

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 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360263

研究課題名（和文） 高加速度の強震地震動の動特性と建築構造物への入力評価

研究課題名（英文） DYNAMIC RESPONSE PROPERTIES OF EXCEPTIONAL STRONG GROUND MOTIONS
HAVING HIGH PGA AND RESPONSE LOSSES OF BUILDING STRUCTURES

研究代表者

久保 哲夫 (KUBO TETSUO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80111467

研究成果の概要（和文）：最大加速度値の大きな強震地震動の動特性と高加速度の地震動が建築構造物に入力する際の時間差を考慮した場合の時間差に対する応答の変動について、高加速度強震地震動データベースを作成し、数値解析によって弾性・弾塑性の応答の低減効果を定量的に評価した。大きな最大加速度を有する地震動は短周期成分が卓越する傾向を有すること、ならびに建築構造物の応答では入力の時間差を大きく取るほど応答が低減する傾向が認められた。

研究成果の概要（英文）：Herein the study, first we examine the dynamic response properties of the so-named exceptional strong ground motions having high peak ground accelerations (PGAs), using a set of recorded motions, the PGAs of which fall in the range greater than or equal to 0.5 in G. Secondly we evaluate response losses of a building structural system when the time differences of input excitation are included among the multi-supporting foundations of the system. We have reached the conclusive remarks that the so-named exceptional strong ground motions with high PGAs will generally have dominant periods of motion in short period ranges, and that the greater the time differences of input excitation for the system are taken, the lesser the responses of structural system are yielded when compared to those with uniform input excitation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

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、構造工学・地震工学、耐震構造、強震地震動、
高加速度、耐震設計、地震応答、鉄筋コンクリート構造

1. 研究開始当初の背景

1995年1月の阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）以降、鳥取県西部地震（2000年10月）、芸予地震（2001年3月）、十勝沖地震（2003

年9月）、新潟県中越地震（2004年10月）、福岡県西方沖地震（2005年3月）、宮城県沖地震（2005年8月）、新潟県中越沖地震（2007年7月）および2008年6月の岩手・宮城内

陸地震と地震が連なって発生し、我々の生活基盤を構成する建築構造物に損傷・損壊を与えてきていた。

これらの地震では、整備された強震観測網によって多数の地震動記録が採取されており、得られた記録の中には地動加速度の最大値が0.5G（Gは重力加速度）を超える記録が多数認められている。一例として、2008年6月の宮城県北部を発震域とする岩手・宮城内陸地震では震源近傍の一関西観測点に於いて鉛直方向を含めた合成加速度の最大値が4Gに相当する大きさの地震記録が得られた。

その一方、建物を含めた構造物の損壊は、記録が得られた地点の周辺を含め、一つの指標として挙げられる最大加速度（Peak Ground Acceleration: PGA）で表される地震動の強さと構造物の損壊の関係は、十分に説明することができない状況である。

これは、一つには地震の強さの指標値としてとらえられてきた最大加速度値が必ずしも建築構造物の損傷を表現し得る強さの指標ではないこと、関連して大きな加速度値を励起する地動の短周期成分が構造物の損傷にともなう非線形化に大きな影響を及ぼさないこと、ならびに地動が建築構造物に入力する際において、特に波長の短い短周期成分に対して入力損失の効果があることなどが考えられる。

これらの背景を踏まえ、最大加速度値の大きい高加速度の強震地震動の動特性を明らかにするとともに、これらの高加速度強震動が建築構造物の応答に及ぼす影響について、主眼を強震地震動が構造物に入力する際の損失効果とそれに伴う応答低減効果について、その効果を定量的に明らかにすることに動機を据えた。

2. 研究の目的

(1) 1995年兵庫県南部地震を契機として強震地震観測網の整備が進められた2000年以降において我が国で発生した地震において、観測記録の最大加速度値の大きい地震動波形を収集し、高加速度強震動データベースを構築し、今後の大きな加速度を有する地震動が建築物等の構造物の地震時応答を評価する際の基礎資料を作成する。

