² 谷口与史也³ 宮原哲⁴
Norio TOKUNAGA¹, Takashi NISHIMURA², Yoshiya TANIGUCHI³, Satoshi MIYAHARA⁴

1. はじめに

振動規制法では、道路交通振動は、道路敷地境界の地表における鉛直振動レベル $VL(L_{10})$ で評価することになっている。しかし、道路交通振動に対する住民感覚には、地表の振動レベルではなく、家屋の振動増幅を含んだ家屋床における振動レベルが大きく寄与することがわかっている¹⁾。

振動対策手法として、発振源対策や伝播経路対策も検討されているが、適用場所の制約や振動低減効果の限界がある。残る対策として受振側家屋における振動増幅量を低減できれば、その効果は大きい。振動規制法の制定時に、1～2階建て一般家屋における振動増幅量は、-5～+15dBの増幅のばらつきがあることがわかっていたが、平均して5dB程度の増幅量を考えていた²⁾。その後、建築物の耐震基準は強化されているものの、近年の都市型住宅に見られるように、3階建て一般家屋が増加しており、水平方向の振動増幅が問題となることが考えられる。

振動公害のうち新幹線鉄道沿線における一般家屋の鉛直振動に対しては、国鉄(JR)において、床組の補強を主体とした標準防振工法が策定され、東海道・山陽新幹線沿線で著しい振動が生じている家屋(木造と鉄骨の一般住宅)に対して、昭和55年から家屋防振工事^{3),4),5),6)}が実施されている。これらの防振工事によって、家屋床中央付近の鉛直振動のうち20～25Hzの振動数域(第1ピーク)がおおよそ2～7dB低減しているようである。ただし、この防振工事は環境庁からの勧告に基づいていることから「鉛直振動」のみに対する対策であり、水平振動については考慮していない。

そこで、本文では道路交通振動に対する水平方向防振対策の適用範囲と、その効果を定量的に把握することを目的として、図-1の質点モデルを用いてシミュレーションをおこなった。

なお、家屋や地盤振動の種類は様々であることから、下記の点に着目してパラメトリック・スタディーを行い、家屋の水平振動に対する防振対策選定時の留意事項や問題点把握も併せて行った。

- (a)入力振動種類と家屋種類(固有振動数、減衰定数)の組合わせによる振動レベル増幅量の違い
- (b)防振対策により振動増幅量を低減できるパターンの把握と、振動低減効果の定量的把握

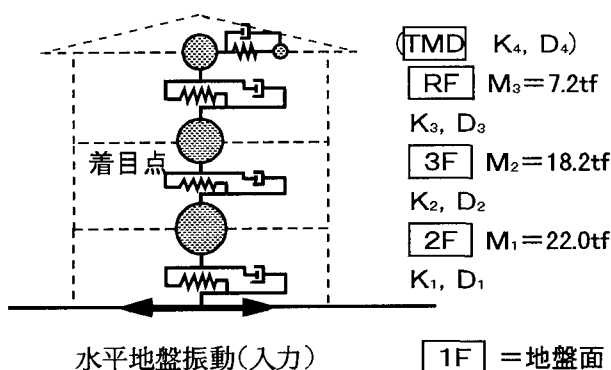


図-1 シミュレーションモデル概念図

2. 分析の着目点

環境庁の調査⁷⁾によれば、108件のうち約1/3の家屋で、家屋2階における水平(XY)方向振動レベルが、鉛直(Z)方向より大きいことが示されている。この調査時点よりも都市部では家屋(木造・鉄骨造・SRC造)の高層化、あるいは1階部分の車庫利用や広い間取りによる耐震壁の偏りが増えている。これに伴って家屋・鉄骨造の上層階(木造では2, 3階)では、道路交通振動に限らず水平方向に振動しやすくなっている。

このように家屋の水平振動増幅量が大きくなると、家屋内における振動レベルは鉛直方向よりも水平方向が大きくなるケースがさらに増えてくると想定される。これに対して、鉛直振動は前述した国鉄(JR)における家屋防振工事の標準工法で対策手法が確立されていると考えられる。そこで、本文では地表の振動に対する家屋の振動増幅のうち、3階床面(図-1)の水平方向振動に着目して分析することとした。

