

復元力特性の人為的非線型化による動的応答制御

塚 越 勇*, 鶴 飼 吉 弘*, 共同研究者*

Control of Dynamic Responses of Structures under Earthquake Motions by Artificially Non-Linearized Restoring Force Characteristics

Isamu TSUKAGOSHI*, Yoshihiro UKAI*
and collaborators*

(Received September 18, 1976)

This is a report of computer analysis of dynamic responses of structures under earthquake motions. One of the most important elements to control the volume of dynamic responses is restoring force characteristics of structures. Artificially non-linearized restoring force characteristics are given to structures and the volume of dynamic responses is controlled specially in amplitude.

§1. 序 論

建物の耐震設計に関する研究には最近著しい発展があり、設計に必要な動的応答解析も実用化されている。しかし、これら一連の研究成果から考察しても、実際に建造される建物は、その設計に多くの問題点を保留している。

本論は、建物の耐震性の研究における重要課題を明確にし、建物の耐震性を高める上で可能な方法を追求せんとするものである。

まず、上記重要課題には、

- ①地震動の特性（震源距離、規模、地盤等）
- ②構造物の特性（復元力、疲労特性等）
- ③応答と結果の判定、並びにその判定規準

等がある。

①については、一般的には過去に記録された地震動が採用されている。そして、これらの地震動のうちどれを選択するかは設計者の慎重な検討にまっところである。しかし、設計者が適当であろうと推定する地震動にも問題が残ることは、さけられぬところであろう。

そこには、外力として何を採用すべきかという、極めて困難な課題が存在する、この方面の研究は、確率、統計的手法等によっても進められているが、外力採用上の問題解決に示唆する処多いと思う。

②において特に復元力に限定し、1例を骨組架構にとると、復元力は、架構形態とその構成部材の断面性能、材料の物理的特性により決定される。そして現在において復元力特性は、必然的非線型復元力特性、すなわち、弾塑性復元力として取り扱われるのが主流となっている。耐震設計においては、その弾塑性復元力特性を、試行錯誤的方法により変化させて、応答量を設計者が耐震設計上妥当とする方向へと収束させている。

しかし、この復元力によると、一般的傾向として、加速度応答量と変位応答量とが両立して、設計者の妥当とする値に収束しない場合が多々あるようである。また耐力を主眼とした設計であるため、変形の大きさは無視されがちである。

§2. 本研究の目的

本論は、序論に掲げた重要課題における②についての提案と、これに必然的に関係する①についての研究であ

*建築学科 (Department of Architecture)

る。

②について提案する課題は、“変位制御と復元力”である。このために人為的非線型化機構を導入する。この機構を具体的に表現すれば、“構造物の小さな変形に対しては作動しないが、大きな変形に対しては、変形を小さくする効果を有する機構”となる。

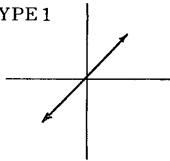
①についてみると、一般に地震動は複雑な周期成分を含んでいるが、この周期成分のうち、建物の挙動に關

るものは比較的単純なものであろうと思われる。そこで地震動を建物の応答との対応関係において整理することを提案し、本論においてその一部を示す。

§3. モデル化, 力学特性, 外力と応答計算

以下に述べる本論では、構造物を、第1段階として最も簡単な振動系である1質点系にモデル化し、復元力にかかわる構造物の挙動を、より明確にする試みを展開したが、これによって構造物の力学特性と挙動の本質が失

TYPE 1

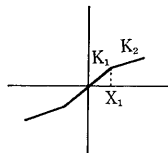
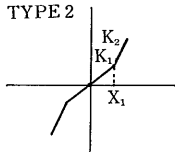


X_i ($i=1, 2, 3$) 剛性の変化する点までの距離 (CM)

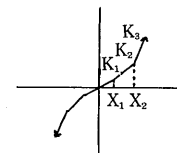
$K_2 = R_1 K_1$ $K_3 = R_2 K_1$ R_i ~ 剛性比

