

実大振動実験と強震観測に基づく低層鉄骨住宅の振動特性の振幅依存性に関する研究

A STUDY ON THE AMPLITUDE DEPENDENCY OF DYNAMIC PROPERTIES OF STEEL FRAMED LOW-RISE HOUSING BASED ON FULL-SCALE VIBRATION TEST AND SEISMIC OBSERVATION

中田 信治*, 福和 伸夫**, 西畑 尚***

Shinji NAKATA, Nobuo FUKUWA and Hisashi NISHIHATA

In order to grasp the dynamic characteristics of steel framed low-rise housing, several vibration tests are carried out for different construction stages of several housings. The dynamic properties are evaluated as natural frequencies and damping ratios by using several identification methods based on observation records obtained from free-vibration and sweep excitation tests and seismic observation. First, the differences of results among excitation conditions are examined. Next, by comparing the results for different construction stage, the effect of non-structural members and amplitude dependency is studied. When the amplitude is increases, the natural frequencies decrease and damping ratios increase. These eigenproperties shows strong amplitude dependency when the non-structural members exist. From these results, it is shown that the non-structural members act an important role for the dynamic properties.

Keywords : full-scale vibration test, seismic observation, natural frequency, damping ratio, amplitude dependency

実大振動実験, 強震観測, 固有振動数, 減衰定数, 振幅依存性

1. はじめに

建築構造物の振動特性を振動実験より求めることは従来数多く行われてきている。^{1)~4)}しかしこれらの対象建物は主として時刻歴応答解析による検証を必要とする電力施設や高層建物・免震建物である。これに対して戸建て住宅のような低層建物については振動実験に基づく振動特性の推定に関する研究は少ない。

近年、構造設計の性能設計化と共に、環境振動のレベルから強地震動時に至る幅広い振幅範囲での振動性状の正確な把握が必要とされるようになってきた。こうした中、鉄骨住宅を中心に低層住宅においても振動特性を明らかにしようとする研究が徐々に行われてきている。⁵⁾~¹¹⁾ 設計上、建物の応答を評価する上で固有振動数、減衰定数の設定は重要な要素となる。中でも減衰定数は建物の応答に大きな影響を与えるにも係らず鉄骨造は慣用的に 2%とされている場合が多く、応答を予測するには設定が不十分である。

平成12年10月17日には、建築物に関する告示¹²⁾により免震建築物普及のための条件が整備され、戸建て住宅のような建物にも適用可能な免震装置が実用化されてきており、戸建住宅でも免震化が可能となってきた。今後、免震は勿論のこと制振技術も戸建て住宅に普及していく可能性が十分考えられる。これらの建物では振動性状のより正確な評価が設計の基本となる。特に2次部材の寄与が大きく振幅依存性

の強い戸建て住宅の場合、微振動から強震動時までの振動性状の変化に関する知見が重要となる。

以上のことから、本研究では環境振動などの微小振幅レベルから地震時における大振幅時までの鉄骨住宅の振幅依存性に焦点をあてて分析していく。

住宅の場合、一般に平面形状や間取りが複雑であり、2次部材やその接合方法の影響が大きいため振動性状を解析的に解明することは困難である。従って、耐震設計で考えているような建物の変形レベルにおいて実建物の減衰定数や固有振動数を定量的に評価するには、実測・実験に基づいて評価することが現実的である。

そこで、本論では起振機による実大強制加振振動実験、引き綱による実大自由振動実験を行い、環境振動レベルを想定した微小振幅レベルから大地震を想定した大振幅レベルにおける振動特性の推移の把握を試みた。次に、実建物に対して建設段階毎の起振機による強制加振実験を行い振動特性に及ぼす2次部材の影響の把握を行い、更に建物竣工後には継続的な強震観測を行い、実際に建設された建物の地震時における考察を行った。また、既往の観測地震波に対する振動特性の確認を行うため、観測地震波に対する実大振動台実験を小振幅レベル、中振幅レベル、大振幅レベルで行い実地震波に対する振幅依存性の確認を行った。

* 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生・工修
** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博
*** 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.
Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

表1 実大振動実験及び強震観測一覧

建物概要	階数	建物A	建物B	建物C
	構造形式	ラーメン構造	耐力パネル形式軸組構造	耐力パネル形式軸組構造
	規模(短辺×長辺)	3.66m×7.32m(1F~3F)	8.54m×16.775m(1F) 6.71m×12.2m(2F)	6.405m×6.71m (1F~2F)
	重量(基礎を除く)	28トン	62トン	25トン
実験概要 及び 観測概要	建設段階毎の微動、起振機	○	○	—
	大振幅加振起振機実験	○	—	—
	小振幅加振起振機実験	○	○	—
	引き綱実験	○	—	—
	強震観測	—	○	—
	振動台実験	—	—	○
	微動	○	○	○

2. 実験概要

表1は本論で対象としている鉄骨戸建住宅の実大振動実験及び強震観測の一覧を示す。建物Aは実験用に施工した小規模かつ細長い平面形状の3階建ての鉄骨ラーメン構造である。振動特性を詳細に分析するため、この建物では各建設段階で小振幅の強制加振実験を行うと共に、竣工時には大振幅までの強制加振実験、引き綱実験を行っている。建物Bは実用されている耐力パネル形式の2階建ての鉄骨軸組み構造であり、建物Aと同様に建設段階ごとに小振幅の強制加振実験を行い建設過程における振動特性の変化を測定している。建物完成後は継続的に強震観測を行っており、20を超える地震動記録が得られている。建物Cは振動台実験を行い小振幅時から大振幅時の振動特性の確認を行っている。いずれの建物も床及び外壁はALC板、内装及び間仕切壁は木下地の上に石膏ボードが釘打ちとなっている。以下、各実験及び強震観測の概要と結果を示す。

3. 建物A（強制加振実験及び引き綱実験）

建物Aは鉄骨造3階建てラーメン構造である。試験体建物の重量は28tであり、建物形状は長辺方向が7.32m、短辺方向が3.66mと細長い形状で短辺方向にのみ開口部をもつ。図1に平面図及び起振機の設置概要を示す。振動実験としては常時微動計測、小型電磁式及び大型機械式起振機による強制加振実験、小型起振機と引き綱を用いた自由振動実験を行った。起振機は建物の3階床に設置し、これによって強制振動試験を行った。電磁式加振機を用いた場合には、小加力時には中

