

東京都立大学 正会員 国中隆弘
大成建設(株) 同上の大塚信一

1. まえがき

強震時における構造物の非線型応答が履歴減衰能力あるいは崩壊過程等を究明するためにしばしば解析の対象となる。この場合、実際に構造物の示す復元力特性がかなり複雑な形状を様し、その形がかならずしも定常的でないことは当然予想されるものの、これを算定する資料を得る機会が少なく、動的な復元力特性についての検討の余地が多く残されていると思われる。このため、強震記録から¹⁾あるいは模型実験を通して²⁾復元力特性を解明しようとする試みは必然的である。一方で、復元力特性の違いがどの程度応答に影響するかを明らかにして復元力特性の変化に伴う応答の変化の傾向を知り、これを設計時あるいは崩壊予測時での参考とするとともに、静的および動的の両者の復元力特性の差異を定めるための予備情報とする事も少なからずの意義を持つと思われる。本研究は単純系に関して、Bi-linear型を中心にこの検討を試みたもので、入力正弦波および EL-Centro 記録を用い、また、Tennings 型についても特に Bi-linear 型との比較において若干検討した。

2. 解析方法

(a) 入力

対象としたものは2種に大別される。1. は円振動数 ω を有し振幅が1galである定常的正弦波で、この入力に対する応答の評価は、構造物の円振動数 ω_0 と入力との比 ω/ω_0 のもとにおこなわれた。 ω/ω_0 は0.5~5.0まで7通りを選び、入力の継続時間は応答の主要成分10波繰り返される時間とし、その間の絶対最大値に注目した。他の1つは最大加速度を1galとした EL-Centro 記録の最初の2.0秒間で、この場合 応答の評価は線型時の固有周期が0.5~2.0(sec)の7通りのものの絶対最大応答に対しておこなわれた。

(b) Bi-linear 型復元力特性

この特性を定義するのは線型限界変位 x_y と弾塑性係数 n である(図-1)。ここでは線型限界を線型応答の最大に対する比 $x_y/(x_e)_{max}$ で与えた。これは表-1に示した如く4組の Type が選ばれた。各 Type は図-2に示した如くである。Type I, II は構造物の弾性限界をわずかに越える応答を与える入力に対するもので、Type III, IV は破壊的な大地震時に概当すると解釈される。

Type I, III は静定次数の高い構造物の弾塑性挙動あるいは接合部等の非線型性を表現し、Type II, IV は静定次数の低い構造物の弾塑性挙動を表現していると考えられる。

(c) 数値計算

計算法は線形加速度法に依った。この場合構造物の示す応答の主たる波形の周期に対する時間きざし Δt の大きさが精度に大きく関係することが十分考えられる。しかしながら、このほどの検討によれば、 Δt の周期に対する比が1/50以下であれば1%の誤差を越えないとされている事から、本研究においてもこれに従った。

(d) 粘性減衰数 α

α は0.0と0.02について検討を行、だが、ここでは主として $\alpha=0.02$ の結果について報告する。

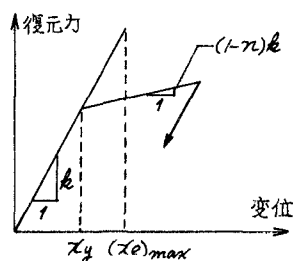


図-1

表-1

Type	$x_y/(x_e)_{max}$	n
linear	1	0
I	0.8	0.3
II	0.8	0.8
III	0.2	0.3
IV	0.2	0.8

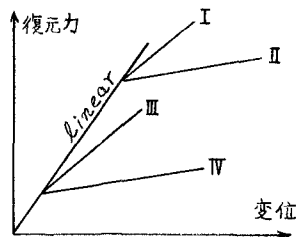


図-2

3. Bi-linear 型復元力特性の応答

変位応答の共振曲線を描いたのが図-3である。Type I および II はほぼ等しい曲線を描き、線型応答との差はわずかである。これに対して Type III, IV は線型応答から大きくかけ離れ、共振点の左側への移動が明らかである。このことは、通常考えられている非線型応答が示す共振回避の能力が、線型限界の大きさに大きく依存していることを意味している。すなわち、構造物の線型限界をはるかに越える応答を与える様な大地震でなければ、共振点の移動は生じにくく、また、この場合には、共振点よりも ω/ω_0 が小さい構造物に大きな被害が生じやすいと言えよう。

