

構造物の損傷評価に及ぼす動的相互作用の影響

Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on Damage Evaluations due to Earthquake

木村 至伸*, 河野 健二**, 飯塚 知浩***

Yukinobu KIMURA, Kenji KAWANO, Tomohiro IIDUKA

* 博 (工) 鹿児島大学工学部 海洋土木工学科 助手 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

** 工博 鹿児島大学工学部 海洋土木工学科 教授 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

*** 鹿児島大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

For the reliable design of a structure, it is very important to clarify the dynamic soil-structure interaction effects on the nonlinear response situation due to earthquake. Since the damage of structure may be closely related to the earthquake input energy, it is necessary to carry out the damage assessment by means of the energy evaluation. The dynamic soil-structure interaction effects on the damage evaluations are examined in the present study. The soil-structure interaction is represented with the sway-rocking model and the nonlinear characteristics on the pier are dealt with the bi-linear model. It is suggested that for the damage evaluations of soil-structure interaction system due to seismic motions, it is very important to account for the relations between the dominated frequency of the soil-structure interaction systems and the seismic input motions.

Key Words: dynamic soil-structure interaction, damage evaluations, earthquake input energy

キーワード: 動的相互作用, 損傷評価, 地震入力エネルギー

1. はじめに

激震をもたらす地震動に対して構造物の耐震性を向上させるために構造部材の強度を高めることは、経済性の面から見ても限界があり有効な手段とは言えない。このような場合、構造部材のエネルギー吸収能を高め、構造物全体の崩壊を阻止する性能設計^{1),2),3)}の考えが重要となり、有効な手段と考えられる。また、地震時における構造物全体系の動的挙動は、一般に上部構造物のみならず種々の地盤構成や土の動的性質等の地盤条件とも密接に関係しており、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した耐震設計が不可欠であると考えられる。このような構造物の動的挙動を把握するためには、基礎固定とした上部構造物のみの解析では不十分であり、構造物全体系を上部構造物と基礎-地盤系の動的相互作用を含めた形でモデル化し、地震応答解析を行うことで、その応答特性を明らかにできると考える。

一方、構造物の損傷評価に関しては、地震入力エネルギーに着目した検討が行われており、Housner⁴⁾の研究によって基礎が示された。加藤・秋山ら⁵⁾はHousnerの研究を発展させ、エネルギー入力を地震動の継続時間内に構

造物に加えられる総エネルギー量であることを定義している。西澤・金多ら⁶⁾は、主要動付近の極短時間に大部分のエネルギーが投入され、主要動付近の瞬間的な入力エネルギーと、最大応答速度や最大靱性率応答などの間には良好な相関関係があることを証明した。大井ら⁷⁾は、地震応答中のエネルギー授受のプロセスを把握することが重要であると、地震エネルギー入力スペクトルを提案している。また、これら両者を検討したものとして、井林ら⁸⁾は衝撃的な地震動を表現するため構造物と共振させる周期のエネルギーを算出し、地震入力単位エネルギーとして定義し、総入力エネルギーとの両面から損傷度に関しての検討を加えた。また、Park and Angら⁹⁾の損傷指標の適応性についても検討を加えている。しかしながら、これらの多くは1自由度振動系を用いて検討されており、動的相互作用系に対する損傷評価は検討されていないのが現状である。

そこで本研究では、基礎-地盤系を並進 (Sway) 運動と回転 (Rocking) 運動を考慮したSRモデルを用いた3自由度振動系を用いて構造物の損傷評価に及ぼす影響について検討を行った。ここでは、構造部材のエネルギー収支と構造物全体系のエネルギー収支に着目し、構造物

$$[\tilde{K}(t)]\{\Delta x\} = \{\Delta \tilde{F}\} \quad (3)$$

ここで,

$$[\tilde{K}(t)] = [K(t)] + \left(\frac{4}{\Delta t^2}\right)[M] + \left(\frac{2}{\Delta t}\right)[C] \quad (4)$$

$$\{\Delta \tilde{F}\} = \{\Delta F\} + [\tilde{M}]\left\{\left(\frac{4}{\Delta t^2}\right)\ddot{u} + 2\ddot{u}\right\} + [\tilde{C}](2\dot{u}) \quad (5)$$

これより, それぞれの時間増分に対するの応答量は, 式(3)により求められる. 以上より得られる結果を用いて, 各要素の節点力に關しての評価を行う.