央に設置された1台で加振を行い、より大きな加振力での起振時には床平面端部に設置した2台を同時制御して加振した。電磁式起振機の加振力の算定には、起振機上部に取り付けた歪みゲージ式加速度計によって得た加速度に可動部質量を乗じて求めた。機械式起振機の場合は、中央に設置した大型起振機1台で並進方向への加振を行い、加振力は制御用の位相波と制御板に表示される加振力振幅値から算定した。

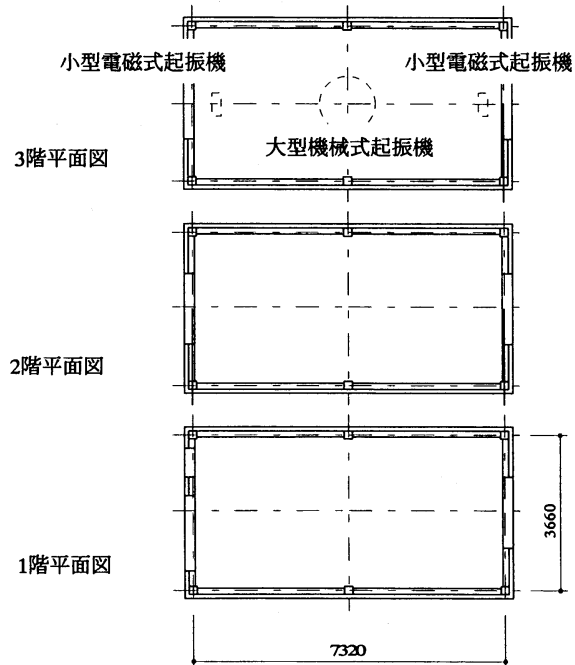


図1 建物A平面図及び起振機設置概要

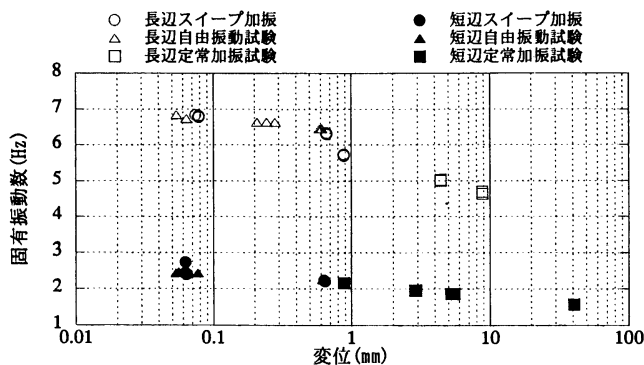


図2 応答変位と固有振動数の関係（強制加振実験）

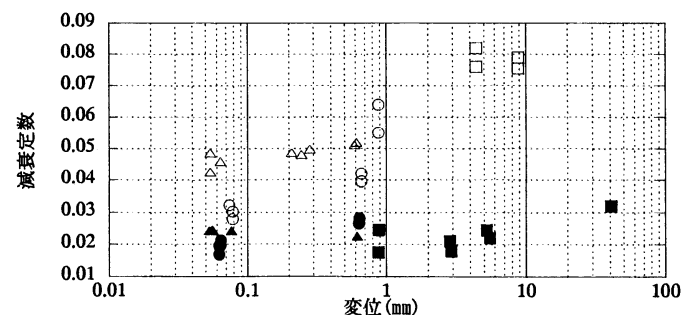


図3 応答変位と減衰定数の関係（強制加振実験）

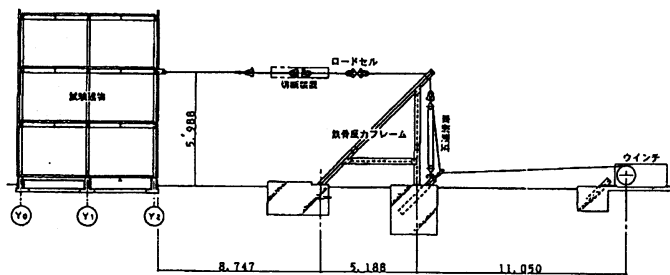


図4 建物A立面図及び引き綱実験概要

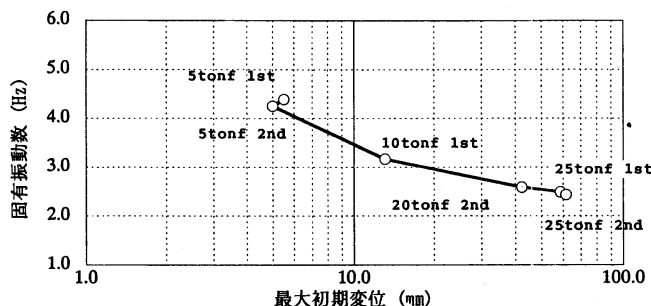


図5 初期変位と固有振動数の関係(長辺方向)

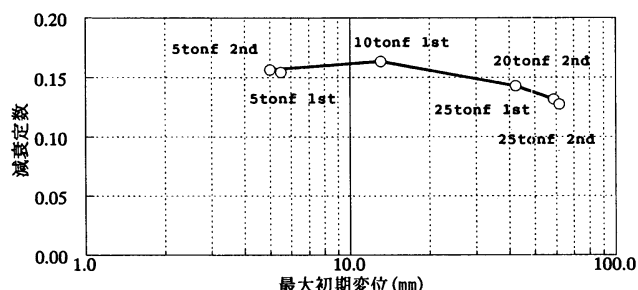


図6 初期変位と減衰定数の関係(長辺方向)

電磁式起振機を用いたスイープ加振試験では、10分間の掃引時間で振動数を1.0~10Hzに変化させた。自由振動試験の際には、3階床に設置した2台の電磁式起振機により共振振動数で調和加振を行い、定常状態を確認した上で起振機を急停止させ、その後の自由振動波形を計測した。なお、機械式起振機による加振力は建物の短辺方向に100kgf、300kgf、500kgfの3ケース、長辺方向に500kgf、1000kgf、3000kgfの3ケースを設定した。

図2、図3に、強制振動試験による共振曲線、自由振動試験結果から求めた各加振力に対する共振振動数と減衰定数の関係を示す。機械式起振機による大加振時には、加振力の増加に伴い、共振振動数が短辺方向で2.5Hzから1.9Hz、長辺方向で6.9Hzから4.7Hzと減少している傾向が読み取れる。減衰定数については短辺方向が1.8%から3%、長辺方向が3%から8%に増加している。このように振動特性が加振力あるいは振幅に対して強い振幅依存性を示すことが確認された。特に2次部材の量が多い長辺方向にその傾向が顕著に見られた。