キーワード：道路交通振動、動的解析、Tuned Mass Damper

¹正会員、阪神高速道路公団 神戸第二建設部
(神戸市中央区東川崎町1丁目3-3 Tel078-360-8141 Fax360-8158)

²正会員、工博、大阪市立大学教授 工学部土木工学科
(大阪市住吉区杉本3丁目3-138 Tel(Fax)06-6605-2731)

³正会員、工博、大阪市立大学助手 工学部建築学科
(大阪市住吉区杉本3丁目3-138 Tel(Fax)06-6605-2731)

⁴正会員、日本技術開発株式会社 大阪支社 構造・橋梁部
(大阪市北区豊崎5丁目6-10 Tel06-6359-5341 Fax6359-5298)

3. 解析モデルと解析手法

(1)入力波形の選定

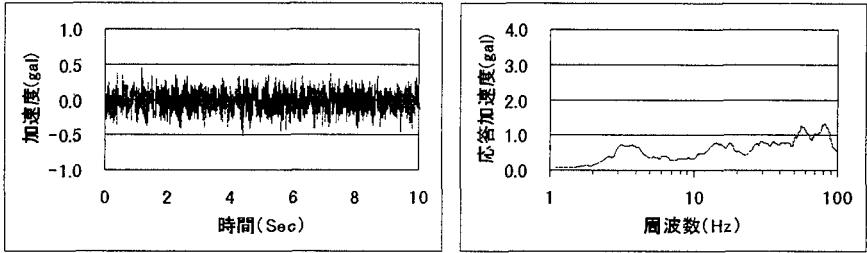
振動対策シミュレーションを様々な条件でパラメータ解析するために、高架道路沿道で大きな振動レベルが観測された前後10secの水平方向地盤振動加速度を各種収集した。

この中から、卓越振動数帯の有無、時刻歴波形に特徴のあるものを抽出して、代表波形として7Type選定した。図-2(1)～(7)に、加速度時刻歴波形および、各波形のフーリエスペクトル、応答スペクトル(5%減衰)分析結果

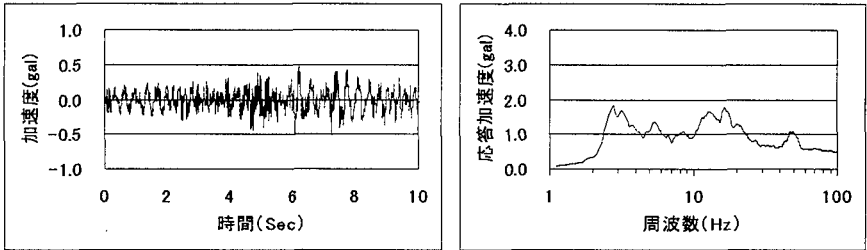
を示す。なお、選定した7 Type の振動の特徴をまとめると下記のとおりである。

- Type-1：卓越した振動数が目立たない。
- Type-2：3～20Hzの広い範囲の振動数がある。
- Type-3：10Hz以上の高い振動数だけが卓越している。
- Type-4：3Hz付近の振動数が卓越している。
- Type-5：10～20Hz付近の振動数が卓越している。
- Type-6：5～6Hz付近の振動数が卓越している。
- Type-7：3～4Hz付近の振動数が卓越している。

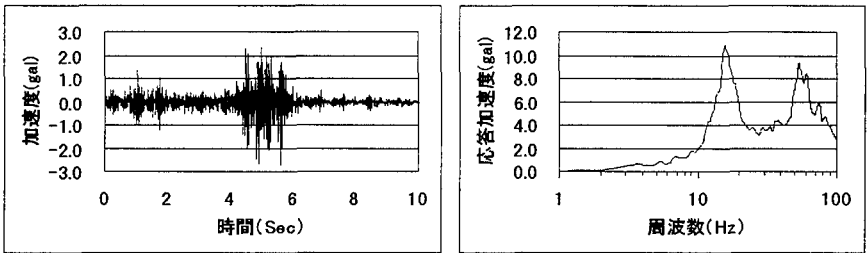
Type-1測定箇所の状況
上部構造：PCI 桁、ゴムジョイント
下部構造：RC 単柱橋脚
基礎構造：ケーソン基礎 L=27m
橋脚からの距離：約40m