時刻 $t + \Delta t$ における任意の要素の変位応答 $\{u_e + \Delta u_e\}$ より節点変位が $\{\Delta u_e\}$ だけ増分すると, 節点力 $\{R_e\}$ が $\{\Delta R_e\}$ だけ増分する. すなわち,

$$\{R_e + \Delta R_e\} = [K_e(u) + \Delta K_e]\{u_e + \Delta u_e\} \quad (6)$$

となる. ここで, 節点の増分量 $\{\Delta R_e\}$ は

$$\{\Delta R_e\} = [\Delta K_e]\{u_e\} + [K_e(u)]\{\Delta u_e\} + [\Delta K_e]\{\Delta u_e\} \quad (7)$$

のようになる. $\{\Delta R_e\}$ と $\{\Delta u_e\}$ は, それぞれ微小項を表している. ここでは, 1 次の微小項のみに注目し, $[\Delta K_e]\{\Delta u_e\}$ については 2 次の微小項となるため無視する. 式(6)のように表された時刻毎の応答の増分量は修正 Newton Raphson 法を用いて求めている. ここでの上部構造物の重量は 1.0MN, 高さ 10m, 初期減衰定数 5% と設定している.

2.3 エネルギー応答評価の基本式

式 (1) についてエネルギーの釣合式を考える. 両辺に $\{dx\} = \{\dot{x}\}dt$ をかけて時刻 t まで積分すると, 時刻 t までのエネルギーとして次式が得られる.

$$\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [K(t)] \{x\} dt = - \int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{F}\} dt \quad (8)$$

ここで, 左辺の第 1 項は運動エネルギー (E_K), 第 2 項は減衰エネルギー (E_D), 第 3 項はひずみエネルギー (E_H), 右辺は地震入力総エネルギー (E) であり, 各エネルギーは以下のように表せる.

表 - 1 Park の損傷指標と損傷程度との関係⁹⁾

Park の損傷度	損傷の程度
0 ~ 0.1	わずかな損傷 ~ まばらなひび割れ
0.1 ~ 0.2	軽微な損傷 ~ 小さなひび割れ
0.2 ~ 0.4	中程度の損傷 ~ ひび割れ・剥離
0.4 ~ 1.0	大被害 ~ 圧破・鉄筋の座屈
1.0 ~	崩壊 ~ 全体的・部分的崩壊

(i) 運動エネルギー: E_K

$$E_K = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt = \frac{1}{2} \{\dot{x}\}_t^T [M] \{\dot{x}\}_t - \frac{1}{2} \{\dot{x}\}_0^T [M] \{\dot{x}\}_0 \quad (9)$$

(ii) 減衰エネルギー: E_D

$$E_D = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt \quad (10)$$

(iii) ひずみエネルギー: E_H

$$E_H = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [K] \{x\} dt \quad (11)$$

(iv) 地震入力総エネルギー: E

$$E = \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{F\} dt \quad (12)$$

すなわち, 式 (8) は次のように表される.

$$E_K + E_D + E_H = E \quad (13)$$

ここで減衰エネルギーは粘性減衰によるものである. また, ひずみエネルギーについては, 地震動を受ける構造物が弾塑性応答をした場合, 振動終了時には履歴エネルギーが支配的となる.

3. Park and Ang ら⁹⁾ の損傷指標 D

Park and Ang らは, 多くの実験結果を統計的に処理し, 繰返し荷重を受ける RC 構造物の崩壊に関する照査基準として損傷指標 D を用いることを提案した. Park and Ang ら⁹⁾ が提案した損傷指標 D に関しては, 鉄筋コンクリート橋脚について検討されているが, ここでは塑性率と損傷度の関係を明らかにすることを目的としているため, 非線形特性をある程度評価でき, 簡単なモデルであるバイリニア型復元力特性モデルで検討した. この損傷指標 D は, 構造物の塑性率と履歴吸収エネルギーの線形結合として定義されており, 次式によって与えられる.