TYPE-4において $X_1 \sim X_2$ 間 $K = \frac{K_2 - K_1}{X_2 - X_1}(x - X_1)$

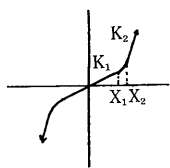
TYPE 2



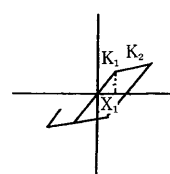
TYPE 3



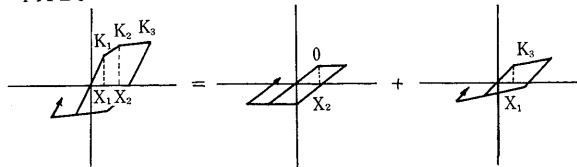
TYPE 4



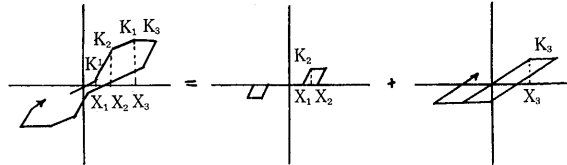
TYPE 5



TYPE 6



TYPE 7



なわれることはないと思う。

応答解析は、ルンゲ・クッタ法及び線型加速度法を併用し、電子計算機を用いて行なった。この応答解析における刻み時間は、仮定した復元力による振動系の最小固有周期の $1/50$ 以下にした。外力として採用した地震動の加速度波は次の5つである。①エル・セントロ、②タフト、③東京、④明石、⑤仙台、これらの加速度波は、最大加速度を 300gal に統一してある。(復元力特性による応答を比較するために、充分大きな応答が与えられれば

良いとして 300gal を決めた。)また数値化におけるサンプリングは $1/100$ 秒刻みであるが、中間値が必要な場合は直線補間して使用した。

仮定した復元力は図-1に示す通りである。減衰定数は無次元化されたもので速度に比例するものとし、 $h = 0.05$ で一定とした。これは実際の骨組架構の持つ減衰定数とはほぼ同程度であろう。(Type-1～線型, Type-2.3.4～Hard-Spring, Type-5.6～弾塑性, Type-7