(2) 高加速度強震動の卓越周期等の地震動波形としての動特性ならびに建築構造物の弾性・弾塑性の応答と地震動波形の”強さ”のパラメータとしての最大加速度、最大速度の値の相関性の検討より定められる動特性を、高加速度強震動データベースを用いて明らかにする。対象とする建築構造物は、固有周期が0.2秒から0.8秒程度の範囲内の短・中周期域の構造物を主体に据える。

(3) 高加速度強震動が建築構造物に入力する場合の構造物の規模、特に平面の形状規模によって想定される入力損失による応答低減の効果を、建築構造物をモデル化した系に入力時間差を設定した地震応答解析により定量的な評価をシミュレーション解析により試みる。

3. 研究の方法

(1) 大きな加速度を有する高加速度強震地震動のデータベースを構築する。

① 収集対象としては、(独)防災科学技術研究所が管理するK-Net、Kik-Netシステムにより採取された国内で得られた地震動観測波形を中心とし、米国、台湾、中国等の国外で得られた地震動波形を含める。対象とする強震動記録は水平成分とし、記録波形の最大加速度値が0.5G（Gは重力加速度）以上の地震動波形を高加速度強震地震動と定義する。

② 高加速度強震地震動データベースに発震機構のデータを割り付ける。発震メカニズムとしては地震調査研究推進本部地震調査委員会より提示されている地震カテゴリーによる分類を行い、海溝のプレート境界地震（カテゴリーⅠ）、海溝のプレート内地震（カテゴリーⅡ）、および陸域の活断層による地殻内地震（カテゴリーⅢ）に分類する。

(2) 高加速度強震地震動データベースを利用し、大きな加速度を有する地震動が建築構造物の弾塑性応答に及ぼす影響を検討する。

① 構造物の弾塑性応答に及ぼす高加速度強震動の動特性パラメータの支配的な要因を検討する。

② 高加速強震地震動が建築構造物に過大な応答を励起するかどうかを検証することを目的とし、弾塑性応答が規定する塑性率を励起する入力地震動の大きさを逆算し、入力に用いた高加速度強震地震動の最大加速度との相関性／相関度を解析する。

(3) 地動が建築構造物に入力する際の短周期成分波形の入力損失を、応答解析によって把握する。構造物が平面的な拡がりを持ち、複数の基礎で地盤に支持される状態をモデル化する。多点支持される構造物に時間差を有した地動入力を与え、入力動の時間差による損失効果より算出される応答低減を求め、高加速度入力時の応答低減効果を評価する。

① 基礎への時間差入力を単純化し、基礎の各支持点に同一の時間差を与えて地動を入力し、構造物を弾性・弾塑性としたモデルの地震応答解析を行い、応答低減を検討する。

② 基礎の各支持点にランダム変数で規定される時間差を与え、地震応答解析により応答低減を評価する。評価は、サンプル数を20ととり、解析モデルに求められる平均と変動

係数により定量的に試みる。

4. 研究成果

(1) 高加速度強震地震動のデータセット

①加速度波形の最大値（以下、PGA と略記）の大きい地震動を対象とする。本論では、PGA が 0.5G（G は重力加速度）以上の地震動を高加速度強震地震動とした。（独）防災科学技術研究所が管理する K-Net、Kik-Net データベースより、1997 年 1 月から 2009 年 8 月迄の期間の観測データより高加速度強震地震動データベースを作成した。なお、各観測記録は 3 成分より構成されるが、本論では、水平地動成分に着目し、水平の 2 成分の加速度波形を取りあげることとした。

構築したデータセットのサンプル数は 140 であった。地震と抽出サンプル数を表 1 にまとめる。表中の地震カテゴリーは、地震の発生タイプを表し、地震調査研究推進本部地震調査委員会による分類により、海溝のプレート境界で生じる地震（プレート境界地震：カテゴリー I）、海溝のプレート内で生じる地震（プレート内地震：カテゴリー II）と内陸の活断層により生じる地震（活断層地震：カテゴリー III）に対応する。

