

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560554  
 研究課題名(和文) 非線形動的相互作用の観点から見た大加速度を受ける建築物の被災メカニズムの解明  
 研究課題名(英文) Damage mechanism of buildings subjected to strong shaking considering non-linear dynamic soil-structure interaction  
 研究代表者  
 三辻 和弥(MITSUJI KAZUYA)  
 山形大学・地域教育文化学部・准教授  
 研究者番号：90292250

研究成果の概要(和文)：直接基礎の非線形動的相互作用を、基礎の滑りによる「入力損失」と定義し、振動台実験と数値解析により、「入力損失」を求める手法を提案した。また、直接基礎の滑りを考慮した建物の地震応答解析から「応答低減係数」を提案した。研究期間中に発生した東日本大震災の被害調査を通し、杭基礎建物については、被災建物を中心に、常時微動観測及び余震観測を行い、観測記録の分析から動的相互作用と建物被害の関係について検討した。

研究成果の概要(英文)：The effects of non-linear dynamic soil-structure interaction of spread foundations were discussed where “Input loss by base-slip” and “Response reduction factor” were proposed through shaking table tests and non-linear seismic response analysis considering base-slip of spread foundation. In case of pile foundations, the effects of non-linear dynamic soil-structure interaction were studied through field investigation of damaged buildings and microtremor measurements and aftershock observation of 2011 Tohoku Earthquake. In case of pile foundations, numerical analysis and introducing the effects into design technique will be discussed in more detail in the future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,700,000	510,000	2,210,000
23年度	1,300,000	390,000	1,690,000
24年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料、地盤工学、防災、減災、耐震

## 1. 研究開始当初の背景

近年の大地震において地震観測点で 1G を超えるような大加速度記録が得られているのにも関わらず、その周辺の建物被害が必ずしも大きくないことが指摘されている。地震による地表面の揺れの大きさと周辺の地震被害との関係を把握しておくことは新築建

物の構造設計や既存建物の耐震診断の高精度化にとって有益であるばかりでなく、地震時の避難計画や防災対策にとっても極めて重要であるため、昨今指摘されているこのような「大加速度による地震力を受けたのに対して建物の地震被害が大きい」という現象のメカニズムを解明することは建築構造

学の今後の発展にとって極めて重要な意味を持っている。

## 2. 研究の目的

大加速度に対して建物被害の少ない原因はいくつか考えられるが、そのうちの一つに地盤-建物間の動的相互作用が挙げられる。動的相互作用に関する研究は、ひずみ領域の小さな線形問題については理論面では完成の域に達し、実験や観測でも理論を裏付ける結果が得られている。また、兵庫県南部地震以来、液状化など地盤の非線形挙動が顕著に現れる大ひずみ領域での非線形動的相互作用の解明が叫ばれ、研究が進められている。

一方、ここ数年の大加速度を記録した地震の観測記録を分析すると、必ずしも地盤の変形は大ひずみ領域に達しているわけではなく、むしろ中小ひずみ領域に収まっていることが多い。また、このような地震の際に建物内と建物周辺の地盤とで同時観測を行った結果によると、動的相互作用によると思われる有効入力的大幅な低減が見られることがある。この大幅な有効入力の低減は線形範囲の動的相互作用理論では解釈しきれず、大ひずみ領域に至る前の中小ひずみ領域においてもすでに、基礎底面と地盤の剥離やすべり、浮き上がりといった非線形動的相互作用による有効入力の低減が現れていることを示唆するものである。つまり中小ひずみ領域で起こっている非線形現象の解明は建築物の複雑な地震応答を把握することに大きく貢献するものと思われる。

## 3. 研究の方法

研究方法は振動台実験及び常時微動観測、地震観測を中心に行った。また、振動台実験結果に基づき、数値解析により中小歪領域での非線形動的相互作用効果を検討した。

せん断土槽を用いた振動台実験では、直接基礎を想定した建物モデルを地盤に設置し、最近の被害地震を入力地震動として用いた。基礎が滑り出す時の加速度を求め、地震動の周期特性も含めて、中小ひずみ領域の非線形動的相互作用が建物の地震応答に与える影響について検討した。非線形動的相互作用として1)基礎と地盤のすべりによる影響、2)基礎の剥離や浮き上がりによる影響を検討した。基礎形式は直接基礎とした。

観測については、L字型平面を持つ杭支持建物において常時微動観測を実施した他、研究期間中に東日本大震災が発生したため、被災した複数の杭支持建物において余震観測、常時微動観測を実施し、動的相互作用の影響を検討した。