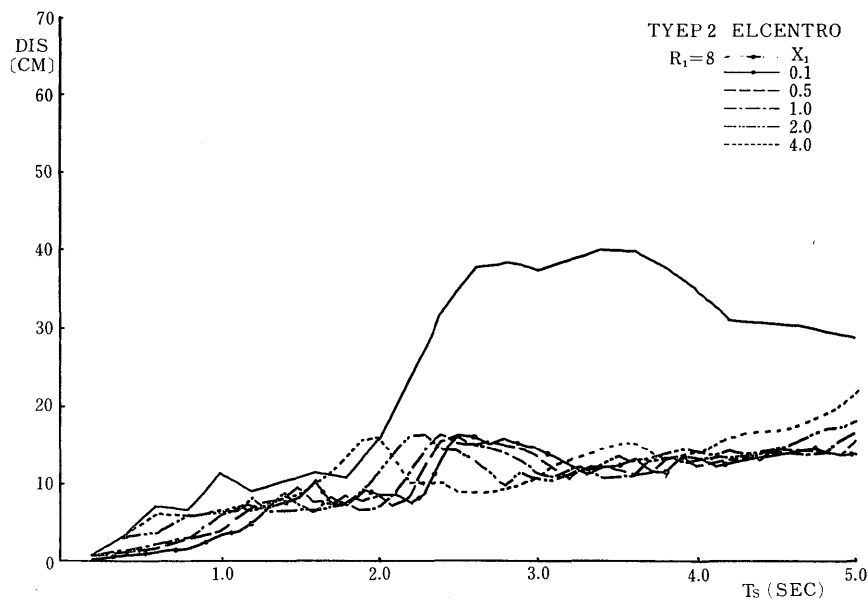


図 - 2

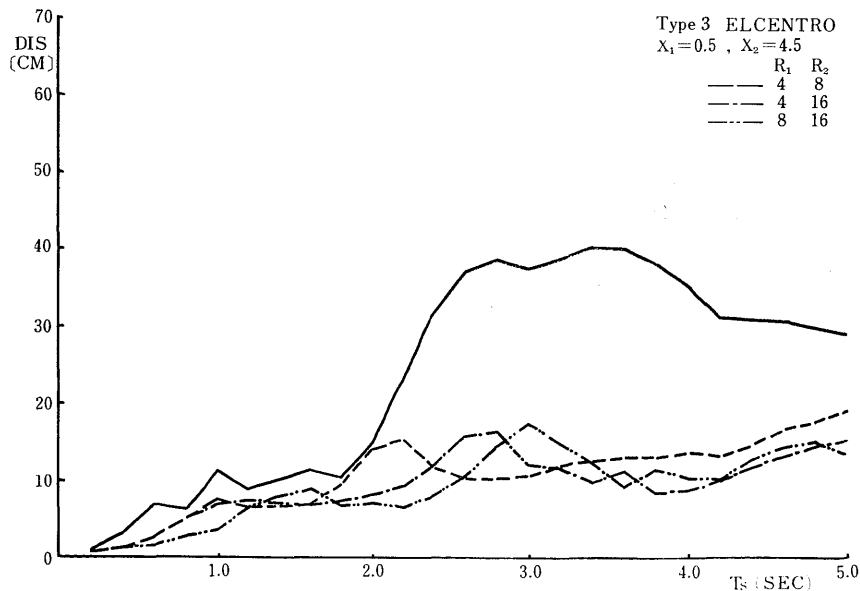


図 - 3

Hard-Spring+
Soft-Spring

§ 4. 解析結果

4-1 応答スペクトル

外力を既知とした場合、振動系（構造物）の良否を決定する要素の一つに応答の最大値がある。Housner が提唱した平均応答スペクトルなる概念は、多くの研究者からの批判のあるところであるが、振動系の応答特性の一面を簡単に表現する方法であろう。

本論においても、この概念に基づき復元力と外力との組合わせを、図-1 に示したごとく構成し、その結果を図-2 から図-5 までに示す。図中横軸は、建物の1次剛性により決る固有周期で0.2 sec ごとに示してある。

4-2 パワースペクトル密度

応答の周波数特性を示す一つの方法として、パワースペクトル密度がある。これは外力と振動系の周波数特性との相互作用において決る量であるが、振動系の挙動の概要を把握するために算出し図-6 に示す。（図-6-

