

論文

[2033] 地震入力波形と構造物応答

正会員○日向 文英（大成建設）

正会員 平尾 哲也（東京都立大学大学院）

正会員 早川 淳一（佐藤工業）

正会員 山崎 淳（東京都立大学工学部）

1. 土木構造物の耐震設計の現状と問題点

土木学会『コンクリート標準示方書』の耐震に関する検討においては、標準水平震度に地盤、構造物の固有周期などの修正係数を考慮して設計水平震度を求める。この設計水平震度に対する構造物の安全度は、①最大耐力と②最大応答変位で検討する。構造物の被害を「軽微な損傷」とするためには、地震時の最大応答変位を $2\delta_v$ に抑えることを推奨している。一般に動的地震応答解析を行う場合は、構造物と入力地震波との関係が問題である。現時点では、応答変位に及ぼす入力地震波形の特徴の影響、入力地震波の周期特性と構造物の固有周期との関係の影響を設計に反映させる方法は不十分であると思われる。

2. 本報告の目的

1節で述べた問題点を検討するため、鉄筋コンクリート構造物の地震時挙動を仮動的実験において以下のような関係を調べる。

1) 入力地震波形と応答変位

2) 入力地震波の最大加速度と応答変位

3) 入力地震波の周期特性と構造物の固有周期における同調の程度と応答変位

以上のことから、種々の入力地震波形が鉄筋コンクリート構造物のダクティリティ要求値($\mu = \delta / \delta_v$)に及ぼす影響を検討するものである。

3. 実験条件の設定の方法

(1) 入力地震波の決定

6種類の入力地震波による応答実験を行った。基本入力地震波はEl-Centro、1985Mexicoとし、加速度の最大値、時間尺度を以下のように定めた。構造物の固有周期との同調の程度を考える場合は、それぞれの波において、次の区間を着目時間区間とした（図-1参照）。

(a) El-Centro地震波においては、最大加速度発生を含む1つの波のゼロクロッシング区間

(b) 1985Mexico地震波においては、地震波の輪郭線が3つの大きな波の描くように見えるうち、

2番目の輪郭線の波の中の最大加速度発生を含む1つの波のゼロクロッシング区間

とした。El-Centro地震波は、まだ降伏していない構造物に最大加速度を作用させるため、また1985Mexico地震波では、すでに降伏した構造物に最大加速度を作用させるためである。それぞれの地震波における最大加速度は20(gal)と30(gal) [想定実構造物でそれぞれ200(gal)と300(gal)]とした。それぞれの地震波の着目時間は、構造物の初期剛性に基づく周期と一致させた場合とその1.5倍の場合の2種類である。これは、設定したゼロクロッシング区間に対して構造物の弾性時の固有周期が0.87秒であることを考慮して、入力地震波のゼロクロッシング周期を1.0秒に修正し、

その1.0秒と1.5倍の1.5秒を入力することにより、それら異なった地震波に対する構造物の応答特性を調べ、構造物応答の予測をしようとするためである。これら6種類の入力地震波のデータを表1にまとめた。それぞれの基本入力地震波について、フーリエ解析を行った結果を図-2に示す。