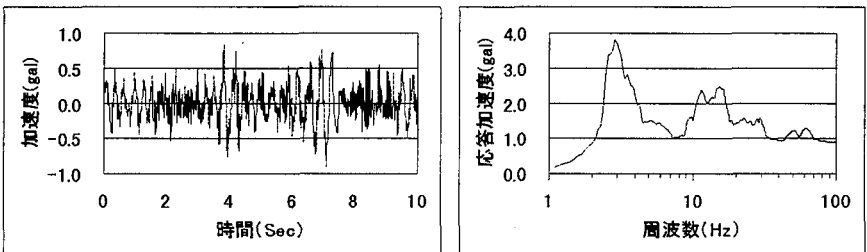
Type-2測定箇所の状況
上部構造：鋼 I 桁、鋼製ジョイント
下部構造：PC 梁 RC 単柱橋脚
基礎構造：ケーソン基礎 L=21m
橋脚からの距離：約100m



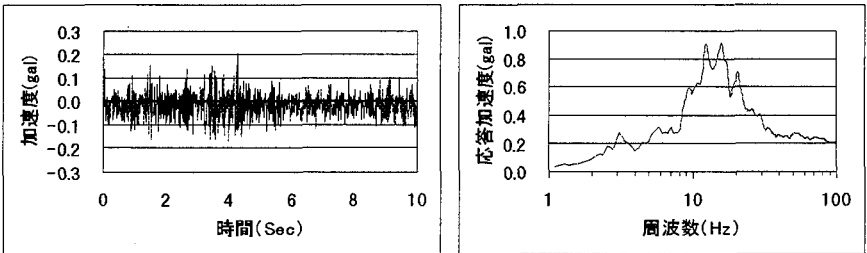
Type-3測定箇所の状況
上部構造：PCI 桁、簡易ノジョイント
下部構造：PC 梁 RC 単柱橋脚
基礎構造：杭基礎 L=22m
橋脚からの距離：約18m



Type-4測定箇所の状況
上部構造：鋼箱桁、鋼製ジョイント
下部構造：RC 単柱橋脚
基礎構造：ケーソン基礎 L=23m
橋脚からの距離：約20m

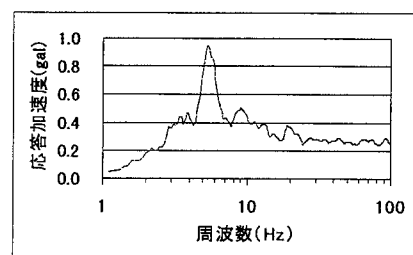
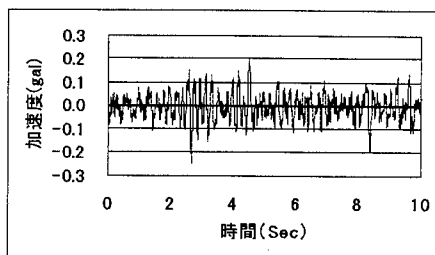


Type-5測定箇所の状況
上部構造：鋼 I 桁、鋼製フィンガー
下部構造：RC ラーメン橋脚
基礎構造：地下鉄一体基礎
橋脚からの距離：約45m



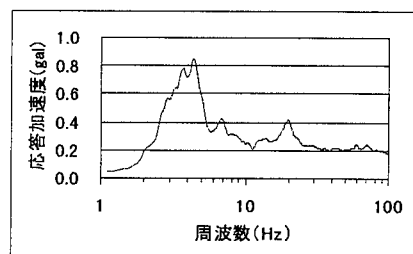
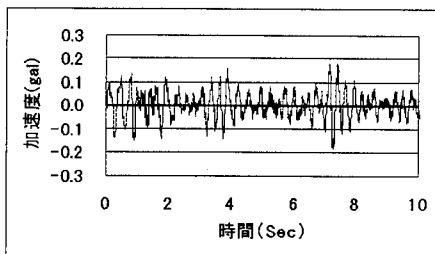
(a)地盤加速度時刻歴波形 (b)加速度応答スペクトル[5%減衰]
図-2(1/2) シミュレーションに用いた地盤振動