更に、大きな振幅レベルでの振動特性を把握するために、強制加振試験を行った試験体で引き綱による自由振動実験を引き続き行った。但し、強制加振で損傷した部位は補修した上で実験を行った。3階床レベルの梁に取り付けた鋼製のワイヤーをウインチによって引っ張ることで建物を強制変位させ、任意に設定した引張力で荷重を急激に解除することで自由振動実験を行った。図4に引き綱実験の概要を示す。

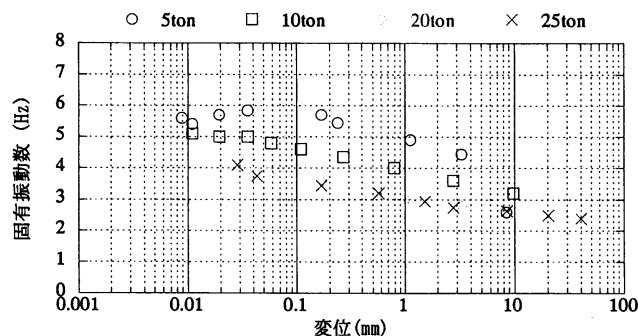


図7 応答変位と固有振動数の関係(長辺方向)

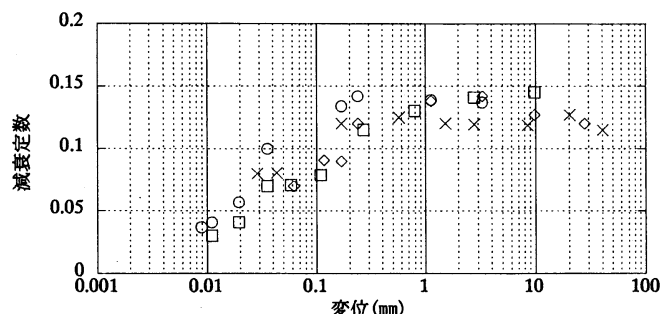


図8 応答変位と減衰定数の関係(長辺方向)

ワイヤーの引張荷重解除には、切断片を用い、切断用の鉄板には数種類の引張強度のものを用いた。切断時の引張荷重についてはロードセルによっても同時計測した。引張荷重は、建物長辺方向のみに作用させ、5tonf、10tonf、20tonf、25tonf、の4種類について、それぞれ2回ずつ合計8回の建物自由振動応答をこの順で計測した。

引き綱実験の記録波形から求めた固有振動数と減衰定数と切断時の最大初期変位の関係を図5、図6に示す。固有振動数はフーリエスペクトル振幅のピーク振動数から求め、減衰定数は自由振動波形の振幅比から求めた。図から、初期変位の増加に伴い固有振動数が低下する傾向が見られる。同じく減衰についても振幅依存性が見られるが、減衰定数は増加に伴い一様に増加傾向を示すのではなく、初期変位10~20mm付近までは一旦増加しそれ以上では逆に低下する傾向を示している図7、図8には、振幅依存性をより細かく見るために、自由振動波形の3周期毎に固有振動数と減衰定数を求めた結果を示す。振動数はゼロクロッシング周期から、減衰は振幅比から求めた。図7、8においても図2、3と同様の振幅依存性の傾向が見られる。振動数は振幅の増加と共に低下し、減衰定数は10mm付近までは振幅の増加に伴い増加するが、それ以上では逆にやや低下しており、図5、6の傾向と対応している。但し、図5、6を観察すると、同一加速度でも加振経験による振動数の減少と減衰定数の増加が認められ損傷劣化の影響が現れている。ちなみに、引き綱式実験8ケース終了後の常時微動計測値では固有振動数が6.9Hzから4.3Hzに低下し、減衰は3.2%から7.9%に増加した。

4. 建物B(強震観測に基づく分析)

建物Bでは実際に建設された鉄骨住宅を利用して、建設段階毎の振動実験を行うと共に竣工後に強震観測を継続的にを行っている。観測対象は鉄骨2階建ての住宅である。上部構造の総重量は62.4tである。

図9に各階の平面図を示す。取り付く2次部材の量は各方向とも建物Aの短辺方向と長辺方向の中間的な量となっている。表2に振動実験

表2 建設段階の推移

建設段階	建物概要	総重量 (ton)	備考
1	鉄骨フレーム	18.1	
2	外壁取り付け後	27.7	
3	屋根設置後	34.4	
4	内装	57.7	
	竣工後	62.4	積載荷重含む

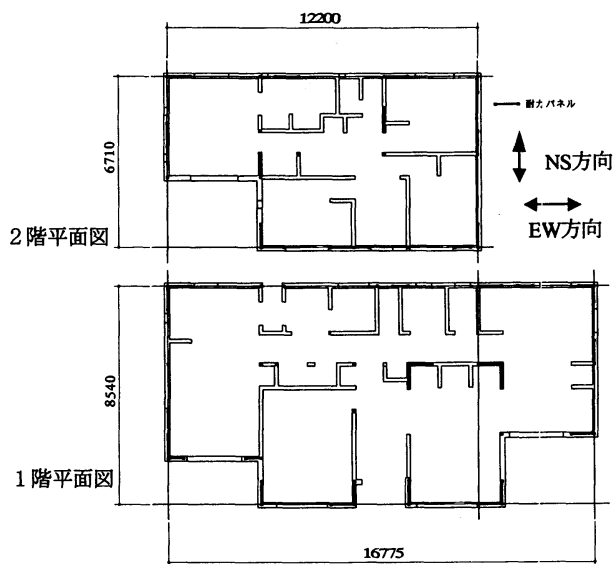


図9 建物B平面図

を行った建設段階毎の建設状況を示す。実験内容は常時微動、電磁式起振機を用いたスイープ加振実験、自由振動実験であり、動コイル型微動計とサーボ型加速度計を用いて記録した。これらの実験結果に基づき固有振動数・減衰定数を評価し振動特性の把握を試みた。図10にスイープ加振実験から求めた建設段階毎の共振曲線を示す。図より建設段階の進捗と共に振動性状が大きく変化したことが確認できる。図11に、スイープ加振実験で得られた共振曲線からカーブフィット法で求めた固有振動数・減衰定数と第1建設段階に対する重量比と剛性比の推移を示す。施工段階が進むに従い固有振動数、減衰定数共に増大していく傾向が見られる。