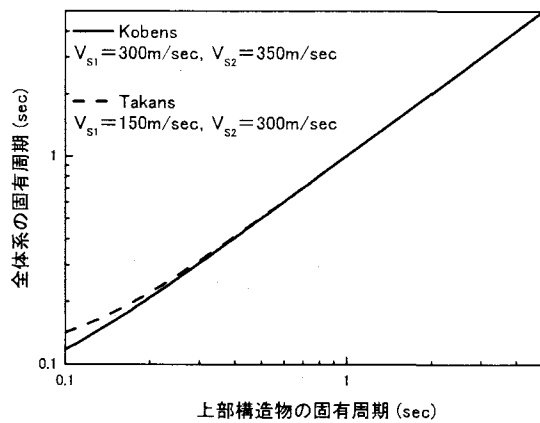


図-3 固有周期に及ぼす動的相互作用の影響

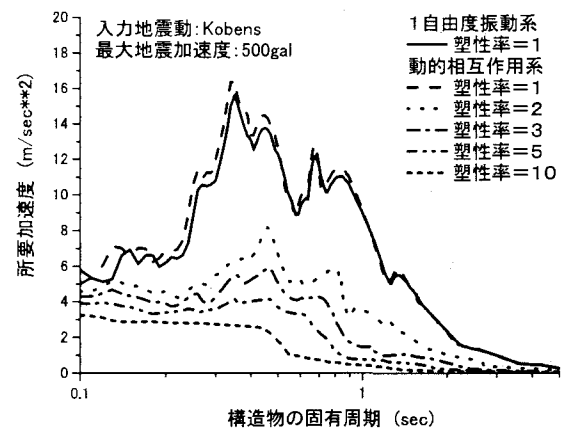


図-4 必要強度スペクトル (Kobens)

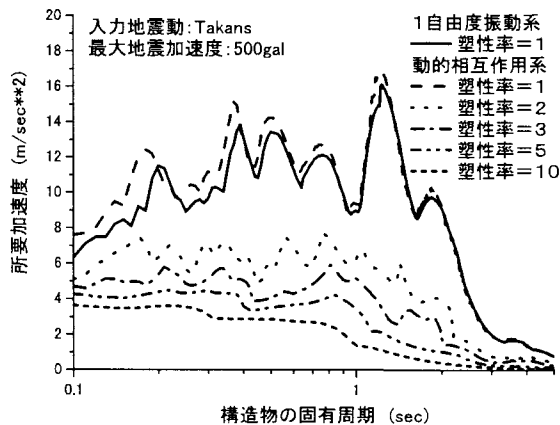


図-5 必要強度スペクトル (Takans)

$$D = \frac{x_{1M}}{x_{1u}} + \frac{\beta}{Q_y x_{1u}} \int dE \quad (14)$$

ここで、 x_{1M} : 最大応答変位、 x_{1u} : 単調載荷時の終局変位、 Q_y : 降伏耐力、 dE : 消費エネルギーの増分、

β : 部材の断面特性等に依存した正の係数であり、本研究においては既往の研究¹⁴⁾を参考にして 0.15 とした。表-1に Park の損傷と損傷程度との関係を示す。

4. 解析結果

この節では、3自由度振動系（以下：動的相互作用系）の必要強度スペクトルから得られる結果を用いて、構造物の損傷に及ぼす動的相互作用の影響について検討を行う。ここでの構造物の変形性能は塑性率を 2, 3, 5, 10 としている。基礎地盤のバネ剛性及び減衰は、弾性波動を対象として算出しているため、地盤の非線形特性は考慮していない。構造物の損傷に関しては、上述したように Park and Ang らの損傷指標 D で検討を行うため、塑性率と地震入力エネルギーが損傷評価に及ぼす影響についても検討を加えた。また、ここでの解析結果は単位質量

に関して示している。

4.1 必要強度スペクトルによる検討

まず、動的相互作用の影響を明確にするために、図-3に上部構造物と構造物全体系の固有周期の関係について示す。この図より、上部構造物の短周期側においては、動的相互作用を考慮することにより、構造物全体系の固有周期が長周期化していることが分かる。また、上部構造物の固有周期が長くなるにつれ、構造物全体系の固有周期は上部構造物の固有周期に依存していることが分かる。これらの相違は、軟弱地盤として検討した Takans の場合が顕著である。これらのことから、動的相互作用の影響を受ける固有周期域に関して、構造物の損傷評価を検討しておくことは非常に重要であると考えられる。

次に、動的相互作用系の必要強度スペクトルについて検討を行う。図-4及び図-5に、入力地震波として Kobens と Takans を入力した場合の必要強度スペクトルをそれぞれ示す。図中には、1自由度振動系において構造物の地震時挙動が線形状態とした塑性率が1の場合についても示している。1自由度振動系と動的相互作用系の塑性率が1の場合について比較を行うと、Kobens を入力した場合には、構造物の短周期側において、両者の応答に僅かではあるが相違が認められ、応答のピークが短周期側に移動していることが分かる。これは、基礎-地盤系を考慮することで、構造物全体系の固有周期が長周期化したことが要因として考えられる。一方、Takans を入力した場合においても、短周期側において応答に差が認められ、その差は Kobens を入力した場合よりも顕著である。これは、Takans の場合には、基礎周辺地盤が Kobens よりも軟弱であるため、動的相互作用の影響が明確に現れたと考えられる。また、構造物の固有周期が長くなるにつれ、動的相互作用の影響が認められなくなることが分かる。