図-4 は絶対加速度応答に対して同様に共振曲線を描いたものであるが、入力が前述した如く 1 gal であるから、図中の縦軸はそのまま応答の倍率と考えても良い。各 Type の応答の傾向は変位の場合とほぼ同様であるが、変位の場合に比べて、非線型応答が線型応答を上まわる割合が少ない。これは復元力特性の軟化により共振点がずれるとともに見かけの振動数が低下していき、この事が加速度の低下をもたうしたものと云えよう。

図5 a, b は、変位と加速度について、線型応答に対する非線型応答の比を描いたものである。両図とも $\omega/\omega_0 = 1$ 付近において比が 1 を下まわること示している。すなわち、共振点近くにおいては非線型応答が何らかの減衰能力を示したために応答が低下したと言える。この原因は 1 つは見かけ上の固有振動数の変化による共振現象の回避であり、他の 1 つは復元力の履歴性による相当エネルギーの消費であろう。一オ $\omega/\omega_0 \ll 1$ においては多くの Type でこの比が 1 を上まわる。また $\omega/\omega_0 \gg 1$ においては変位はこの比が 1 に近く、加速度は 1 を下まわる。この二組の結果は、次に記す問題を多くしていると考えられる。 $\omega/\omega_0 \ll 1$ の場合は構造物の固有周期が入力の卓越周期よりも小さいことを意味しており、 $\omega/\omega_0 \gg 1$ ではこの逆となる。即ち、比較的剛な構造物は非線型応答時には変形が大きくなり加速度は線型応答と変わらぬ。一オ比較的柔な構造物は変形が線型応答と同じ程度であるが、加速度は低下する。

図-6, 図-7 はそれぞれ El-Centro 入力に対する変位および絶対加速度応答の絶対最大値を描いたものである。横軸は構造物の線型時の周期である。変位応答においては、Type IV を除けば線型応答と大差がない。特に Type I, II は 0.8 sec 以下において線型応答とほとんど変わらない。一オ、加速度応答においては、大部分の周期において Type I ~ IV の順に応答が低下している。これらの結果は図3~5 示したものと大体傾向が一致しているものの線型応答を上まわる非線型応答を示す領域が総じて少ない点で異なる。この原因は定かでないが、入力の定常性の違いがその理由として考えられる。今後検討したい。