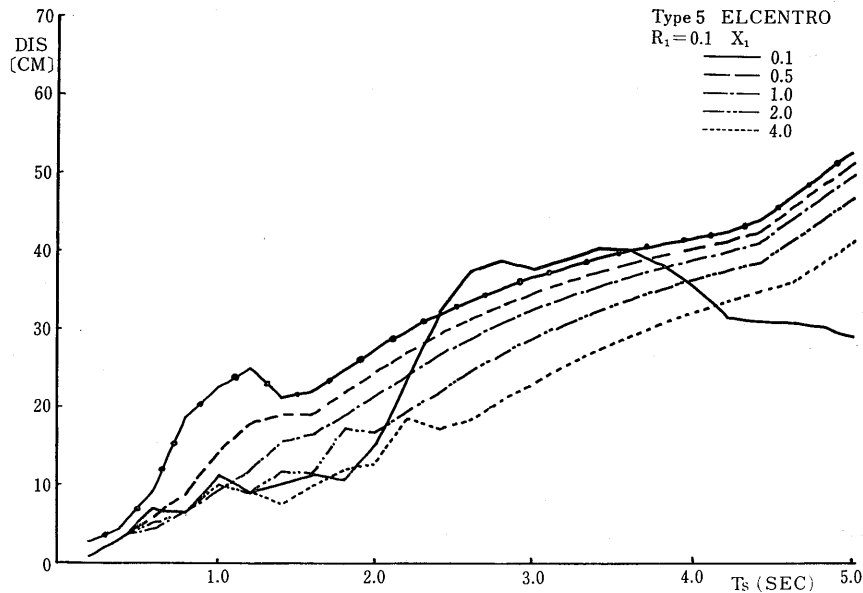


図 - 4

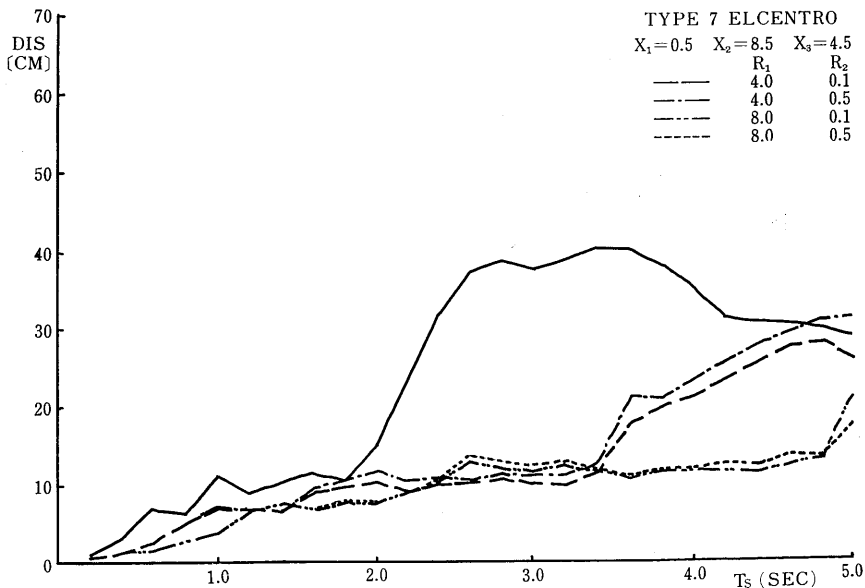


図 - 5

1は変位応答曲線、図一6-2は外力のパワースペクトル密度、図一6-3は変位応答曲線のパワースペクトル密度)

算出したパワースペクトル密度は、解析時間を T 、変位応答の最大値が与えられる時刻を T_1 とし、図は、時刻 T_0 から T_1 、 T_1 から T と T_0 から T までに分けて示してある。図中横軸は周期である。

4-3 入力エネルギー

エネルギー則によれば、構造物に外力が作用した場合構造物の累加塑性歪エネルギーと構造物が崩壊に至るまでに蓄えうる塑性歪エネルギーとの比較において、崩壊しないための条件が決定される可能性があるため、入力エネルギーの量を知る事は、基本的に重要なことである。ここにおいては、最大応答変位が与えられるまでの入力エネルギー E_1 と、それ以後のそれ E_2 とを時間密度 $E_1/(T_1-T_0)$ 、 $E_2/(T-T_1)$ で示すことにした。図一7はEL CENTRO NSによる入力エネルギーを示すもので、 T_s とあるのは線型、又は1次剛性による復元力の振動系の固有周期である。

4-4 減衰定数

動的応答量には、振動系が保持する減衰定数により大きな変動がある。本論においては、想定した復元力によって系が如何なる挙動を示すかを、減衰定数との対応に

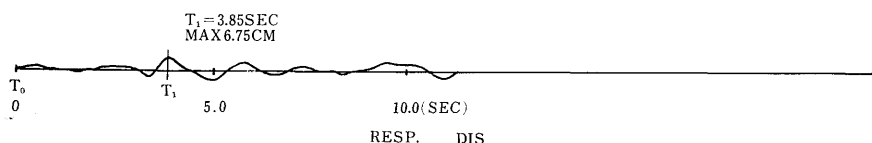
於て示すこととした。すなわち、周期2秒なる正弦波形とした加速度を2波だけ作用させた後、自由振動させたときの変位応答特性を求めた。図一9はHard-Springによる振動曲線である。

§5. 解析結果の考察

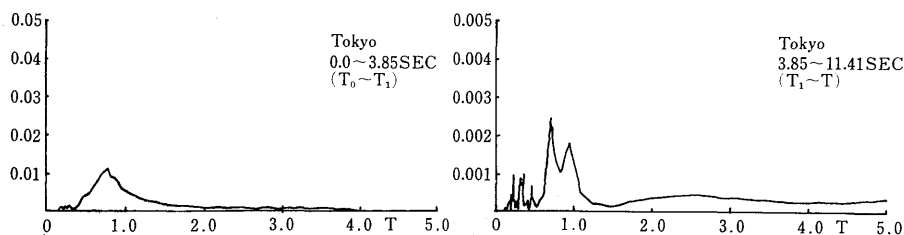
5-1 応答スペクトル

以後全て(Type-1)を基準として考察するが、地震波の周波数特性により多少の変動がみられる。線型復元力を有する1質点系で代表される構造物の平均応答変位スペクトルは、短周期の構造物においては小さく、長周期のものでは大きく、平均応答加速度スペクトルはこの逆である。平均速度応答スペクトルにおいては、周期にかかわらずほぼ一定とされている。