固有振動特性の振幅依存性を検討するために、自由振動実験時にR階中央で収録した自由振動波形から3波区間毎に求めた固有振動数を図12に、減衰定数を図13に示す。これらの図から、固有振動数に関しては振幅が大きくなるに従って減少し、減衰定数は増加する傾向がみられる。微動時の建物固有振動数は建物Aの長辺方向に近い値であるが取り付く2次部材の量が建物Aの短辺方向と長辺方向の中間的な値であるため両方向の中間的な傾向を示している。

強震観測は竣工後約3年に渡って実施している。観測項目は1階床下とR階の加速度で行っている。図14に強震観測の概要を示す。強震計は1階床下、R階中央に設置している。これらの強震計はLANアダプタ経由で家庭内LANに接続し、収録データはISDN回線及びケーブルテレビネットにて転送するようになっている。

図15に愛知県西部(2000年9月5日)で発生した地震の地震動波形とフーリエスペクトルを示す。建物直下で起こった地震であり、継続時間が短い。1階は高振動数成分を含んでおり比較的大きな応答増幅が見られる。図16は長周期成分が卓越した鳥取県西部地震(2000年10月6日)

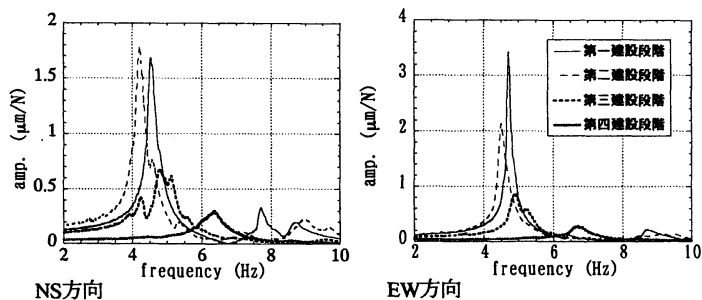


図10 強制加振実験による共振曲線の建設段階毎の変化

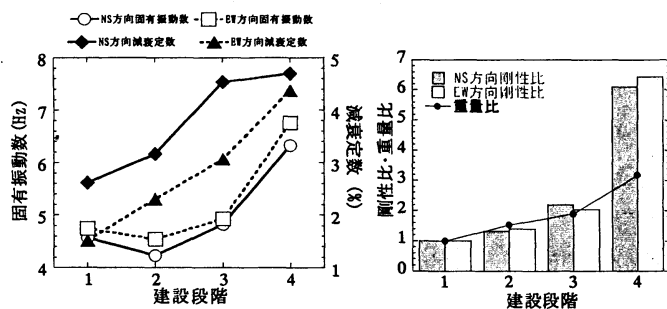


図11 小振幅時強制加振実験による建物特性の建設段階毎の変化

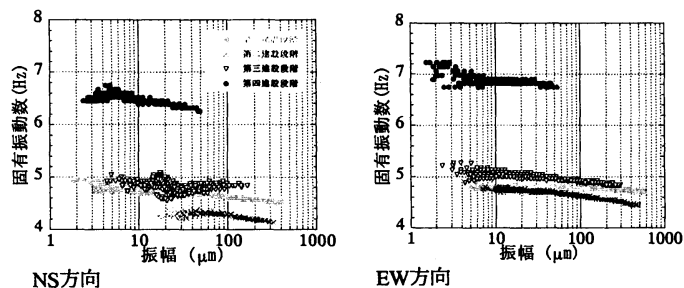


図12 固有振動数の振幅依存性

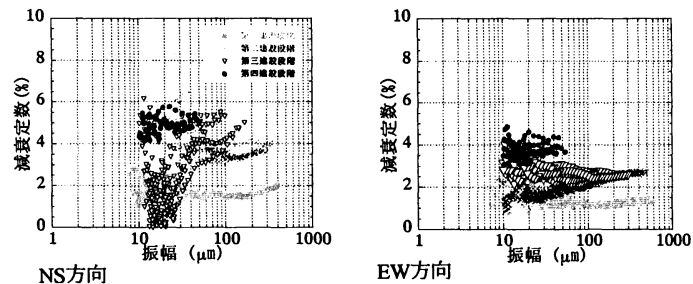


図13 減衰定数の振幅依存性

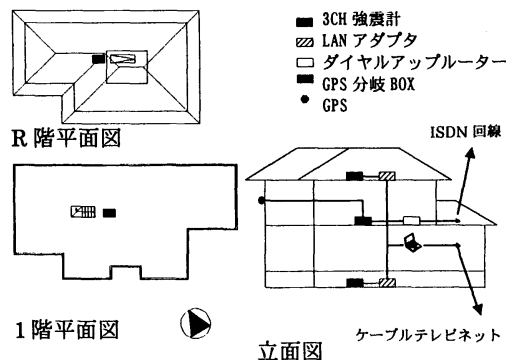


図14 強震観測概要

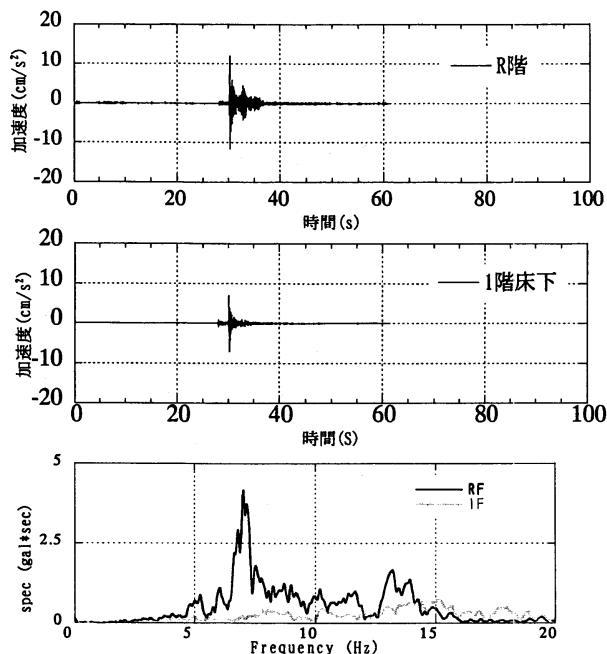


図15 愛知県西部地震の加速度波形とフーリエスペクトル (2000年9月5日 EW方向)