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震時に得られた高加速度強震地震動のサンプル数等について表 2 にまとめる。

②解析対象とする高加速度強震地震動データセットと対照し、高層・免震構造建築物等の時刻歴応答解析によって耐震性能を検証する際に基準地震動的に用いられている米国 El Centro 波形 (1940)、Taft 波形 (1952)、我が国八戸港湾波形 (1968 年十勝沖地震) と東北大学建設棟波形 (1978 年宮城県沖地震) の 4 記録波形の水平成分計 8 波形を既往観測地震動波形セットとして選定した。

表 1 高加速度強震地震動データセットを構成する地震名とサンプル数

地震名	マグニチュード	地震カテゴリー	サンプル数
2000年 10月 鳥取県西部地震	7.3	III	13
2003年 5月 三陸南地震	7	II	27
2003年 9月 十勝沖地震	8	I	12
2004年 10月 新潟県中越地震	6.8	III	20
2007年 3月 能登半島地震	6.9	III	6
2008年 6月 岩手・宮城内陸地震	7.2	III	12
2008年 7月 岩手県沿岸北部の地震	6.8	II	9

表 2 2011 年東北地方太平洋沖地震時の高加速度強震地震動データセットのサンプル数

発生日時	マグニチュード	最大震度	地震カテゴリー	サンプル数
3月11日 14時46分 本震	9	7	I	96
3月11日 15時15分 最大余震	7.7	6弱	I	3
4月7日 余震	7.1	6強	II	26
4月11日 余震	7.1	6強	III	3

(2) 高加速度強震地震動の周波数特性 強震地震動の加速度波形が調和関数により一次近似できるものとし、波形の最大加速度値 (PGA) と最大速度値 (以下、PGV) の 2 量により下式を用いて地震動の卓越周期成分 (T_0) を算定する。

$$T_0 = \frac{2\pi \times PGV}{PGA} \quad (1)$$

図 1 に高加速度強震動データセットの PGA と PGV の相関を、地震カテゴリーをパラメータとして示す。図中の 3 直線は、地震カテゴリー別のデータセットに定められる原点を通る回帰直線である。回帰直線の傾きは、式(1)に示す $T_0/2\pi$ に対応する。図 2 に PGA を独立変数にとり、直接的に式(1)の T_0 を従属変数とした結果を示す。