## 4. 研究成果

振動台実験から得られた、直接基礎と地盤の静止摩擦係数を用いて、静止摩擦係数×地

動加速度を超える地動加速度は入力損失に相当すると仮定し、継続時間中の加速度時刻歴波形の面積に対する、入力損失にあたる面積の比を、直接基礎の「滑りによる入力損失」として求めた。さらに、この「滑りによる入力損失」を考慮した加速度時刻歴波形を直接基礎への入力波とみなして、応答スペクトルを算出し、基礎固定時の応答スペクトル（「滑りによる入力損失」を考慮しない観測記録そのまま）との比を求めて、これを直接基礎の「滑りによる応答低減係数」として定義した。

直接基礎の「滑りによる応答低減係数」を用いて近年の被害地震の被害予測を行い、被害調査結果との比較から、基礎の滑りを考慮することによって、より被害実態に近い予測結果が得られることを指摘した。

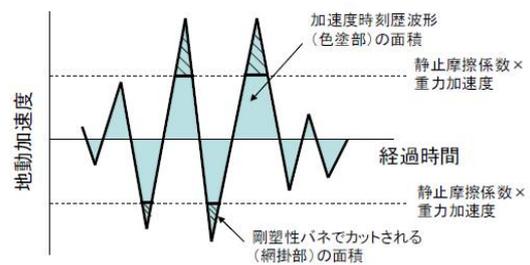


図1 入力損失の考え方

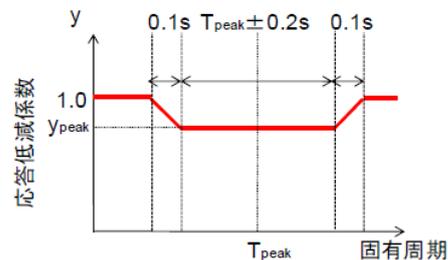


図2 応答低減係数

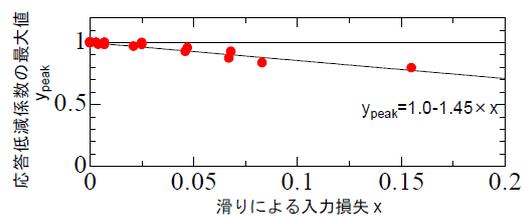


図3 滑りによる入力損失と応答低減率の関係

次に、杭基礎で支持された、L字型平面を有するRC造建物において常時微動観測を実施し、小振幅の振動時ではあるが、地盤-建物動的相互作用の影響について検討した。軟弱地盤における観測データからは最上階と1階のスペクトル比のピークが複数現れるなど(図4)、地盤-建物動的相互作用の複雑な

様相が現れており、建築振動論の観点から物理的な解釈を試みた。

また、動的相互作用効果のうち、ロッキング振動が建物短辺方向の水平振動中に占める割合を算出した。周期帯によって若干のばらつきが見られたが、30%~45%と高い値が得られた(表1)。

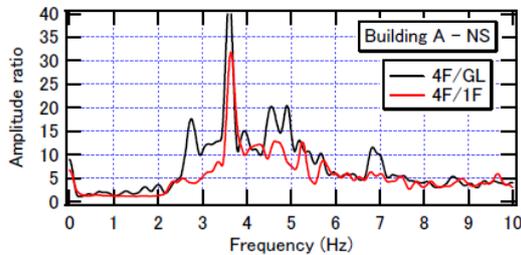


図4 L字型平面を持つ建物の振幅比 (GLは地盤を示す)

表1 ロッキング率

Frequency of Band path filter	Rocking Ratio		
	Building A	Building B	Building C
2.0-3.0 Hz	0.45	0.46	0.30
3.0-4.0 Hz	0.40	0.39	0.27
4.0-5.0 Hz	0.30	0.31	0.27

研究期間中に発生した東日本大震災での建物被害調査の一環として、被災建物において常時微動観測、余震観測を実施した。また、本震時の観測記録を含め、大加速度を受けた建物の非線形動的相互作用について検討した。さらに杭基礎を中心に基礎構造被害の調査を行い、観測記録と被害の程度との関係について考察した。震度6を超える地震により、実際に大加速度を受けた建物の観測記録と被害調査を比較できたことの意義は大きく、今後、杭基礎建物の設計法の高度化を検討するにあたり、重要な結果が得られたと考えている。

上部構造に大きな被害を生じた建物では、上部構造の固有周期と地盤の卓越周期の関係から、動的相互作用の影響はあまり大きくなく、杭基礎での被害も認められなかった。一方、軟弱地盤上に建つ杭基礎で支持されたRC造建物では、杭頭部で顕著な被害が認められ、上部構造の振動被害は小さいものの、基礎での被害が大きく、上部構造の沈下・傾斜を招いた。

杭基礎に大きな被害が起きたと推定されるSRC造14階建て建物(以下建物1)と標記)と建物本体には大きな被害は見られなかったが、隣接する階段棟の杭基礎の被害が起きたと考えられるRC造5階建て建物(以下建物2)と標記)において、常時微動観測及び地震観測を行った。