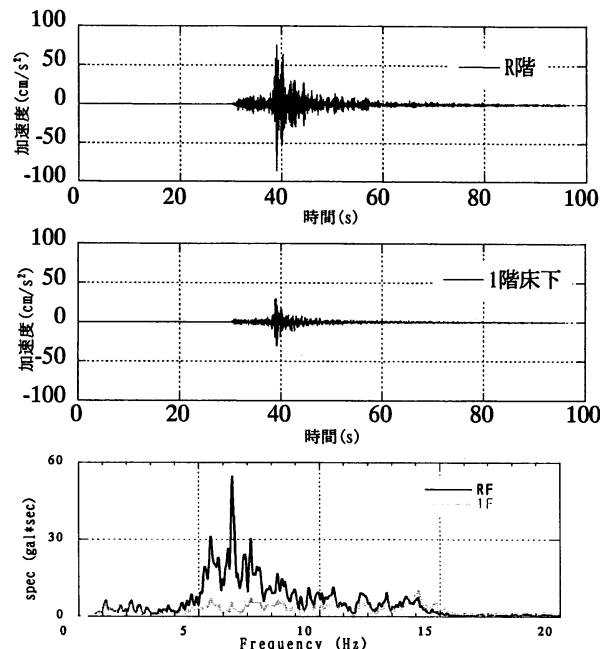


図17 静岡県西部地震の加速度波形とフーリエスペクトル (2001年2月23日 EW方向)

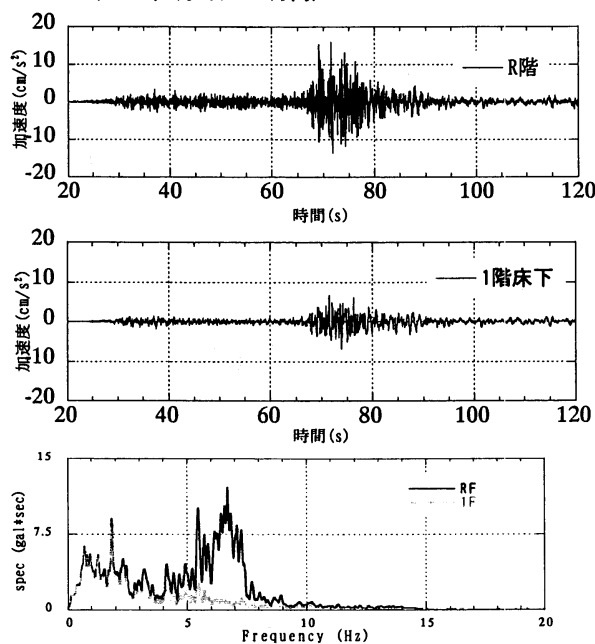


図16 鳥取県西部地震の加速度波形とフーリエスペクトル (2000年10月6日 EW方向)

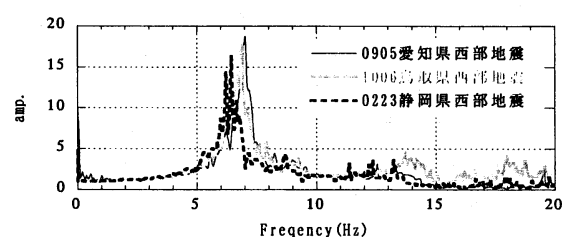


図18 RF/1Fフーリエスペクトル比

振幅が大きくなるに従い増大していく傾向が見られる。

次に、各地震データを用いて、地震動の卓越振動数と建物増幅特性との関係を検討するため、地震動の卓越振動数比を

$(PGA)/(2\pi PGV)$ PGA : 床下最大加速度 PGV : 床下最大速度
から簡易的に求め、地震動の卓越振動数とR階/1階の最大応答比との関係を加速度について図21に、速度について図22に示す。図より、特に速度応答増幅に地震動との共振による影響が顕著に現れている。

5. 建物C (振動台実験)

建物Cでは代表的な観測地震波に対する振幅依存性を確認するために小振幅レベル、中振幅レベル、大振幅レベルについて実地震波を入力した実大振動台実験を行った。上部構造体は2階建ての軽量鉄骨建物で総重量は約25tである。1階平面寸法は6.710m×6.405mである。積載荷重として、1階、2階床に60kg/m²相当のおもりを配置した。試験体の概要を図23に示す。歪みゲージ式加速度計とレーザー変位形を用いて加速度と層間変形の計測を行った。水平2方向については鉄骨架台及び1階～R階、上下方向については鉄骨架台、1階床及びR階床において計測した。入力是小振幅レベルとしてX方向、Y方向に1軸加振で20galのホワイトノイズを与え、中振幅レベルとしては1940El Centro NS地震波をX方向に1軸で16kineに規準化したものを与えた。また、大振幅レベルとしては1995JMA神戸原波を3軸同時加振で加振した。図24は1995JMA神戸原波におけるNS方向の加速度入力波形とその時の2階床レベルにおける加速度応答波形を示す。図25は各振幅レベルにおける実

の結果を示す。建物固有振動数からはずれている長周期振幅はほとんど増幅していない。図17には観測記録の中でも加速度応答の大きかった静岡県西部(2001年2月23日)で発生した地震の地震動波形とフーリエスペクトルを示す。広帯域の振動数成分を含んでおり、建物固有振動数6～7Hz付近で増幅している。このように地震動の特性によって増幅特性に差が認められる。図18にこの3波の観測記録についてRF/1FのEW方向のフーリエスペクトル比を示す。応答加速度が大きい記録ほど増幅が小さくなり振動数が低下していく傾向が見られる。

次に各地震波に対しフーリエスペクトル比からカーブフィット法で固有振動数と減衰定数を求め、建物の最大応答変位との関係を求めた結果を図19、20に示す。図より応答振幅が大きくなるに従い建物固有振動数は低下していく傾向が見られる。これに対して減衰定数は応答