次に、動的相互作用系における必要強度スペクトルに

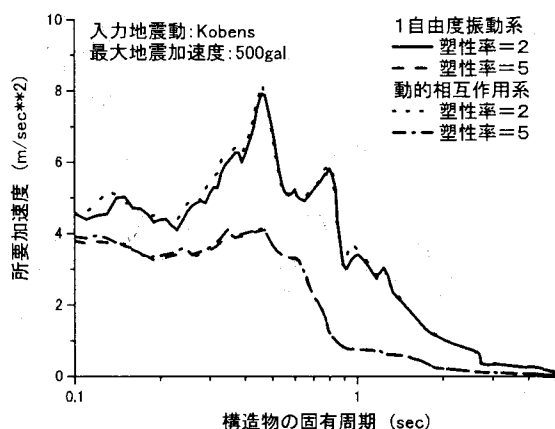


図 - 6 動的相互作用の影響 (Kobens)

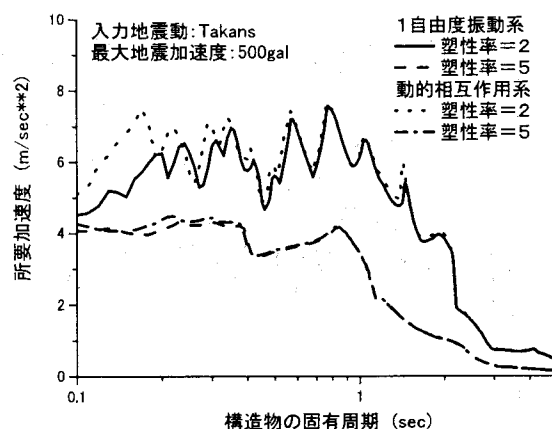


図 - 7 動的相互作用の影響 (Takans)

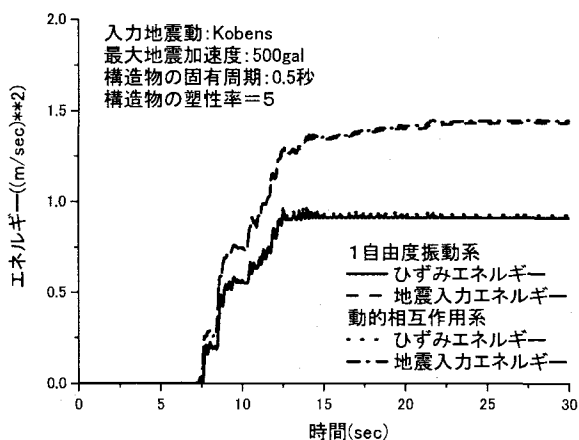


図 - 8 時刻歴エネルギー收支 (Kobens)

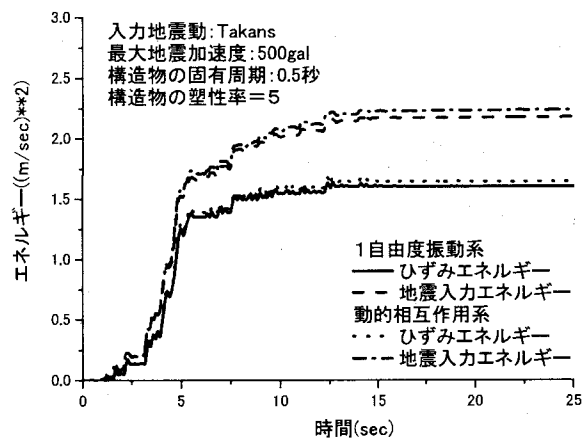


図 - 9 時刻歴エネルギー收支 (Takans)

について検討を行う。動的相互作用系においても構造物の変形性能、つまり、塑性率の増加に伴って、構造物の必要強度がかなり低減されることが分かる。つまり、高い塑性率を有する構造物に関しては、構造物が崩壊しない範囲内で構造物の降伏強度をある程度低減することが可能であることが分かる。必要強度スペクトルに及ぼす動的相互作用の影響を明確にするために、図 - 6 及び図 - 7 に、Kobens と Takans の入力地震動に対して構造物の塑性率を 2, 5 とした場合についてそれぞれ示す。これらの図は、1 自由度振動系との比較である。Kobens を用いた場合には、塑性率を 2, 5 とした場合において両モデルによる相違は認められない。このため、第 1 種地盤の地盤条件においては、構造物の非線形特性に依存することが分かる。一方、Takans を用いた場合には、塑性率が 2 の場合の短周期側において、動的相互作用の影響が認められ、両者の応答に差が生じていることが分かる。また、塑性率を 5 とした場合では両モデルによる相違は認められない。このため、軟弱な地盤条件においては、構造物の短周期側において動的相互作用の影響を考慮する必要があることが分かる。しかしながら、構造物の変形性能を高くすると、動的相互作用の影響は小さくなり構造物の非線形特性に依存することが分かる。これは、上部構