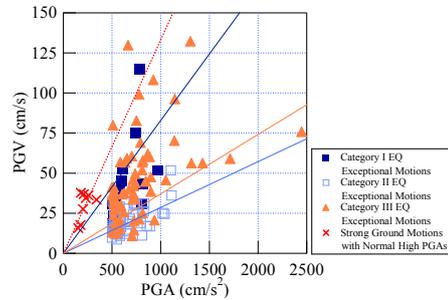


図 1 高加速度強震地震動の最大加速度と最大速度との相関。

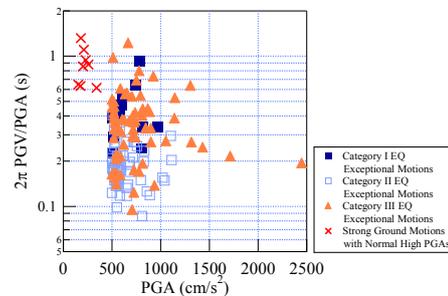


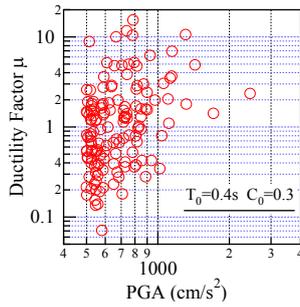
図 2 高加速度強震地震動の最大加速度を変数とする卓越周期。

(3) 高加速度強震地震動による建物の応答

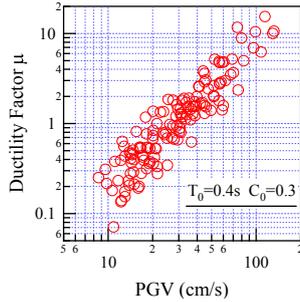
①建物のモデル化 1 自由度の 1 質点振動系にモデル化する。復元力特性は Tri-linear 型とし、履歴特性は鉄筋コンクリート構造の弾塑性履歴を表現するとされている武田モデルを採用する。振動モデルを規定するパラメータのうち、系の降伏強度は単位質量当たり 0.3G の大きさとする。

②建物の応答 中低層の鉄筋コンクリート造建築物を対象とする固有周期を 0.4 秒とした系の応答を図 3 に示す。図 3. (a) は、横軸に入力地震動の最大加速度値 (PGA)、縦軸に系の弾塑性応答を塑性率により表記する。図

3. (b)は、横軸の変数を地動の最大速度値 (PGV) をとり、応答塑性率を表記する。



(a) 入力地動の最大加速度値と応答塑性率.



(b) 入力地動の最大速度値と応答塑性率.

図3 高加速度強震地震動による建築構造物の弾塑性応答：系の周期=0.4秒；系の降伏強度=0.3G.

図3より読み取れる弾塑性応答特性は以下にまとめられる：(a)高加速度強震地震動は、必ずしも建築構造物に大きな弾塑性応答を生じさせない；(b)入力地震動の大きさと系の弾塑性応答の相関を検討すると、PGAと応答の相関は低く、PGVと応答の相関は高い。③設定する塑性率の応答を励起する地震動の大きさ 建築構造物に励起される弾塑性応答を規定し、対象の系に規定の応答を生じさせるに必要な入力地震動の大きさ (PGA') を算定する。この解析は、系に入力する地震動を定め、系の応答を算定する過程の逆過程を行う作業で、建築構造物の応答に及ぼす高加速度強震地震動の“破壊力”を解析することを目的におく。解析パラメータとして、建築構造物系の弾性時固有周期を0.2、0.4と0.8秒、系に規定する応答塑性率を1.0、2.0と4.0を設定する。

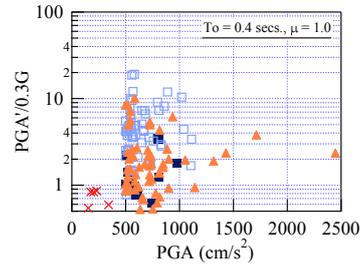
図4.(a)から図4.(c)に、系の固有周期が0.4秒で、設定する応答塑性率を1.0、2.0と4.0とった場合の解析結果を示す。

建築構造物の弾塑性応答はPGAよりPGVとの相関が高いとの結果を得た。図5に、図4に示した結果を入力地動とした高加速度強震地震動のPGVを変数として表記して示す。

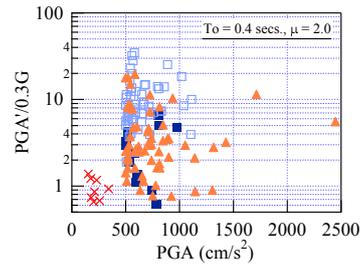
(4) 応答低減の評価 (その1：一様な入力時間差を与える場合)

①建物のモデル化 建物を構成する柱・はり

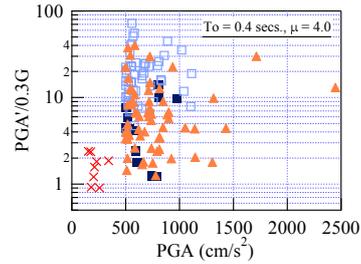
部材の弾塑性特性に基づく部材モデルにより構築される架構を解析対象とする (図6)。スパン数は6、スパン長は8mであり、建物桁行方向の架構長さは48mである。



(a) 系の設定する応答塑性率=1.0の場合.