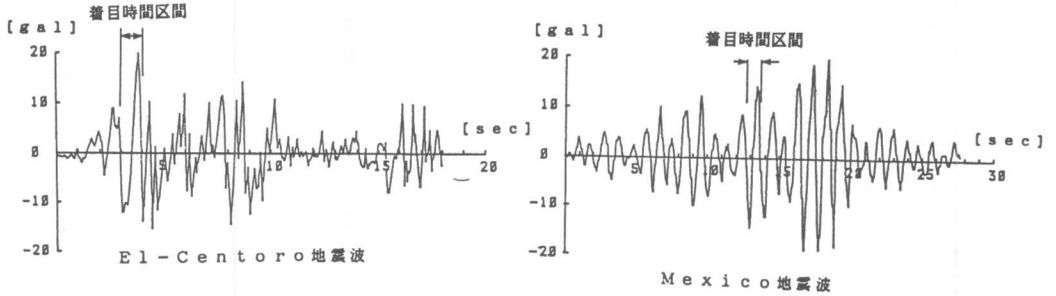


図1 入力地震波

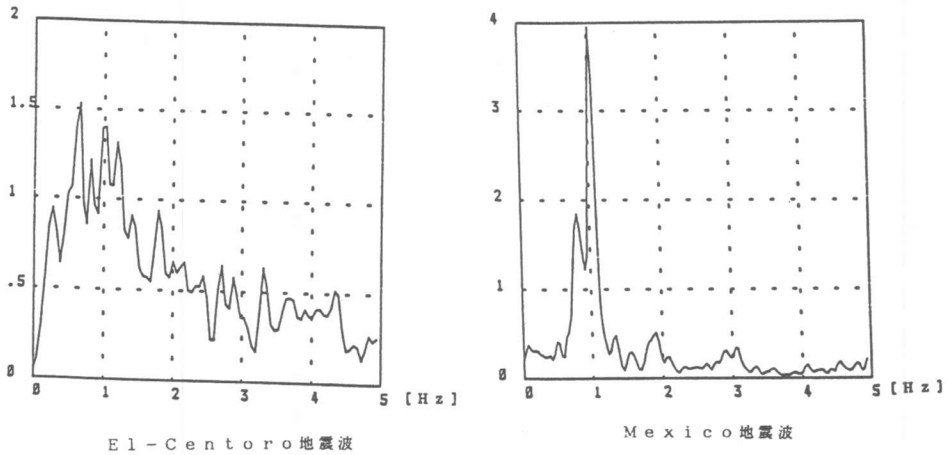


図2 周波数と加速度との関係 (フーリエ)

表1 入力地震波の諸条件

条件番号	入力地震名	入力加速度 (gal)	Z.C周期 (sec)
①	EL-CENTRO	20	1.0
②	EL-CENTRO	30	1.0
③	EL-CENTRO	20	1.5
④	1985 MEXICO	20	1.0
⑤	1985 MEXICO	30	1.0
⑥	1985 MEXICO	20	1.5

(注) ①をEL-CENTORO地震の基本入力地震波、④を1985MEXICO地震の基本入力地震波とした。

(2) 実験供試体

実験供試体は、断面10(cm)×10(cm)、高さ50(cm)、四隅にSD30D10をかぶり15(mm)で各1本配置、最大骨材寸法10(mm)、試験時コンクリート圧縮強度400(Kg/cm²)の梁柱供試体とした。主鉄筋の抜け出しを防止するため、定着部で溶接を行った。

4. 仮動的実験装置

橋脚などの縮小模型供試体を対象とする、機械的変位制御型の仮動的実験装置の全体図を図-3に示す¹⁾。载荷装置は電動モーターを使用している。中央差分法によって算出した変位をモーターの回転数、回転角に変換し、モーターの回転力で、供試体に強制変位を与えている。モーターの出力軸回転数は回転検出器から変換器を通して、随時パソコンに送られ、目標回転数との差からモーターの出力軸回転数を調整している。目標変位と実測変位との精度を0.05(mm)以内で抑えている。今回の実験では軸力を付加していないので純曲げ挙動に限定される。橋脚などの実挙動を調べるためには軸力を付加することが必要である。また、この実験の変位計算には中央差分法により計算を行っている。このとき、計算変位と実測変位には誤差が表れるが、本システムでこの誤差を0.05mm以内になるように補正を行っている。

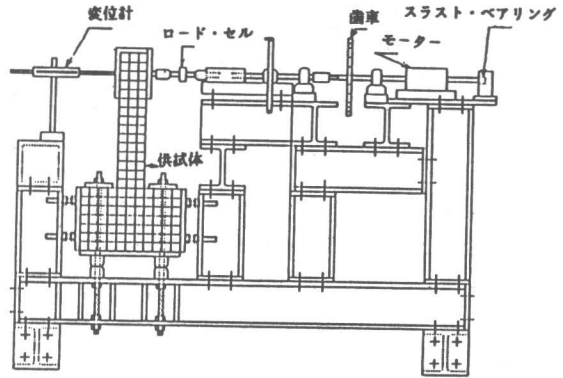


図3 仮動的実験装置

5. 供試体構造物の荷重-変形特性

静的-一方向载荷実験を行い、荷重-変位関係を図-4に示す。降伏変位0.5(mm)、降伏荷重0.77(ton)で、剛性 $k=1.54$ (ton/cm)となった。また、供試体の10倍の実構造物を想定しているため、実構造物の断面耐力291.7(t)から考え水平震度0.2での構造物の上部上載重量をぎりぎりに設定すると291.7(t)となる。相似則にしたがえば、上載重量は1/10になるので供試体へ载荷する重量は29.2(t)となる。そのとき、構造物の初期剛性から計算される固有周期は、