建物1)では上部構造の固有周期と敷地地盤の卓越周期が近く(約1秒)、動的相互作

用の影響があまりないものと推定される一方、建物2)では常時微動観測及び地震観測記録から、動的相互作用の影響が見て取れた。以下、動的相互作用の影響が見られた建物2)の結果について記す。図5には建物2)の概要である。住居棟に隣接する階段棟が建物脚部の損傷や杭頭部の損傷と思われる原因により最大で1/30程度、傾斜している。図6及び図7、表2には、基礎固定系の上部構造の振動特性を表わす5F/1Fの結果と相互作用系の結果を表わす5F/FF(FFは地盤)を比較して示す。建物2)は長辺方向が100mを超える細長い平面形状をしており、観測は長辺方向に5ヶ所で行っている。杭支持層は8m~16mとかなり不整形な形状をしていることが想像される。

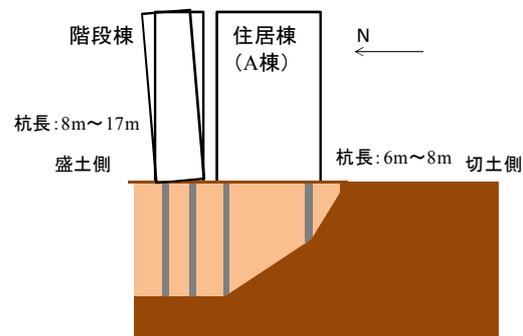


図5 建物2)の概要(短辺方向の断面)

常時微動観測記録の伝達関数から求めた振幅比について、図6には基礎固定系、図7には相互作用系の結果を示す。耐震壁のある短辺方向(TR)については長辺方向よりも若干、固有振動数が高振動数側に移動している様子が分かる。基礎固定系と相互作用系では固有振動数は約1割程度、相互作用系の方が低振動数側に移動する傾向が現れている。

これらの結果から、1次固有振動数についてまとめたものを表2に示す。各通りの横に書かれたカッコ内の数字は杭長を示す。概ね、建物の固有振動数は建物短辺方向で3.5Hz前後、長辺方向で3Hz前後となっている。各通りで結果に若干ばらつきが見られるのは、付近に階段棟が存在していることが考えられ、階段棟の振動が影響を与えている可能性が考えられる。

図8は余震観測記録の最大値を建物短辺方向(TR)と長辺方向(LN)について整理したものである。K-NET 仙台やK-NET 塩釜のサイトでは最大加速度の卓越する方向が異なっており、図5に示した敷地の地形、つまり杭支持層が不整形な形状をしている影響が考えられる結果となった。

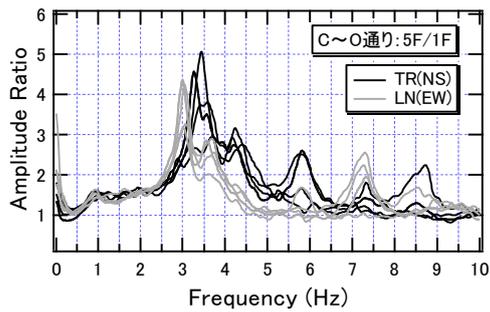


図6 振幅比 (5F/1F)

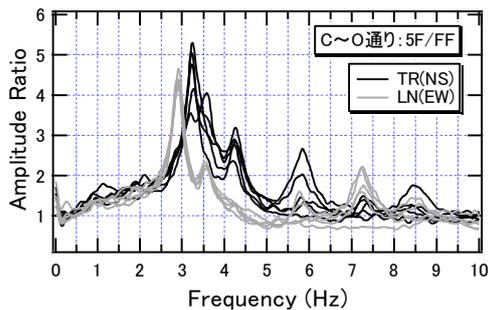


図7 振幅比 (5F/地盤)

表2 常時微動観測結果  
(カッコ内の数字は杭長、FFは地盤を示す)

	5F/1F (Hz)		5F/FF (Hz)	
	TR(NS)	LN(EW)	TR(NS)	LN(EW)
C通り(16m)	3.69	3.00	3.27	2.91
G通り(10m)	3.56	3.08	3.25	2.91
I通り(8m)	3.44	3.05	3.22	2.91
K通り(10m)	3.27	3.00	3.22	2.88
O通り(12m)	3.86	3.05	3.56	2.91