(b) 系の設定する応答塑性率=2.0の場合.



(c) 系の設定する応答塑性率=4.0の場合.

図4 系に設定した弾塑性応答を励起させるに必要な入力地震動の強さ (地動の最大加速度値と必要入力地動強さ)：系の周期=0.4秒.

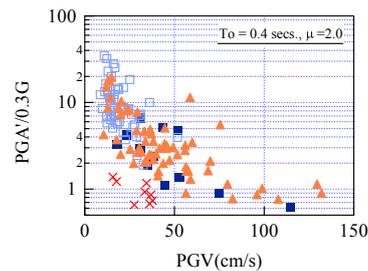


図5 系に設定した弾塑性応答を励起させるに必要な入力地震動の強さ (地動の最大速度値と必要入力地動強さ)：系の周期=0.4秒；系の設定する応答塑性率=2.0の場合.

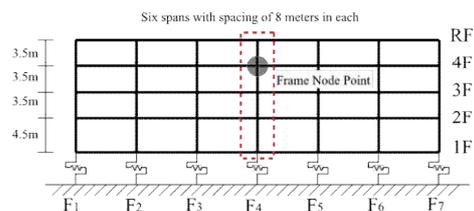


図6 部材モデルに基づく解析架構モデル。

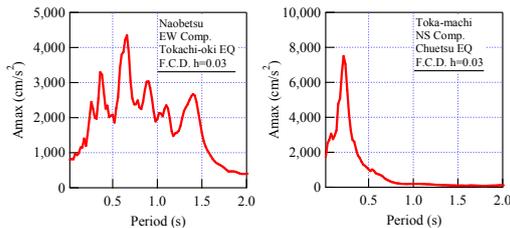
通例の耐震設計過程に従い、各構成部材の断面を決定し、ベースシア係数が0.4となるようにはり部材強度を定め、柱配筋ははり降伏が先行するよう断面設計を行った。

建物への入力地動は F_1 から F_7 の基礎部材下に式(2)に規定される時間差を設けて入力する(基礎 F_1 を入力基準点とする)。

$$a_i(t) = a(t + (i-1)\Delta\tau) \quad (2)$$

ここでの解析では、基礎支持点間の入力時間差 $\Delta\tau$ を0.0秒から0.030秒までの範囲のパラメータとした。時間差 $\Delta\tau$ が0.01秒の場合、8.33Hz周期の地震動成分は架構の両端部で逆位相となって架構に入力する。

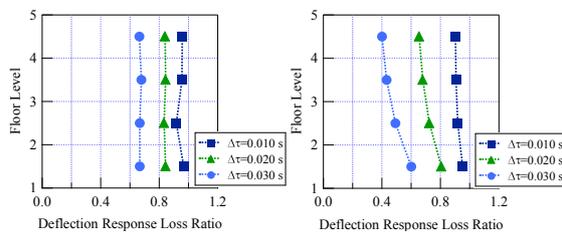
②検討用の高加速度強震地震動 以下の2例の高加速度強震地震動を解析に用いる。
 (a)2003年十勝沖地震(カテゴリーI地震)による直別記録(EW成分: $PGA=795.0\text{cm/s}^2$; $PGV=115.5\text{cm/s}$);
 (b)2004年新潟県中越沖地震(カテゴリーIII地震)による十日町記録(NS成分: $PGA=1727.6\text{cm/s}^2$; $PGV=59.0\text{cm/s}$)。入力地震動波形の応答スペクトル特性を図7に示す。



(a) 直別EW成分。 (b) 十日町NS成分。

図7 高加速度強震地震動のスペクトル特性(加速度応答スペクトル)。

③応答低減の評価 多点の基礎により支持された架構の入力地動に式(2)で規定される時間差を設けた場合、建物架構の応答が変動することが予想される。式(2)中で、 $\Delta\tau$ を0.0とした場合の同位相入力に対する変動比を、層間変形について図8に示す。