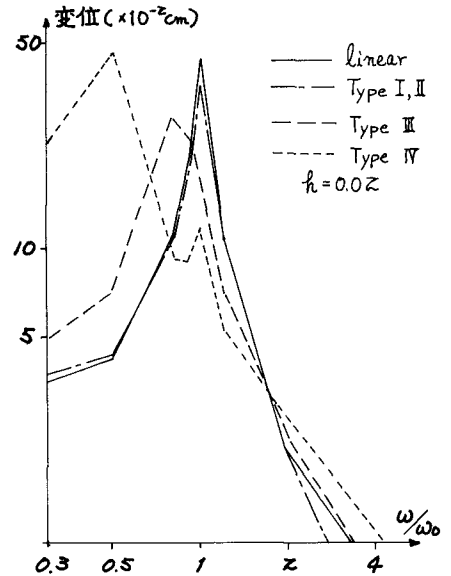


図-3

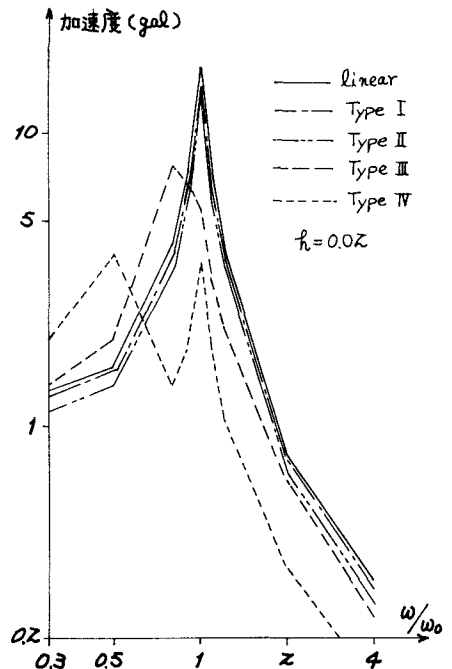


図-4

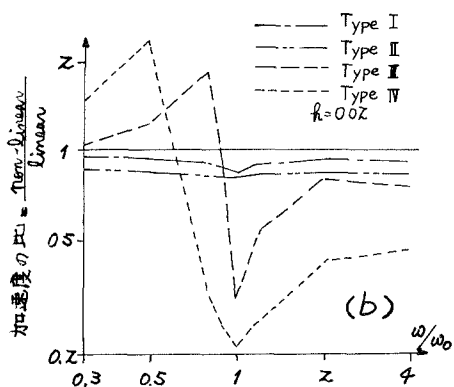
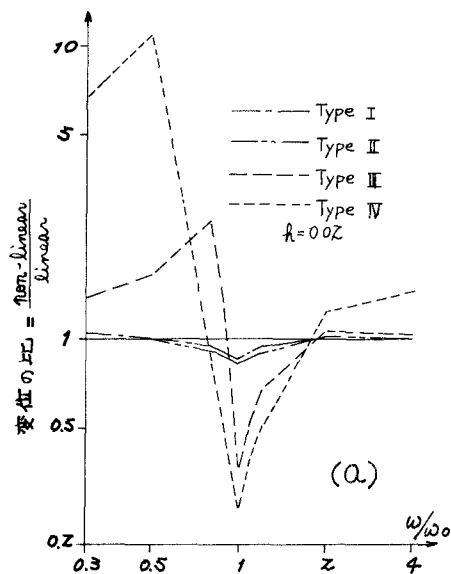


図-5 (a), (b)

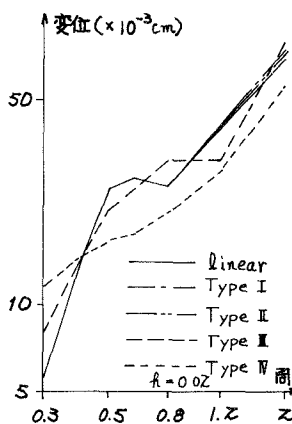


図-6

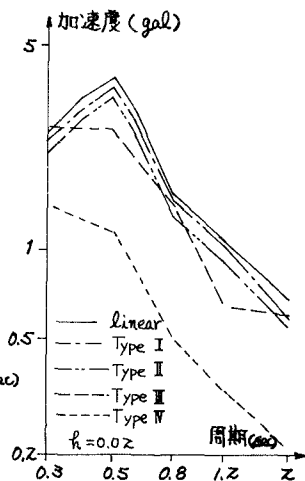


図-7

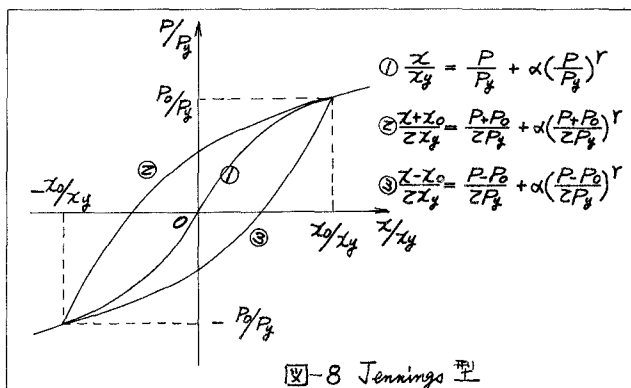


図-8 Jennings 型

4. Jennings 型復元力特性の応答

ここでの目的は Bi-linear 型と Jennings 型との両者が示す応答の傾向の差異を追跡する事にある。このためにはこの両者の特性を何らかの要素のもとに同一の特性と見なさねばならない。Jennings 型は図-8 に示した如く、Skelton, Branch 共に曲線からなるため、一義的には Bi-linear 型に置き換えることはできないが、非線形復元力特性が、その特性を履歴ループの面積、および剛性の低下に依存している事を考えれば、この二つの要素が両特性を結びつけるポイントとなろう。履歴ループの面積は等価剛性で表され深くかかわりあうと言われているが、これまでの Bi-linear 型で得られた結果から考慮される剛性の低下に伴う固有周期の変化もかなりの影響を応答に与えていると思われる。そこで今回は、両特性が同一の等価剛性を有する様に試みた。すなわち、これまでの Bi-linear 型の応答結果のうち、各種入力に対して最大の応答を示した復元力特性上の点に Jennings 型の Skelton が通過するように Jennings 型を選んだ。この場合、図-8 から r と α の両者がパラメータとなるが、今回は計算の簡略化のため $r = 3$ と仮定し、上記の条件を満足すべく α を決定した。従って、 α の値は Bi-linear の各 Type の各 ω/ω_0 ごとく、また、El-Centro 入力の場合は各固有周期ごとく存在することとなる。