造物の非線形性を評価することで、構造物全体系の固有周期がさらに長周期化し、動的相互作用の影響がより小さくなることが要因として考えられる。

4.2 エネルギー收支による検討

次に、エネルギー收支に着目した検討を行う。図 - 8 及び図 - 9 は、構造物の固有周期を 0.5 秒、塑性率を 5 とした場合の時刻歴エネルギー收支を、Kobens と Takans についてそれぞれ示したものである。Kobens については、ひずみエネルギーと地震入力エネルギーの両方とも、ほぼ同様の値を示していることが分かる。Takans を用いた場合には、若干の相違が認められるが、全体として同様の評価を示していると言える。これは、構造物の変形性能を規定しているため、構造物が吸収し得るエネルギー量が変化しないことと、構造物の固有周期 0.5 秒付近では、動的相互作用の影響は小さいため、エネルギー收支による評価においても相違が認められなかったと考えられる。

図 - 10 及び図 - 11 は、1 自由度振動系及び動的相互作用系について構造物の塑性率を 2, 5 とした場合のエネルギー比率を Kobens と Takans についてそれぞれ示したものである。これらの図より、構造物の短周期側において動的相互作用の影響により、エネルギーの比率が小さ

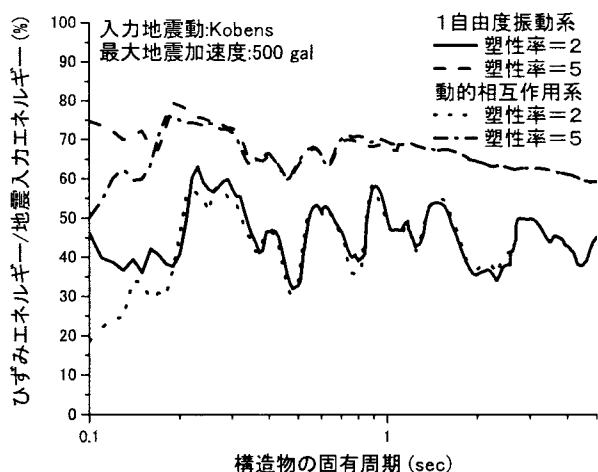


図 - 10 塑性率=2,5についてのエネルギー比率 (Kobens)

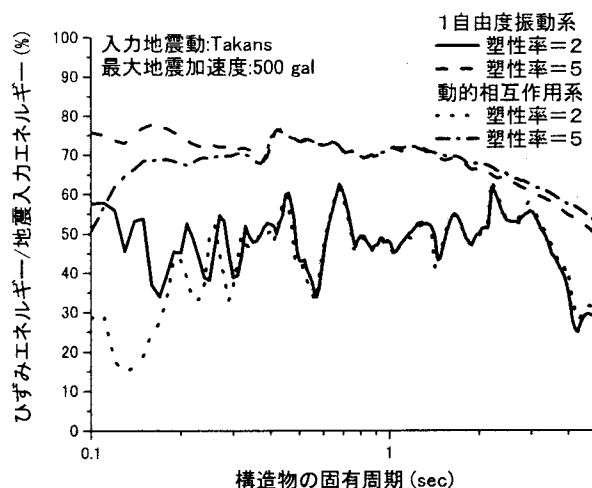


図 - 11 塑性率=2,5についてのエネルギー比率 (Takans)

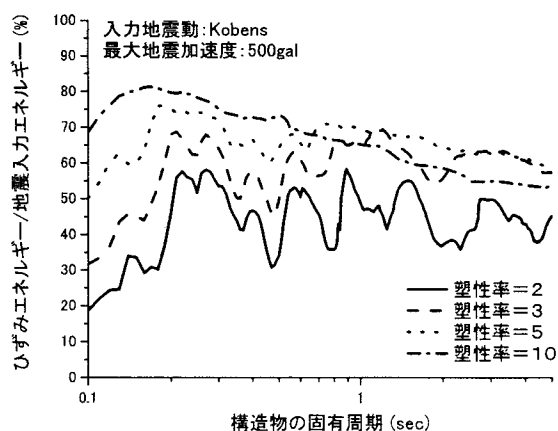


図 - 12 エネルギー比率 (Kobens)