Type-6測定箇所の状況
 道路構造：平面道路
 地質：沖積地盤
 道路からの距離：約25m



Type-7測定箇所の状況

Type-6と同一箇所



(a)地盤加速度時刻歴波形 (b)加速度応答スペクトル[5%減衰]
 図-2(2/2) シミュレーションに用いた地盤振動

(2)家屋モデル

防振対策のパラメーター解析によるシミュレーションは、3階建て家屋を基本モデルとし、TMD設置対策⁹⁾や水平剛性を変えた場合を想定して、家屋の質量以外をパラメーターとしたモデルを作成した。

図-1の3階建て(3質点)モデルにおいて、各階の質量と各階の水平剛性比率($K_1:K_2:K_3$)を全ケース共通とし、水平剛性を変えること、ならびにTMDとして第4質点を追加することにより各ケースを作成した(表-1)。

表-1 シミュレーションに用いた家屋モデル諸元

	減衰定数	バネ定数 K [tf/m]	固有振動数 Hz			TMD 設置
			1次	2次	3次	
CASE 1	0.05	2705	3.00	7.11	9.31	—
CASE 2		"	"	"	"	有
CASE 3		4810	4.00	9.48	12.41	—
CASE 4		"	"	"	"	有
CASE 5		5303	4.20	9.95	13.03	—
CASE 6		10822	6.00	14.21	18.62	—
CASE 7		"	"	"	"	有
CASE 8	0.02	11931	6.30	14.93	19.55	—
CASE 9		2705	3.00	7.11	9.31	—
CASE 10		"	"	"	"	有
CASE 11		4810	4.00	9.48	12.41	—
CASE 12		"	"	"	"	有
CASE 13		10822	6.00	14.21	18.62	—
CASE 14		"	"	"	"	有

なお、シミュレーションモデルの固有振動数や減衰定数は、沿道家屋(木造・鉄骨・RC造)における実測結

果^{9), 10)}あるいは他機関の実測結果^{11), 12)}を参考にラウンド値で設定した。

(a)基本ケース; CASE-1, 3, 6, 9, 11, 13

固有振動数3Hz、4Hz、6Hzの3階建てモデルで、減衰定数は2%、5%の2種類(6Hzモデルの水平剛性は、4Hzモデルの約2倍)

(b)TMD設置対策; CASE-2, 4, 7, 10, 12, 14

基本ケースに質量比約2%のTMD(Tuned Mass Damper)を設置したモデル。

(c)水平剛性向上対策; CASE-5, 8

基本ケースの水平剛性を10%向上させたモデル

TMD諸元は、家屋の一次モード有効質量(全体質量の89%)に対して、TMD質量比 $\mu = 2\%$ と設定し、その質量比におけるTMDの最適振動数などを式(1)¹³⁾を用いて算出した。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{質量比} \quad \mu &= M_d/M_s \\
 \text{TMDの振動数} \quad f_d &= \{1/(1+\mu)\} \cdot f_s \\
 \text{TMDの減衰} \quad h &= \{3\mu/8(1+\mu)^3\}^{1/2} \\
 \text{TMDのバネ値} \quad k &= (2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 \cdot M_d
 \end{aligned} \right\} \text{式(1)}$$

ここに、 M_d : TMDの質量
 M_s : 家屋の有効質量
 f_s : 家屋の固有振動数

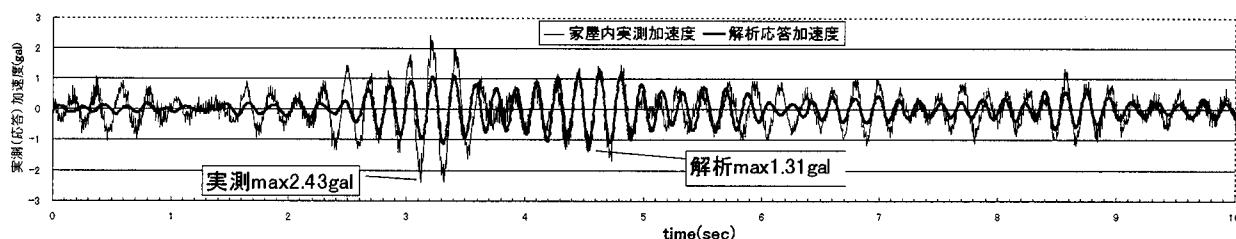


図-3 実測加速度と解析応答加速度の比較

表-2 シミュレーション結果による振動レベル増幅量(dB)