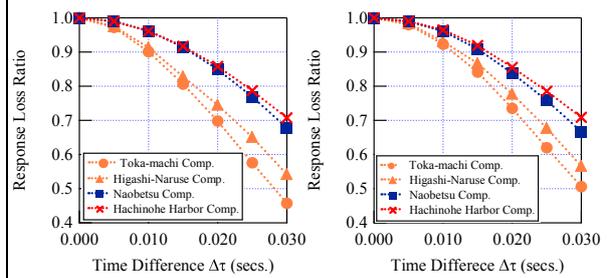


(a) 直別EW成分。 (b) 十日町NS成分。

図8 入力時間差 $\Delta\tau$ をパラメータとした層間変形応答の変動。

解析によって得られた結果を、入力地震動

をパラメータとし、時間差 $\Delta\tau$ を変数として応答変動の解析結果を図9にまとめる。



(a) 加速度応答。 (b) 相対変形応答。

図9 入力時間差をパラメータとした架構の応答の変動。

解析結果より、以下の傾向が認められる：
 (a)多入力点間での入力時間差が大きくなると、加速度・相対変形応答は低減する(同一入力に比して小さくなる)；
 (b)この傾向は、比較的短周期成分が卓越する(カテゴリーIII)の高加速度強震地震動に顕著に認められる。本研究の解析ケースにおいては、最も変動が大きい場合、加速度応答は0.45倍、変位応答は0.5倍に低減した。

(5) 建物の応答低減の評価(その2: 確率変数により入力時間差を与える場合)

①建物のモデル化 解析対象は前項(4)と同一とする(図6)。地動の入力点 F_1 から F_7 に式(3)に規定される時間差を設ける(本解析では、架構中央の基礎 F_4 を基準点とする)。

$$a_i(t) = a(t + \Delta\tau_i) \quad (i=1, 2, \dots, 7) \quad (3)$$

式(3)中、入力時間差 $\Delta\tau$ は確率変数により規定する。本解析では標準偏差 σ が0.033秒(入力時間差が小)、0.10秒(大)となる零平均の正規分布となる確率変数により定める。

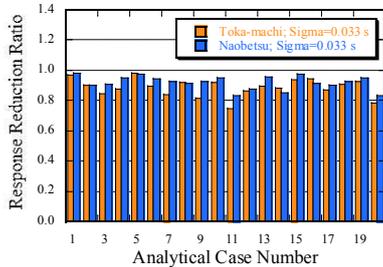
②検討用の高加速度強震地震動 前出の直別EW成分、十日町NS成分の二波形を用いる。

③応答低減の評価 解析ケース毎に20例の応答計算を行い、結果について平均と変動係数により応答変動(低減)を評価する。

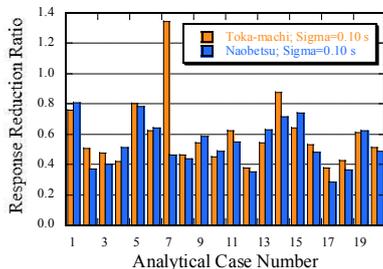
高加速度強震地震動として、カテゴリーI地震による直別EW成分波形(長周期成分が卓越)とカテゴリーIII地震による十日町NS成分波形(短周期成分が卓越)を用い、入力時間差を小さくとしたケース($\sigma=0.033$ 秒)と大きくとしたケース($\sigma=0.10$ 秒)について架構基準点(図6中のFrame Node Point)に算定される変形を評価量にとり応答変動を解析した結果(応答比)を、系を弾性とした場合について図10に、弾塑性とした場合について図11に示す。

応答比の確率量(平均 μ と変動係数 cov)は、以下の値として算定される: 系が弾性で、入力時間差が小さいケースの直別EW成分入力

時=0.92 と 0.048 ; 十日町 NS 成分入力時=0.89 と 0.065 ; 入力時間差が大きいケースの直別入力時=0.54 と 0.27 ; 十日町入力時=0.59 と 0.37 ; 系が弾塑性で、入力時間差が小さいケース(入力地震動は十日町 NS 成分)=0.90 と 0.041 ; 入力時間差が大きいケース=0.83 と 0.12 が得られた。



(a) 時間差の確率変数の標準偏差を 0.033 秒とした場合.