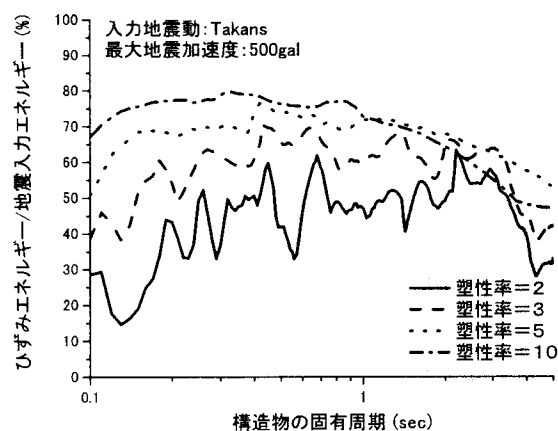


図 - 13 エネルギー比率 (Takans)

く現れていることが分かる。Kobens を用いた場合には、構造物の固有周期が 0.2 秒付近までエネルギー比率に差が生じており、塑性率が 2 の場合には 1 自由度振動系に対して約 50% 程度、塑性率が 5 の場合には約 70% 程度であり、動的相互作用の影響が現れていることが分かる。一方、Takans を用いた場合には、軟弱な地盤条件であるため、動的相互作用の影響が顕著に現れており、構造物の固有周期が 0.4 秒付近までエネルギー比率に差が生じている。これは、動的相互作用を考慮することにより構造物の応答が異なり、地震入力エネルギーの評価が異なることが要因として考えられる。このため、構造物の損傷評価を行う際には、構造物の固有周期と基礎 - 地盤系が及ぼす動的相互作用の影響を明確にしておく必要がある。

次に、地震入力エネルギーに対するひずみエネルギーの割合を各固有周期について検討する。図 - 12 及び図 - 13 は、動的相互作用系に対するエネルギー比率を Kobens と Takans についてそれぞれ示したものである。この結果より、塑性率が 2 の場合には、多少のばらつきはあるものの Kobens では約 40% 付近、Takans では約 50% 程度の割

合を示していることが分かる。しかしながら、どちらの入力地震動に関しても、短周期領域においては約 20% と非常に小さい割合であることが分かる。また、塑性率の増加に伴い、固有周期による相違が減少する傾向が認められる。どちらの入力地震動についても、塑性率が 10 の場合には、固有周期が 0.1 秒での割合は約 70% であるのに対し、5.0 秒付近での割合は約 50% と全エネルギーに対する比は減少傾向にある。以上のことから、動的相互作用を考慮した場合、地震入力総エネルギーに対するひずみエネルギーの割合は、塑性率の増加に伴って固有周期ごとの変動は減少する傾向があるが、固有周期に大きく依存した割合を示していることが分かる。

4.3 損傷指標Dによる検討

次に Park らの損傷指標による検討を行う。図 - 14 及び図 - 15 は、1 自由度振動系及び動的相互作用系について構造物の塑性率を 2, 5 とした場合の損傷指標 D を Kobens と Takans についてそれぞれ示したものである。Kobens を用いた場合の損傷評価については、塑性率が 2 の場合にはほぼ同様の評価を、塑性率が 5 の場合の損傷評価は、構造

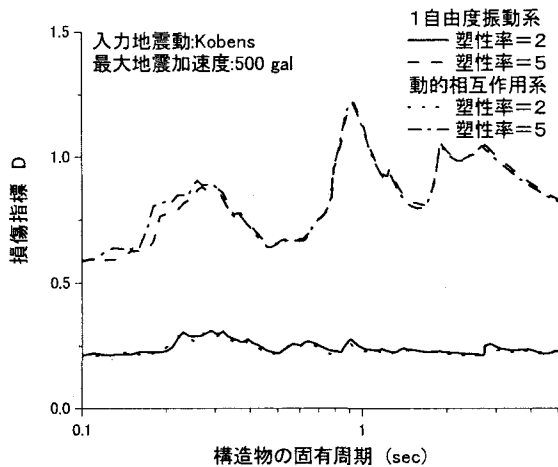


図 - 14 損傷指標 D の比較 (Kobens)