家屋モデル 地盤タイプ	5%減衰家屋モデル								2%減衰家屋モデル						平均	max-min
	CASE1 3.0Hz 基本	CASE2 3.0Hz TMD(2%)	CASE3 4.0Hz 基本	CASE4 4.0Hz TMD(2%)	CASE5 4.2Hz 剛性増	CASE6 6.0Hz 基本	CASE7 6.0Hz TMD(2%)	CASE8 6.3Hz 剛性増	CASE9 3.0Hz 基本	CASE10 3.0Hz TMD(2%)	CASE11 4.0Hz 基本	CASE12 4.0Hz TMD(2%)	CASE13 6.0Hz 基本	CASE14 6.0Hz TMD(2%)		
TYPE1	15.5	11.0	14.6	11.2	14.1	6.4	5.7	6.4	19.5	12.8	18.6	12.9	8.9	6.5	11.4	13.8
TYPE2	15.1	13.0	9.3	8.6	8.7	9.1	7.2	7.6	16.8	15.0	12.2	9.5	12.3	8.9	10.8	9.6
TYPE3	-0.7	-3.4	-0.1	-1.6	-1.1	0.4	0.1	1.4	2.2	-2.2	3.4	0.0	3.3	2.0	0.3	6.8
TYPE4	15.1	12.1	9.0	7.7	8.1	3.3	3.3	3.1	18.2	13.8	11.9	8.6	3.9	3.6	8.3	15.1
TYPE5	11.5	6.8	5.9	5.1	5.5	10.0	6.7	8.7	15.6	9.0	9.9	6.6	13.4	8.3	8.7	10.5
TYPE6	9.9	6.2	9.8	7.6	8.7	13.7	11.9	11.3	14.2	7.3	13.8	8.5	16.0	13.5	11.0	9.8
TYPE7	12.5	9.6	14.4	12.0	14.7	5.3	5.7	5.8	15.4	11.2	17.8	13.8	6.3	5.8	10.4	12.4
平均	11.3	7.9	9.0	7.2	8.4	6.9	5.8	6.3	14.6	9.6	12.5	8.6	9.2	6.9	8.7	8.8
max - min	16.2	16.4	14.7	13.6	15.8	13.3	11.8	10.0	17.3	17.2	15.2	13.8	12.7	11.5	11.1	

(3)解析手法

時刻歴応答解析プログラム (TDAP Ⅲ) の直接積分法を用いて、図-1の多質点線形弾性モデルに Type-1～7の水平振動加速度を入力し、3階床面に相当するM₂質点の応答加速度を算出した。

(4)解析の妥当性検証

解析の妥当性を検証するため、起振機試験により固有振動数がほぼ6.0Hzと推定できている鉄骨造3階建モデルハウスにおける実測値との比較を行った。解析はモデルハウス玄関前地表面の実測振動加速度(前述 Type-6)を図-1のモデルに入力し、3階床の時刻歴応答加速度を算出した。その結果と家屋3階中央付近での実測加速度を図化し図-3に比較して示す。

図-3を観察すると、固有振動数に近い6Hz程度の大きな振幅では、実測加速度と多質点系モデルによる解析結果がよく一致している。この結果は最新の建築基準法に整合した家屋が、地盤振動に対して図-1の多質点系モデルに近い挙動をしていることを示している。実測加速度に見られる高い振動数は、床や壁の部材振動と考えられ、振幅も小さく振動レベルにはほとんど影響しない。6Hzに近い振動数でも解析値の振幅が実測値に比べて小さくなる部分があるが、この理由として下記の事柄が考えられる。