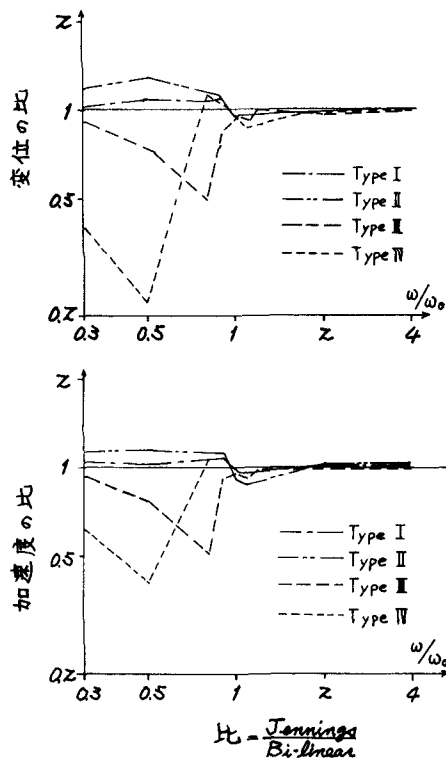
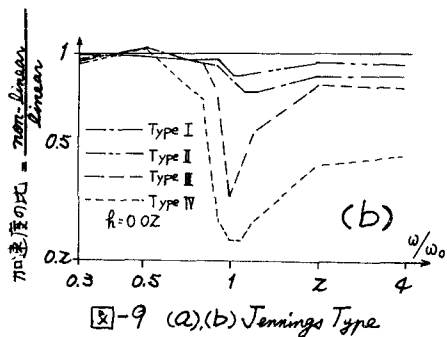
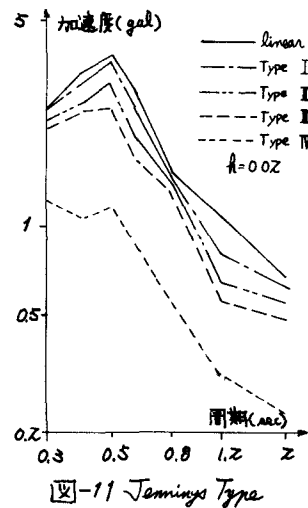
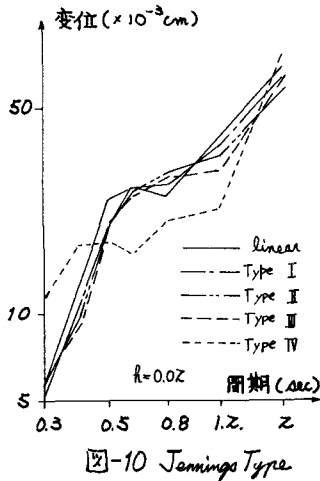
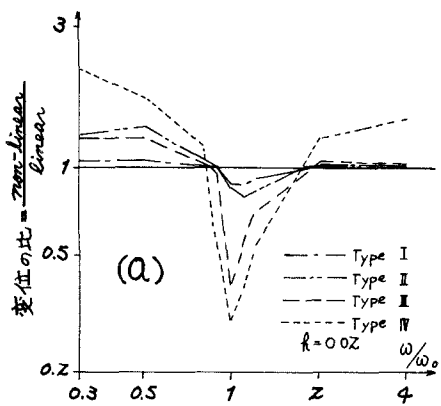


図-9 a, bはそれぞれ変位と加速度について、線型応答の最大値に対する Jennings 型の最大値の比をとったものである。両図は図-5, a, bに概当するものであるが、図9と図-5と比較すれば特に $\omega/\omega_0 < 1$ においてその差が認められる。即ち Bi-linear は Jennings に対して短周期の構造物において大きい応答を示していることが明らかである。

図-10, 11は EL-Centro の入力に対するもので、Bi-linear の場合の図-6, 7に概当する。図-6と10及び図-7と11においていずれの両図とも非常に似た傾向を示していると言えよう。即ち、正弦波入力に対して特に $\omega/\omega_0 < 1$ に対して大きな差を示した両 Type の復元力特性が、地震の如く不規則な入力に対しては周期の大小にかかわらず類似した応答を示す事が解る。この原因は定かでないが、両復元力特性の応答の比を求めた図-12によれば、 $\omega/\omega_0 < 1$ において、Type III と IV とが特に大差を示す事が観察されることから、線型限界が特に小さい場合、即ち、構造物に入る入力が線型限界を大きく上まわる様な応答を与えるもので、なおかつ定常的な場合、Bi-linear 型は Jennings 型に対してかなり大きめの応答を示すと言えよう。

- 1) 家村, PC Jennings 「強震記録を利用した R.C 建築物の劣化履歴復元力解析」土木学会論文報告集 No. 280, 1974
- 2) 国井, 福井 「単軸系の非線形応答特性に関する模型実験」第1回関東支部年次研究発表会 1974-5
- 3) 国井, 鹿又 「動的問題における数値計算法の精度に関する一考察」同上