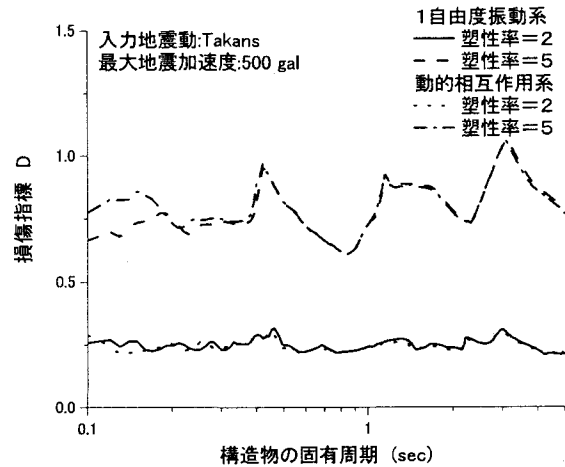


図 - 15 損傷指標 D の比較 (Takans)

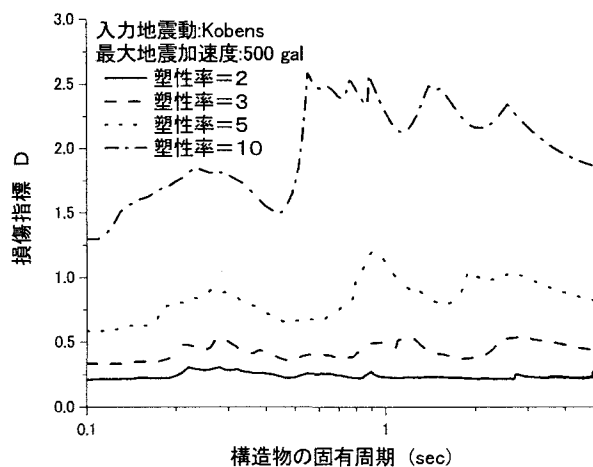


図 - 16 損傷指標 D (Kobens)

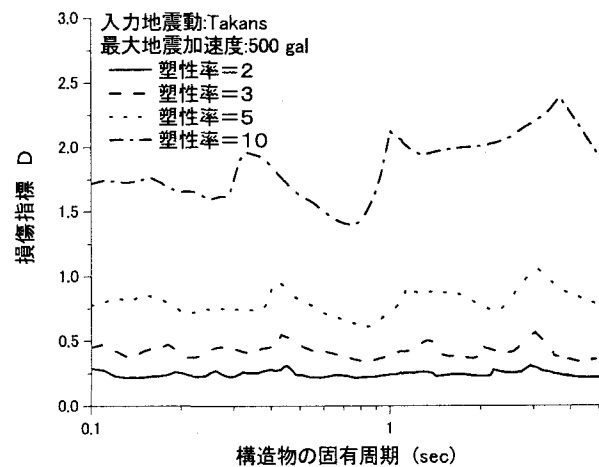


図 - 17 損傷指標 D (Takans)

物の短周期側において若干の相違が認められるが、動的相互作用系の損傷評価Dが厳しい評価を与えていることが分かる。また、Takansを用いた場合においても同様の傾向が認められる。これは、基礎-地盤系を考慮することで、構造物全体系の固有周期が長周期化し、構造物が損傷を受ける固有周期領域が移動したことが要因として考えられる。また、この損傷評価については、Parkらの損傷指標は第1項目の構造物の変形性能と第2項目の吸収エネルギーの線形結合として定義されていることによる影響が考えられる。第1項について、構造物の変形性能を塑性率として定義しているため変化しないが、第2項目の終局変位が大きく関与し、この影響は構造物の変形性能が大きくなるにつれ明確になると考えられる。よって、構造物の損傷評価においてはこれらの影響を明確にする必要があり、今後の検討課題である。

図 - 16及び図 - 17は、KobensとTakansに関する損傷指標Dを全固有周期に対してそれぞれ示している。2つの地震波による評価では、塑性率が2から5の範囲において固有周期によらず塑性率に対して一定の値を示す傾向が認められる。表 - 1に示したParkの損傷指標に照らし合

わせてみると、塑性率が2及び3に関しては中程度の損傷、塑性率が5に関しては大損傷から崩壊と評価され、塑性率が10の場合に関しては、全ての固有周期領域において崩壊として評価されていることが分かる。つまり、これらの地震波に対しての構造物の変形性能限界値は塑性率が5程度であることが分かる。また、塑性率の増加に伴い固有周期による相違が認められることから、構造部材の履歴吸収エネルギーの影響が反映されていることが分かる。