- a) 一方向のみの振動はあり得ず、立体的に地盤振動は伝播しており、また、発振源が1地点に限定していない道路交通振動などの場合には、地盤振動の伝播方向は一方向とは限らない。立体構造物である実家屋で、立体的挙動の影響が現れた可能性がある。
- b) モデルハウスは、平面寸法が10m以上あるため、家屋の両端では地表面振動の位相差が生じる。仮に地盤振動の伝播速度 $V=150\text{m/sec} \sim 250\text{m/sec}$ 、周波数 $f=6\text{Hz}$ と仮定すると、波長は $\lambda = V/f = 25\text{m} \sim 42\text{m}$ となり、この地表面振動の位相差により家屋が立体的に複雑な挙動を示す可能性がある。

防振対策効果を家屋モデルの相対比較によって評価する上では、概ね共振現象を解析できていることから、上

記のような誤差は、問題ないと判断できる。

4. パラメーター解析結果

(1)振動増幅量

時刻歴解析による応答振動加速度算出結果に対して、ISO2631-2(1989)に示される鉛直・水平両方向共通の複合曲線補正を用いた感覚補正を施し振動レベルを算出した。得られた振動レベルの最大値 (VLmax) と同様に算出した地盤振動レベル最大値の差を振動増幅量と定義して、表-2に示す。

表-2によれば、同じタイプの地盤振動でも家屋モデルが異なれば、振動増幅量は15dBの差がでる場合があり、同じ家屋モデルでも地盤振動の種類が異なれば振動増幅量に17dBの差がでる場合がある。つまり、振動増幅量は家屋の特性と地盤振動の組み合わせによって、大きなばらつきがあることがわかる。

3階建家屋における防振対策手法を想定し、TMDの設置、水平剛性の変化、減衰定数の変化をシミュレーション解析した。その応答加速度から算出した振動レベル増幅量について比較した結果、次のことが明らかになった。

- a) 家屋3階における振動レベル増幅量は、10dB以上(最大20dB程度)見られる場合が多い。
- b) 家屋の固有振動数が大きい(水平剛性が大きい)ほど、振動増幅量は小さくなるが、例外もある。これは、地盤の固有振動数と家屋の固有振動数の組み合わせにより共振現象が大きい場合には、振動増幅が大きくなり、共振が目立たない場合には、振動増幅は小さいためと考えられる。(CASE-1, 3, 6の対比、CASE-9, 11, 13の対比)
- c) 家屋の減衰定数2%と5%を対比すると、振動増幅量は5%減衰の場合が、平均3dB程度小さくなる。(CASE-1とCASE-9, CASE-3とCASE-11, CASE-6とCASE-13の対比)
- d) 5%減衰家屋の場合、家屋の水平剛性を10%程度向上させても、振動増幅量は1～2dB程度しか低減しない。

(CASE-3と CASE-5の対比, CASE-6と CASE-8の対比)

- e)各階の水平剛性を全て2倍程度に向上させれば、10dB程度の振動低減効果を得られる場合が多いが、地盤の卓越振動数と剛性増加後の家屋固有振動数が近づいてしまう場合には、逆に増加することもある。(CASE-1と CASE-3と CASE-6の対比, CASE-9と CASE-11と13の対比)
- f)質量比2%程度のTMD設置によって、多くの場合、増幅量を2～7dB低減できる。家屋の減衰定数が小さいほど、家屋の固有振動数が低いほど、TMDによる振動低減効果が大きい。

(2)応答加速度の周波数分析による確認

TMDの効果確認の一例として、Type-5 地盤振動における、6Hz 家屋(CASE-6:基本、CASE-7:TMD あり)の家屋応答加速度フーリエスペクトルを図-4(a)(b)に、地盤振動に対する振動数毎の家屋の増幅倍率(伝達関数)を図-5に示す。この例では、6Hzの固有振動数付近で増幅倍率が約半分程度に低下し、TMD設置効果が典型的な形で現れている。

Type-5 地盤振動は、10Hz以下では卓越振動数が目立たず、ホワイトノイズに近いという特徴から、このような地盤振動の場合には、家屋の固有振動数(この例の場合は6Hz)付近における共振現象がはっきりと現れ、TMDの振動低減効果が得やすいといえる。