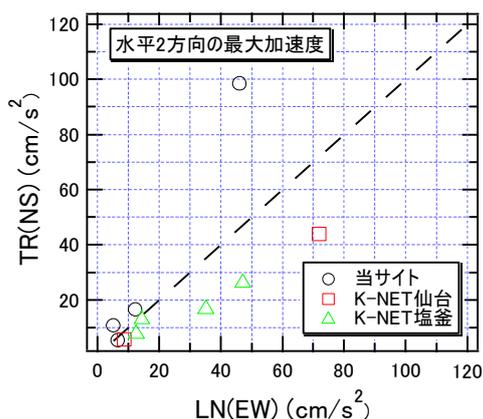


図8 余震観測記録の最大値

この他にも杭基礎建物で上部構造に被害が認められたものや上部構造に顕著な被害はないものの、沈下や傾斜を示した建物について調査を行った。

上部構造に大きな被害が認められ、大破と判定された建物では、杭基礎での被害が小さい、あるいはほとんどない状況であった。ここは基礎梁が大きく剛であり、また根入れ深さが大きく取られていたことが特徴的で、動的相互作用における根入れ効果を確認できたと言える。しかし、この建物では、上部構造の固有周期と地盤の卓越周期が近かったせいもあり、上部構造で大きな被害を生じた。

基礎で大きな被害が生じた建物では、敷地地盤のボーリングデータとの比較や、杭の引抜き調査を実施できた調査結果から、既製コンクリート杭の杭頭部が建物慣性力により大きく損傷しており、杭頭接合部の設計の重要性をあらためて認識させられる結果となった。

上部構造の固有周期と地盤の卓越周期の関係、杭基礎建物の場合は、基礎の根入れ深さの重要性、杭頭接合部の強度の確保、杭体の強度と靱性の確保、といった事項が重要であることが、本震・余震・常時微動観測記録および各種の被害調査から指摘できた。

直接基礎については滑りの実験結果を用いて基礎の非線形動的相互作用を考慮する方法を「滑りによる入力損失」、「滑りによる応答低減係数」として提案したが、杭基礎については実在建物での常時微動観測及び地震観測記録の分析に留まった。数値解析的な検討や設計法への応用については今後の検討課題としたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Mitsuji K., Z. Liu, S. Ohno and M. Motosaka, Preliminary Investigation of the Pile-foundation Buildings Leaned By Damage in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 4022, 2012.9、査読有
2. Mitsuji K., Z. Liu, S. Ohno and M. Motosaka, Microtremor Measurements of the High-rise Buildings Leaned by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 1180-1190, 2012.3、査読有
3. 松川和人, 三辻和弥, 前田匡樹, 直接基礎滑りを考慮した木造住宅の地震時被害

- 推定手法の高度化に関する研究, 第13回  
日本地震工学シンポジウム, pp.  
1858-1865, 2010.11、査読有
4. Mitsuji, K., Motosaka, M., Takahashi,  
Y. and K. Tsukamoto, Three-dimensional  
Motion Estimation of the RC Building  
with Irregular Plan Based on  
Microtremor Measurements, 14th  
European Conference of Earthquake  
Engineering, Paper No. 1400, 2010.8、  
査読有
  5. 松川和人, 三辻和弥, 前田匡樹, 直接基  
礎の地表面での滑りを考慮した鉄筋コン  
クリート造学校建築物の地震時被害推定  
に関する研究, コンクリート工学年次論  
文報告集, 32(2), pp. 931-936, 2010.7、  
査読有
  6. Mitsuji, K., Motosaka, M., Takahashi,  
Y. and K. Tsukamoto, Comparison of the  
Vibration Characteristics of the  
Low-Rise RC Building Before and After  
Seismic Retrofit, 5th World Conf.  
Structural Control and Monitoring,  
Paper No. 164, 2010.7、査読有

[学会発表] (計 4 件)

1. 三辻和弥ら他 3 名、東北地方太平洋沖地  
震における杭支持層が傾斜した地盤に建  
つ RC 造建物の被害、日本地震工学会年次  
大会、2012 年 11 月 9 日、東京・国立オ  
リンピック記念青少年総合センター
2. 劉志偉、三辻和弥ら他 2 名、2011 年東北  
地方太平洋沖地震で傾斜した建物の被害  
調査 (その 1) 被害の概要、日本建築学  
会大会、2012 年 9 月 12 日、名古屋大学
3. 三辻和弥ら他 3 名、2011 年東北地方太平  
洋沖地震で傾斜した建物の被害調査 (そ  
の 2) 常時微動観測結果、日本建築学会  
大会、2012 年 9 月 12 日、名古屋大学
4. 三辻和弥、源栄正人ら、常時微動観測に  
基づく不整形平面を持つ RC 造建物の耐  
震改修後の振動特性、日本建築学会大会、  
2010 年 9 月 11 日、富山大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三辻 和弥 (MITSUJI KAZUYA)

山形大学・地域教育文化学部・准教授  
研究者番号：90292250