5. まとめ

本研究では、SRモデルで表した3自由度振動系を用いて、構造物の損傷評価に及ぼす動的相互作用の影響について検討した。ここでは、振動特性の異なる2つの地震動に対して、構造部材のエネルギー収支と構造物全体系のエネルギー収支に着目し、構造物の変形性能と損傷評価との関係を1自由度振動系と比較して検討を加えた。本研究から得られた解析結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 地盤-構造物系の動的相互作用を考慮した場合の必要強度スペクトルと、それを考慮しない場合について比較すると、動的相互作用の影響を受ける固有周期に対しては、その影響が表れる。これは、動的相互作用を考慮することによって構造物全体系の固有周期が長周期化することが要因として考えられる。このため動的相互作用を受ける場合は、必要強度スペクトルの評価について、その影響を考慮する必要があると思われる。
- (2) エネルギー収支においては、動的相互作用の影響が小さい場合には、構造物の変形性能を規定しているため、構造物の吸収し得るエネルギー量は変化せず、同程度の評価を示すことが分かる。しかしながら、動的相互作用の影響が顕著な領域においては、地震入力エネルギーに対する比率は異なるため、動的相互作用系における構造物の損傷評価においては、構造物全体系に対するひずみエネルギーの比率を明確にする必要がある。
- (3) 損傷評価を行うと、構造物の変形性能が小さい場合には、塑性率に関して一定の値を、構造物の変形性能が大きい場合には、構造物の固有周期による相違が認められるようになる。このため、Park らの損傷指標 D は、 $D < 1$ の領域において構造物の固有周期に依らず、塑性率に関してほぼ同程度の値を示していることが分かる。
- (4) 動的相互作用系における構造物の損傷評価においては、入力地震動の振動特性と地盤条件が大きく関与することが分かる。特に、損傷評価に関して、構造物の短周期側において 1 自由度振動系よりも厳しい評価を与える場合があるので、これらの影響を把握しておく必要がある。

本研究から得られた解析結果は、限られた入力地震波に対して求めたものであるため、様々な入力特性を有する地震動に対して検討が必要である。また、式 (14) で用いた係数 β 、構造物の終局変位の設定、地盤の非線形特性の影響は、構造物の損傷評価に密接に関係する重要な指標である。よって、本研究で提案している損傷評価をより有用なものにするためには、これらに対する検討は必要不可欠であり、今後の検討課題と考えている。

参考文献

- 1) H.Iemura et al : Ductility strength demand for near field earthquake ground motion, Structural safety and Probability, pp.1705-1708, 1998
- 2) 土岐憲三, 清野純史, 石崎浩, 小野祐輔 : 「地盤と構造物の相互作用を考慮した必要強度スペクトル」, 第 10 回日本地震工学シンポジウム 論文集 第 2 分冊 pp.1861~1866, 1998
- 3) 土岐憲三, 清野純史, 小野祐輔 : 「地盤-構造物系の相互作用を考慮した必要強度スペクトルに関する研究」, 第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 1 部(B), pp.824~825, 1999
- 4) Housner, G.W. : Behavior of Structures During Earthquakes, ASCE, EM4, pp.109-129, Oct.1959
- 5) 加藤勉, 秋山宏 : 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 建築学会論文報告集, 第 235 号, pp9-18, 昭和 50 年 9 月
- 6) 西澤英和, 金多潔 : 1 自由度振動系のエネルギー応答について (第 1 報) 鉄骨造及び鉄筋コンクリート造架構モデルのオンライン実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 424 号, pp117-124, 1991 年 6 月
- 7) 大井謙一, 高梨晃一, 本間靖章 : 地震動のエネルギー入力率スペクトル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 420 号, pp1-7, 1991 年 2 月
- 8) 井林康, 中沢正利, 尾坂芳夫, 鈴木基行 : 地震入力総エネルギー及び地震入力単位エネルギーを考慮した RC 橋脚の損傷度評価法の提案, 土木学会論文集, No.676/V-51, pp.1-11, 2001.5
- 9) Park, Y.-J., and Ang, A.H.-S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.4, pp.722-739, April 1985
- 10) 佐藤忠信 : 講座「地盤と構造物の動的相互作用の解析法」, 土と基礎, 土質工学会, pp.63~70, 1992
- 11) 山下典彦, 土岐憲三, 佐藤忠信 : 「群杭基礎-地盤-構造物系の動的相互作用における SR モデルの構築」, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集 pp.645~648, 1997
- 12) H.Takemiya : Simplified Model for Building foundation Interaction, Jour. Engg. Mech. Div., ASCE, Vol.103, pp.345-351, 1997
- 13) A.S.Veletsos and B.Verbic : Viscoelastic Foundations, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.2, pp.87-102, 1973
- 14) Y.Yamada et al : Random Response Analysis of A Nonlinear Soil-Suspension Bridge Pier, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.7, pp.31-47, 1979

(2005 年 4 月 15 日受付)