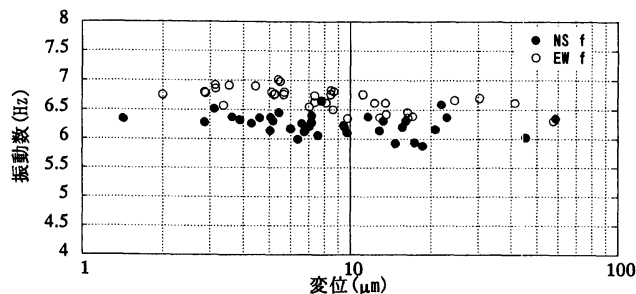


図 19 建物応答と固有振動数の関係

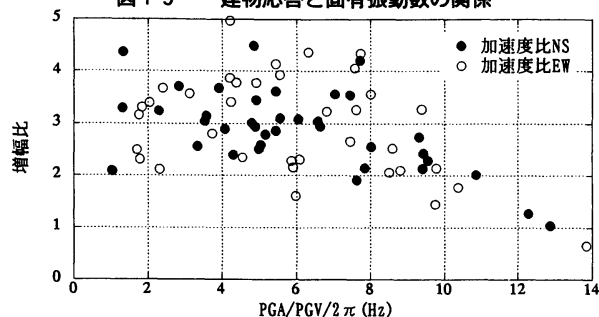


図 21 地震動の卓越振動数と建物加速度増幅比との関係

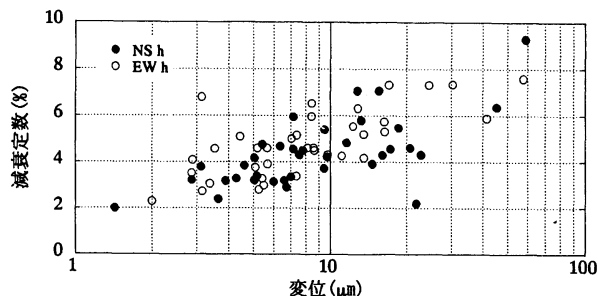


図 20 建物応答と減衰定数の関係

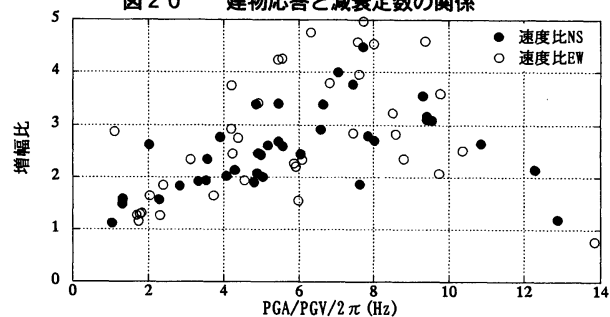


図 22 地震動の卓越振動数と建物速度増幅比との関係

験結果より得られた各方向のフーリエスペクトル比を示す。また、図 26 は応答変位と固有振動数の関係、図 27 は応答変位と減衰定数の関係を示す。図 26 より X 方向は小振幅レベルでは 4 Hz 程度あった固有振動数が中地震レベルで 3/4 程度低下し、大振幅レベルでは 1/2 程度に低下しており、骨組みのみの構造計算で得られる固有振動数 2.0 Hz に概ね近くなっていることが確認された。振幅が増大するに従い固有振動数が低下していく傾向が見られる。Y 方向についてもほぼ同様に小振幅レベルでは 4 Hz 程度あった固有振動数が大振幅レベルでは 1/2 程度に低下しており X 方向同様構造計算で得られる振動特性に近づいている結果が得られている。これに対して減衰定数は図 27 より両方向とも増加していく傾向が見られる。

6. 実験結果の考察

図 28 は 3 つの実験の振幅依存性を統一的に考察するために、縦軸の固有振動数と減衰定数、横軸の変位を統一し示した。建物 A では振幅依存性が顕著に見られた長辺方向の結果を示し、建物 B では強震観測結果から建物 C では振動台実験で得られた各方向の結果を示す。振幅の増加と共に固有振動数が低下し減衰定数は増加する振幅依存性の傾向が見られる。その傾向は小振幅レベルから中振幅レベルの変形 10 mm ~ 20 mm まで顕著に見られ、大振幅レベルの 20 mm 以降は頭打ちになる。これは振幅の増大に伴い 2 次部材相互の摩擦が切れ固有振動数が徐々に低下していき、逆に減衰定数は増加していくが、大振幅時更に振幅が大きくなると摩擦により生じていた減衰部分が頭打ちになるものと推定される。

これら結果より環境振動などの小振幅レベルでの振動特性を評価するには 2 次部材による剛性寄与が支配的であることが分かる。また、中振幅レベルについては剛性、減衰の振幅依存性を適切に考慮することが重要になる。更に大振幅レベルについては減衰の評価が重要になる。これらの結果より、居住性に直結した小振幅レベルから安全性に直結した大振幅レベルまでの振幅依存性を考慮することでより精度の良い応答評価をすることが可能であると考えられる。

次に 2 次部材の壁量と振動特性の関係を考察する。図 29 は建物に

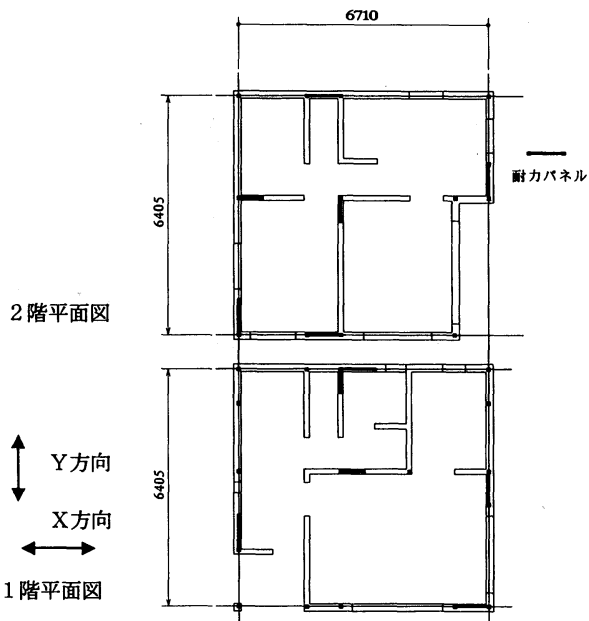


図 23 建物 C 平面図

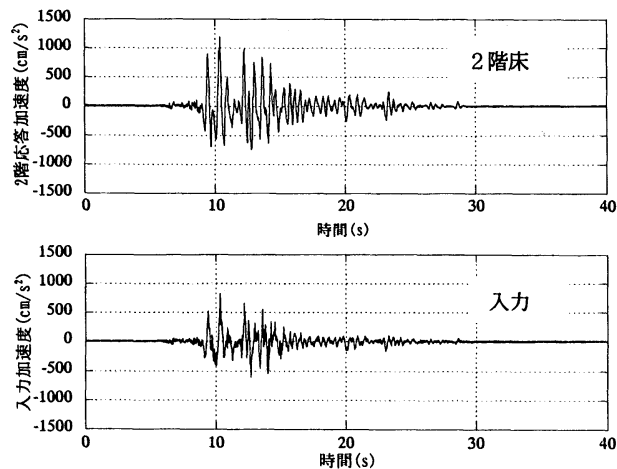


図 24 加速度時刻歴波形 (1995 JMA 神戸)