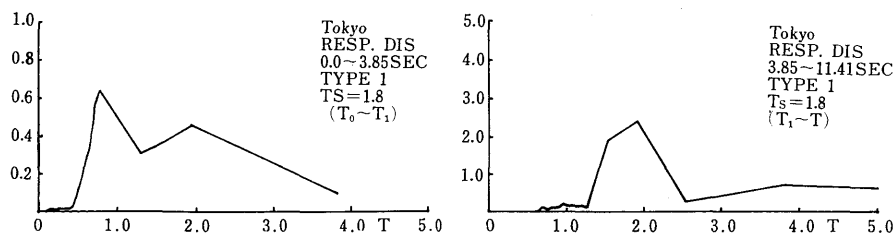
現行の耐震設計法において、この特性は大きな問題点を提示している。すなわち、高層建物は必然的に1次固有周期が長くなる。これを平均応答スペクトルからみれば、加速度応答は小さく、総せん断力係数も小さくなるが、建物の変位は大きくなる。また低層建物においては、必然的に剛性が高まるので、固有周期は短くなり、変位応答は小さいが加速度応答は大きく、現行の設計震度 $h=0.2$ をはるかに越えることになり、とても経済的設計手法では取扱い難い。この設計上の問題に対処するために、構造物を構成する材料のじん性を前提として、



図一6-1



図一6-2



図一6-3

部材に多少の塑性化を許容することによる塑性吸収エネルギーに期待して、弾塑性復元力特性の適用を想定するに到った。これが前述した構造物力学特性の必然的非線型化である。しかし、応答スペクトル（図－4）に明示してあるごとく、いぜんとして、問題の根本的解決法とはなり難い。

そこで我々は、更に人為的非線型化による復元力を提案する。この概念は、構造物の剛性を附加部材により調整することが出来るとする論理的推定によって導かれたものである。すなわち、剛性を変位の関数として表現し、変位が小さい間は低い剛性をもち、大変形になると高剛性を発揮する機構である。いわゆる **Hard-Spring** である。その利点は、固有周期も変位の関数となるので、共振的な現象から逃れ易いことであろう。

Hard-Spring の効果は図－2, 3 に示されている。

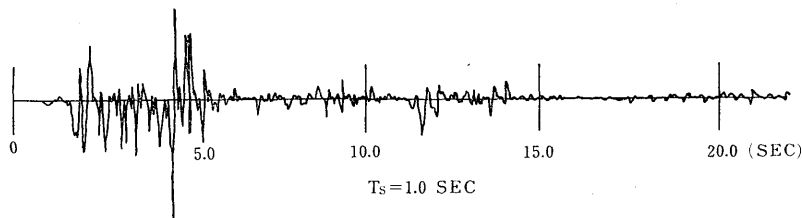
5-2 パワースペクトル密度

非定常外力に対する動的応答においては、振動系の挙

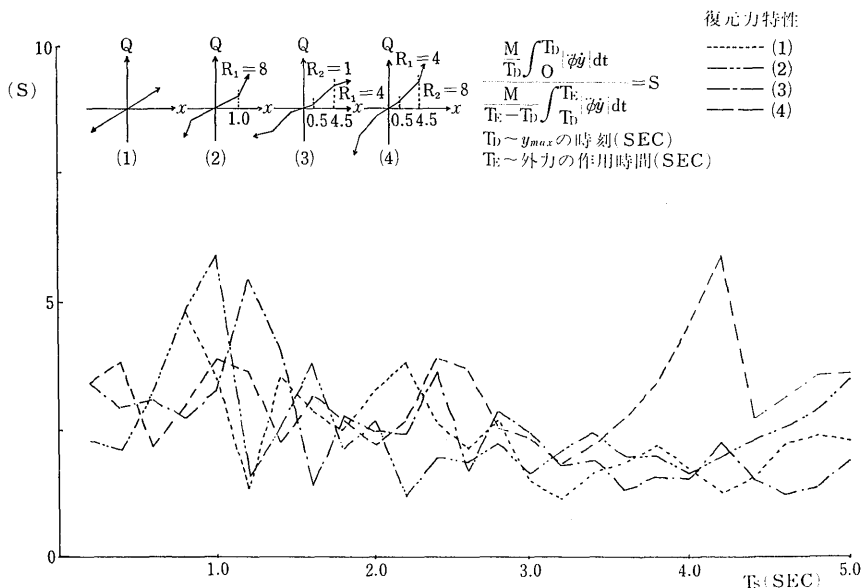
動に選択共振なる現象が存在すると言われている。これは、振動系が自己の固有周期に近い周期の外力を選択し、あたかもこれに同調し共振するような現象と説明されている。しかし、我々の解析結果を見ると現象の中には上述の説明が必ずしも合理的であるとは言い難いものがある。すなわち、外力のパワースペクトル密度において卓越した周期成分が存在し、この成分が振動系の周期に近いならば、振動系はその卓越した周期成分に近い周期振動をし、振動系の固有周期に近い周期成分が無いなら自己の周期で振動する傾向にある。