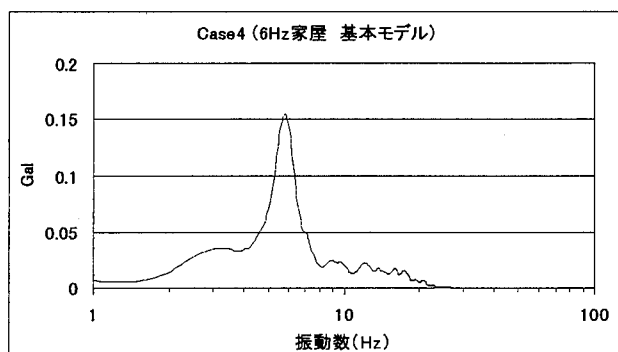


図-4(a) 家屋応答(6Hz 家屋基本モデル)

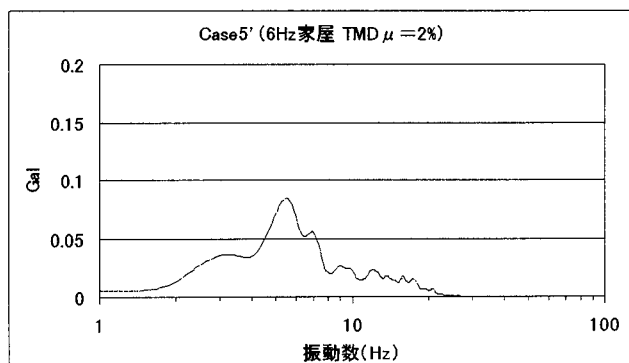


図-4(b) 家屋応答(6Hz 家屋 TMD 対策モデル)

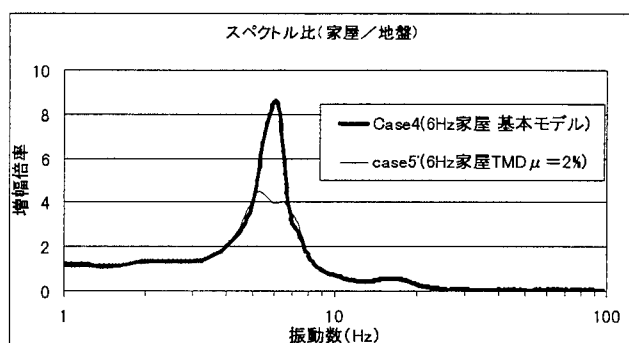


図-5 地盤振動から家屋への増幅倍率

(3)考察

上記のシミュレーション結果から、一般家屋における水平方向防振対策には、多少の例外はあるものの、概ね次の手法で振動低減効果が望めることが分かった。

①TMDの設置

例えば質量比2%のTMDを3Hzの家屋に設置することにより、最大7dBの振動レベル低減が予測された。

②水平方向剛性の大幅な増加

固有振動数3Hzの家屋を水平剛性を増加させて、固有振動数を4Hzにすることにより、最大6dBの振動レベル低減が予測された。4Hz家屋と6Hz家屋の比較でも同様の効果が得られる。ただし、4Hzと4.2Hzおよび6Hzと6.3Hz程度のわずかな剛性増では明確な振動低減効果は見られない。

③建物の減衰性能の向上

固有振動数3, 4, 6Hzの各家屋で減衰定数を2%から5%に向上させれば、最大4dBの振動レベル低減が計算された。

5. まとめ

シミュレーションによるパラメータ解析結果では、質量比2%程度のTMD設置によって、多くの場合、増幅量を2～7dB低減できること、家屋の減衰定数が小さいほどTMDによる振動低減効果が大きいこと、あるいは、水平方向剛性を2倍に上げれば家屋振動を10dB程度低減できる場合があることが分かった。しかし、家屋の固有振動数や地盤の卓越振動数の組み合わせによっては振動低減効果が得られない場合もあることから、シミュレーションによる防振対策の効果予測が重要であるといえる。