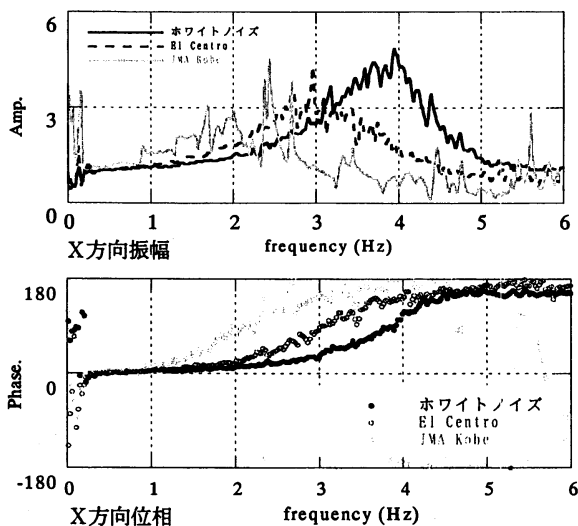


図 25 RF/1Fフーリエスペクトル比

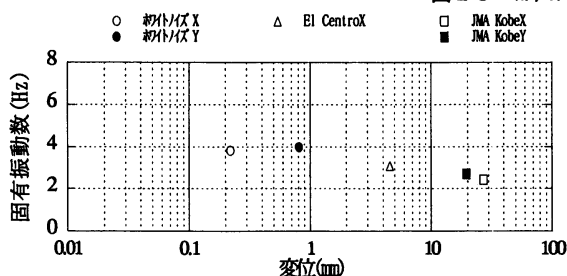


図 26 応答変位と固有振動数の関係

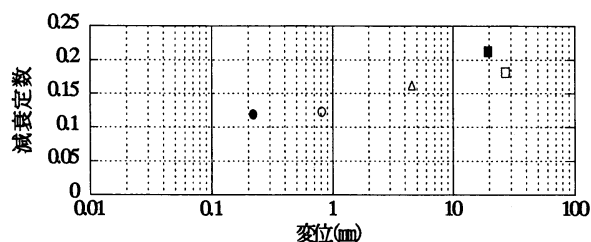


図 27 応答変位と減衰定数の関係

取り付く各部材の寄与率を評価するために建設段階毎の強制加振実験を建物Aで行った結果を示す。各建設段階における剛性比は固有振動数と上部構造の重量から簡易的に算定した2次部材の鉄骨フレームに対する剛性の比を示したものである。剛性の増加量から推定した単位長さ当たりの外壁と間仕切壁の剛性は外壁を1とすると間仕切壁は概ね外壁の1/4であった。この関係をもとに1階の2次部材の壁量（外壁×1.0+間仕切り壁×0.25）を各建物の方向毎に算出し延べ床面積で除した値の平方根と各振幅レベルにおける固有振動数、減衰定数の関係を考察する。図30は1階壁量を延べ床面積で除した値の平方根と各振幅レベルにおける固有振動数の関係を示す。壁量の少ないものは振幅による固有振動数の差は大きく見られないが、壁量が多くなるに従い小振幅レベルと大振幅レベルにおける固有振動数の差が見られるようになる。図31は同様に1階壁量を延べ床面積で除した値の平方根と各振幅レベルにおける減衰定数の関係について示したものである。減衰定数については微小振幅レベルでは壁量による減衰定数の差は大きくみられない。壁量の少ないものは振幅の増大に伴う減衰の増加はほとんど見られないが、壁量の多いものは減衰定数が大きくなる傾向が見られる。結果として外壁と内部間仕切壁については小振幅レベルで剛性に寄与し、それ以降については減衰に寄与することが確認される。

7. まとめ

低層鉄骨住宅における振幅依存性を把握するため、強制加振及び引き綱による実大振動実験、実建物の地震観測結果及び実大振動台実験を行い、低層鉄骨住宅についての固有振動特性に振幅依存性が見られることが確認された。設計に必要とされる各振幅レベルにおける特性を以下にまとめる。

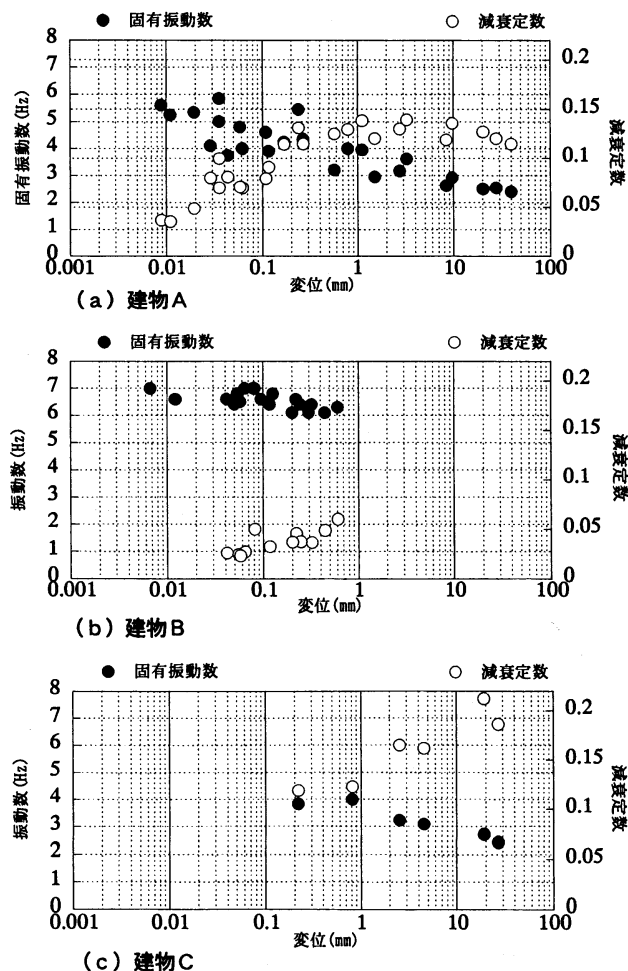


図 28 固有振動数及び減衰定数の振幅依存性

建設段階	建物概要
1	鉄骨フレーム
2	外壁取り付け後
3	外壁内装
4	間仕切壁

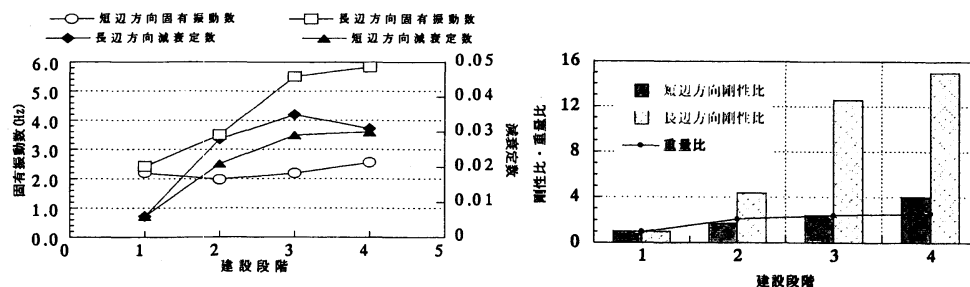


図 2-9 小振幅時強制加振実験における建物特性の建設段階毎の変化 (建物 A)