(b) 時間差の確率変数の標準偏差を 0.10 秒とした場合.

図 10 架構代表点変形の応答比 : 系 = 弾性.

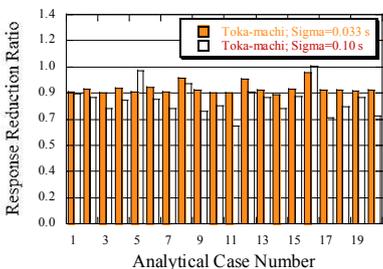


図 11 架構代表点変形の応答比 (時間差入力を $\sigma = 0.033$ 秒と $\sigma = 0.10$ 秒より定めた場合) : 系 = 弾塑性 ; 入力地震動 = 十日町 NS 成分.

(6) 成果のまとめ

本研究で得られた主要な成果は、以下にとりまとめられる：①高加速度強震地震動は陸域の活断層による地殻内地震により生成される事例が多い；②高加速度強震地震動は短周期域に卓越成分を有し、地動の最大速度値は大きな値をとらない；③建築構造物の弾塑性応答は地動の最大速度と高い相関性を有する。地動の最大加速度との相関は低い；④建築構造物の多点支持点間に入力する地動に時間差を与えると、構造物の応答は低減する；⑤入力時間差を大きく設定すると、応答低減効果は大きくなる；⑥構造物に弾塑性応

答状態を設定すると、入力時間差による応答低減効果は小さくなる傾向が認められる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 10 件)

- ① Tetsuo Kubo, Evaluation of Response Loss of Building Structure Due to Phase Difference of Multi-Excitation When Subjected to Exceptional Strong Earthquake Ground Motions, Trans. of The 21st Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Division V, Paper ID#625, 8 pages, New Delhi, India, November 10, 2011.
- ② 森西亨太、久保哲夫、松本悟、高加速度強震地震動の入力時位相差による建築構造物の応答低減に関する研究 (その 1 : 強震地震動の動特性と位相差入力の解析方法)、2011 年度日本建築学会学術講演梗概集、構造 II、pp. 263-264、早稲田大学 (東京都)、2011 年 8 月 23 日.
- ③ 松本悟、久保哲夫、森西亨太、高加速度強震地震動の入力時位相差による建築構造物の応答低減に関する研究 (その 2 : 位相差入力による応答低減の解析結果)、2011 年度日本建築学会学術講演梗概集、構造 II、pp. 265-266、早稲田大学 (東京都)、2011 年 8 月 23 日.
- ④ 松本悟、久保哲夫、高加速度強震地震動の建築構造物の応答に及ぼす動特性に関する考察、第 13 回日本地震工学シンポジウム、8 pages、つくば国際会議場 (茨城県)、2010 年 11 月 19 日.
- ⑤ 松本悟、久保哲夫、最大加速度が大きい強震地震動の建築物の応答へ及ぼす影響、2010 年度日本建築学会学術講演梗概集、構造 II、pp. 955-956、富山大学 (富山県)、2010 年 9 月 9 日.
- ⑥ 松本悟、久保哲夫、大きな最大値を有する強震地震動の構造物への応答に関する基礎的考察、第 7 回日本地震工学学会大会 2009 梗概集、pp. 214-215、国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)、2009 年 11 月 13 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 哲夫 (KUBO TETSUO)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号 : 80111467

(2) 研究分担者

()
 研究者番号 :

(3) 連携研究者

()
 研究者番号 :