なお、家屋の水平剛性向上方法として、耐震壁増加による方法以外に内壁材や外壁材の取付方法の改善が挙げられる。軸組構造の家屋では地震に対して、これら壁材の強度を期待しないのが一般的だが、地震に対する振動実験⁽⁴⁾では、石膏ボードやサイディングが水平剛性に大

きく寄与することがわかっている。交通振動のような微小振動に対する実験結果では無いものの、内壁材や外壁材の取付ビスや接着剤の密度を上げるだけで、大きな水平剛性を期待できる可能性がある。

参考文献)

- 1)徳永法夫・西村昂・谷口与史也・宮原哲：道路交通に起因する家屋振動増幅に関する一考察、土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集、1997 年 9 月
- 2)中央公害対策審議会騒音振動部会振動専門委員会報告添付資料；工場、建設作業、道路交通、新幹線鉄道の振動に係る基準の根拠等について、1976 年 2 月 28 日
- 3)藤井光治郎：新幹線沿線建物の騒音・振動対策、鉄道建築ニュース(ARAN)、1989 年 7 月
- 4)大熊勝壽：木造建築防振工法開発とその周辺の話題、鉄道建築ニュース(ARAN)、1982 年 2 月
- 5)：鉄骨系住宅の防振工事設計施工標準（案）、鉄道建築ニュース(ARAN)、1984 年 12 月
- 6)大熊勝壽：新幹線木造住宅における振動対策、音響技術 No.39、1982 年 8 月
- 7)倉内公嘉(環境庁大気保全局特殊公害課)：公害振動の新評価法に関する研究成果、騒音制御 Vol.14,No.4、1990 年

- 8)金治英貞他：高架橋からの交通振動を受ける実建物の TMD による制振、平成 5 年 9 月、土木学会第 48 回年次学術講演会概要集
- 9)徳永法夫・西村昂・谷口与史也・宮原哲：道路交通に起因する家屋振動増幅に関する一考察、土木学会第 52 回年次学術講演会(平成 9 年度)講演概要集 VII-71、1997 年 9 月
- 10)徳永法夫・西村昂・谷口与史也・宮原哲：沿道木造家屋における防振対策に関する考察、土木学会第 53 回年次学術講演会(平成 10 年度)講演概要集、1998 年 9 月
- 11)中村豊・西永雅行：常時微動による二階建住家の耐震性評価、第 22 回地震工学研究発表会講演論文集、1997 年 7 月
- 12)松岡達郎・白石英孝・毎熊輝記：常時微動の伝達関数測定による低層住宅の動特性の決定、物理探査、VOL.40 No.2、1987 年
- 13)梶川康男、橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993 年、pp.262-263
- 14)宮本・木村・田中・大橋・坂本：J R 鷹取波加振による軸組構法木造住宅の実大振動実験その 4、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、C-1、構造Ⅲ、1997 年 9 月、pp.159-160

3階建て家屋における道路交通振動に対する防振対策の研究

徳永法夫 西村昂 谷口与史也 宮原哲

道路交通振動に対する水平方向防振対策の適用範囲と、その効果を定量的に把握することを目的として、質点モデルを用いて動的解析をおこなった。パラメータ解析結果では、家屋の固有振動数と地盤の卓越振動数の組み合わせによって、防振対策の効果が異なることがわかった。また、質量比2%程度のTMD設置によって、多くの場合、増幅量を2~7dB 低減できること、あるいは、水平方向剛性を2倍に上げれば家屋振動を10dB 程度低減できる場合があることなどが分かった。これらの結果から、シミュレーションによる防振対策の効果予測が重要であるといえる。

To grasp the application range and the effect of countermeasure for 3-stories houses in horizontal direction against the road traffic vibration , we did a dynamic analysis using the mass point model.

By the parameter analysis result, we found that the effect of countermeasure depended on the combination of the house peculiar frequency and excellency frequency of the ground. When the TMD about 2% mass ratio is setting, in a lot of cases, it is possible to reduce amplification of vibration level about 2 - 7 dB. It found that the house vibration sometimes can be reduced about 10 dB when the horizontal direction stiffness is raising twice.

It is possible to say that the simulation by dynamic analysis is important to estimate for the effect of countermeasure in horizontal direction against the road traffic vibration from these results.