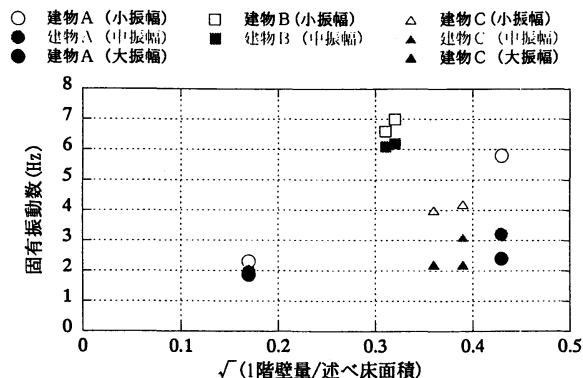


図 3-0 壁量と固有振動数の関係

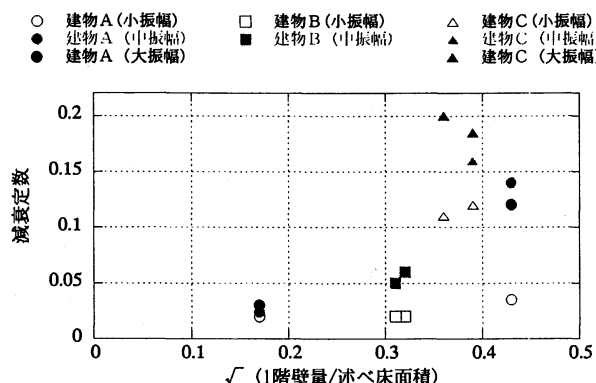


図 3-1 壁量と減衰定数の関係

- ①居住性に影響のある小振幅レベルでは2次部材の剛性の寄与率が大きく、骨組みの剛性に対して数倍から数十倍の剛性がある。また、減衰にも寄与し骨組み時1~2%の減衰定数に対して2次部材がつくことにより2~4%の減衰定数になる。そのため環境振動レベルの建物応答の評価についてはこれらを適切に評価していく必要がある。
- ②中振幅レベルにおいては振幅の増大に伴い2次部材の部材相互の摩擦が切れ固有振動数が徐々に低下していき、逆に減衰定数は増加していく傾向が見られ、概ね5%以上の減衰定数が得られている。
- ③大振幅レベルになるとこれら振動特性は構造部材によるものが支配的となり、振幅の増大に伴い大きく増加してきた減衰定数もこのレベルでは頭打ちになる。

また、2次部材の中でも、取り付く部材により寄与する割合が異なるため、こうした取り付く部材の量から各振幅レベルにおける振動特性を評価することが可能である。

今後、低層住宅にも免震、制震住宅が適用されていく事例が増加していくと考えられるが、こうした免震、制震構造の場合は、大地震時においても、上部構造の応答は中地震レベルにとどまるため、これらを適切に評価することで、建物の応答を精度よく評価することができる。また、居住性向上のために制振構造を適用していく場合について

も同様に評価することができる。通常鉄骨造に使われる減衰定数は慣用的に2%という値が設定されることが多いが、今回の3棟の建物では実際には実験結果、強震観測結果のように小振幅レベルからそれ以上の減衰定数が得られていることが確認された。

今後、こうした実験結果に加えて、小振幅レベルの振動特性を把握した建物の強震観測を継続的にやりデータの蓄積を重ねていくことは性能設計に向けて重要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、名古屋大学飛田潤先生、卒業生の田中清和氏、高井博雄氏に協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物の減衰、丸善、2000
- 2) 日本建築学会：建築構造物の振動実験、丸善、1978
- 3) 日本建築学会：建築物の耐震設計資料、丸善、1981
- 4) 横田治彦、佐藤直紀、岡田敬一：振動試験および地震観測データに基づく鉄骨高層建物の減衰性状、日本建築学会構造系論文集、第453号、pp77~84、1993.11
- 5) 福和伸夫、田中清和、近藤雅子：振動実験に基づく鉄骨3階建て住宅の固有振動特性に関する研究、構造工学論文集、vol.41B、pp279-288、1995
- 6) 西阪理永、福和伸夫、田中清和：鉄骨プレハブ建物の振動性状に及ぼす2次部材の影響に関する実証的研究（その1~その4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931~938、1995.8
- 7) 小山雅人、中村いづみ、三宅辰哉他：低層鉄骨住宅の実大振動実験（その1~その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1019~1024、1998
- 8) 三宅辰哉、福知保長：低層建物における非構造部材の耐震効果に関する研究、その1：非構造部材による水平分担と減衰、日本建築学会構造系論文集、第462号、pp151-160、1994.8
- 9) 三宅辰哉、福知保長：低層建物における非構造部材の耐震効果に関する研究、その2：非構造部材による水平分担と減衰、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp191-200、1995.8
- 10) 田淵基嗣、金谷弘、藤原勝義、上場輝康他：軽量鉄骨造2階建て住宅の振動実験（その1）実験の概要と建物の固有振動特性、（その2）ランダム波振動実験、第6回日本地震工学シンポジウム講演要旨、pp1001~1016、1982.2
- 11) 森俊之、吉川祐三、林雅樹、脇山祥広他：軽量鉄骨ブレース造3階建て建築物の強制振動試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp559~560、1991
- 12) 国土交通省：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説、2001.5
- 13) 西畑尚、福和伸夫他：鉄骨住宅の固有振動特性に関する研究、その1 振動実験に基づく分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp875-876、2002.8
- 14) 中田信治、福和伸夫他：鉄骨住宅の固有振動特性に関する研究、その2強震観測に基づく分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp877-878、2002.8

(2003年7月9日原稿受理、2003年9月4日採用決定)