この現象は重要な提案の可能性を与えてくれる。すなわち、外力（地震動）のパワースペクトル密度は、卓越した周期成分が、ほとんど 1 sec 以下であることから振動系の固有周期を 1 sec 以上に設定すると、系は外力による共振状態から離れうる可能性がある。

しかし、固有周期を長くすることは、変位応答量の増加につながり、この点で問題を含んでいる。そこでこ



図－7



図－8

に変位制御機構を導入する。すなわち Hard-Spring の特性が変位の増大を制御する可能性が生まれる。

5-3 入力エネルギー

振動系における入力エネルギーは $\int_{t_1}^{t_2} \ddot{\phi} \dot{y} dt$ で表される。ここにおいて $\ddot{\phi}$ は外力の加速度、 $\dot{y}$ は速度応答量、 t_1 、 t_2 は想定する外力の作用時間である。図-9 は入力エネルギーの時間密度比 ρ を表わしているが、大略最大変位を与える時刻までの ρ はそれ以後の ρ に比較して約2位の密度を示している。その上、ここにおいては使用している外力の初期の微動部分も含んでいるので、この部分を除外すると ρ はさらに高くなるであろう。また入力エネルギーは、ほぼ速度応答スペクトルに比例している。

5-4 減衰定数

応答計算では減衰定数 $h=0.05$ を共通して与えてある。数波の強制外力を加えた後に自由振動させて、減衰定数を算出すると、線型復元力においては全域において $h=0.05$ 弾塑性復元力においては $h=0.09$ であり、Hard-Spring においては、外力が作用しなくなった直

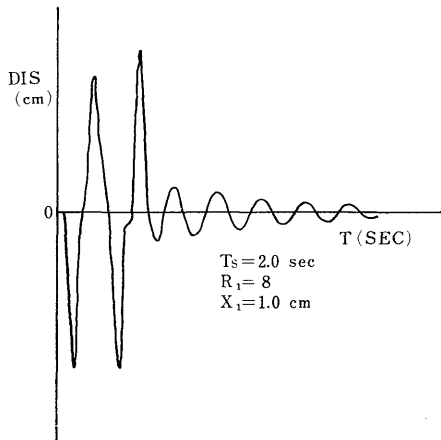


図 - 9

後において $h=0.3$ となり、見かけの h は線型復元力と比較し本例においては約6倍に増加している。

§6. 結 語

今回は地震動を受ける振動系の応答を、復元力特性による分類で示し、復元力の人為的非線型化機構の効果を示した。これは、最大応答量、減衰定数等により説明されている。また入力エネルギー時間密度比 ρ は最大変位応答量の前後で大きく相違することを示した。地震動については、パワースペクトル密度により、明確な卓越周期成分の存在が示され、応答のパワースペクトル密度により、地震動と応答との関係が示されている。

本論は1質点系についてののみ言及しているが、当然多質点系についての研究も進められている。解析した振動系は20,000以上にもおよび、ここに発表したものは、ほんの一部である。しかし全般的な特性は充分表現されていると思う。

今後の問題は、さらに合理的な復元力と外力とを追求することにある。我々の研究は一面では既存の研究方向と少々離れていると考えられるが、その特性に対し御批判と御教示を得て耐震構造の研究に独自の見解を展開したいと思う次第である。

本論は本学建築学科、鶴田明、岡島暢夫両教授に御指導を受けました。両教授に感謝いたします。

また、本研究の一部は本学特別研究費によるもので、本学に感謝すると共に本学電子計算機センターの皆様の御協力も併せ感謝するところであります。

共同研究者：小原松夫（本学大学院）

玉置浩之、塚越敏夫、土田正澄（以上本学四年生）

参考文献 小堀鐸二、南本良一郎

「地震による建造物の非線型振動について その1～5」建論51.52.1955