$$T = 2\pi\sqrt{m/k}$$

$$= 0.87(\text{sec})$$

となった。2 δy 、3 δy 、4 δy の割線弾性係数から求めた固有周期を同時に示した。

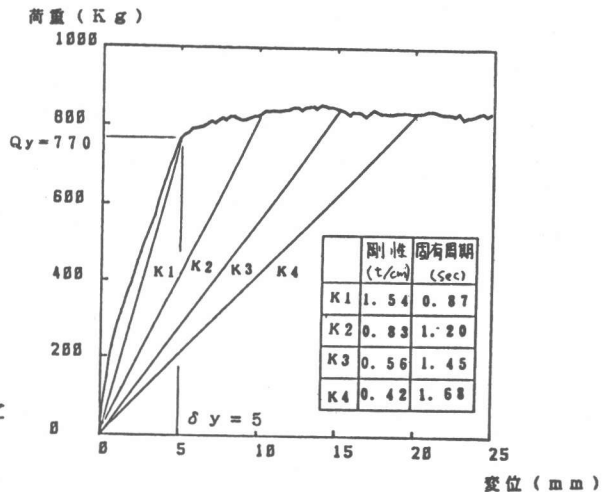


図4 荷重-変位特性

6. 仮動的応答実験結果

仮動的応答実験結果をまとめて図-5に示す。図中の①～⑥の番号は、各実験条件の番号を意味する。仮動的実験結果の降伏荷重、降伏変位の決定は、各実験毎に、鉄筋の降伏を基準とした。結果の指標には変位の振幅の中心がシフトして行く傾向があるので、その影響を受けずに変形の大きさを表す指標として最大変形（最大全振幅の1/2の変位）を用いた。最大応答変位と降伏変位に対する比を表2にまとめた。

(1) 基本入力地震波に対する応答特性

El-Centro地震波(①)の場合は、最大加速度20(gal)に対しては最大変形が $1.71\delta_v$ で「軽微な損傷、 $2\delta_v$ 」の範囲内にある。さらに、入力地震波の最大加速度時に最大応答変位を示している。これに対し、Mexico地震波(④)の場合は、着目時間区間の応答変位が $2\delta_v$ を超え、最大変形時には $2.75\delta_v$ となった。

(2) 最大加速度の影響

El-Centro地震波(②)の場合は、最大変形が $3.00\delta_v$ で、基本入力地震波(①)に対する最大変形の $1.71\delta_v$ に対して 1.73 倍となり、最大加速度の影響(1.5 倍)以上の応答を示した。Mexico地震波(⑤)の場合では、最大変形が $3.26\delta_v$ で、基本入力地震波(④)の最大変形と比較すると 1.19 倍で、最大加速度を 1.5 倍した効果よりも変形は小さくなっている。しかし、残留変形は大きな値を示している。

(3) 入力地震波の周期特性による影響

基本の入力地震波の時間軸を 1.5 倍したときの応答変位に対する影響は、基本入力地震波に対する最大変形との比で比較すると、El-Centro地震波の方がMexico地震波よりもやや大きかった。El-Centro地震波(③)の場合、応答波形が基本入力波に対する応答波形と明かに異なり、最大変形が $2.22\delta_v$ で 13 秒付近で生じ、基本入力地震波最大変形に対しての 1.30 倍となった。逆に、着目時間区間では応答変位が $1.37\delta_v$ で、基本入力地震波の $2.10\delta_v$ よりも $35(\%)$ 小さくなった。Mexico地震波(⑥)では、初降伏時が 23 秒付近で生じており、基本入力地震波(①)の応答と大きく異なった。最大変形が $3.49\delta_v$ を示して基本入力地震波に対する最大変形の 1.27 倍となり、最大加速度を 1.5 倍にした時の影響よりも大きな変形を起こした。

(4) 応答変位に及ぼす入力地震波の周期特性と構造物の固有周期との関係

応答変位と、構造物の固有周期(T)と入力地震波の着目時間区間($Z.C$)との関係は表3に示した。ここで、 $T/Z.C$ が 1 に近付くと共振した状態になる。実験条件⑥のMexico地震波に対する応答結果をみると、最大変形が $3.49\delta_v$ と他の条件よりも大きくなった。この理由は、最大変形時($T/Z.C=1.06$ 倍)で共振している状態で、さらに最大入力加速度が作用しているためである。

El-Centro地震波においては、基本入力地震波においては最大加速度時に最大変形を起こしたが、実験条件③の降伏時点で $T/Z.C=0.50$ 倍となり、応答変位は $1.37\delta_v$ とそれほど大きくない。ところが、その後最大変形時に $T/Z.C=0.99$ 倍、固有周期と入力地震波の周期がほぼ一致してかなり大きな応答変位 $2.10\delta_v$ を示した。

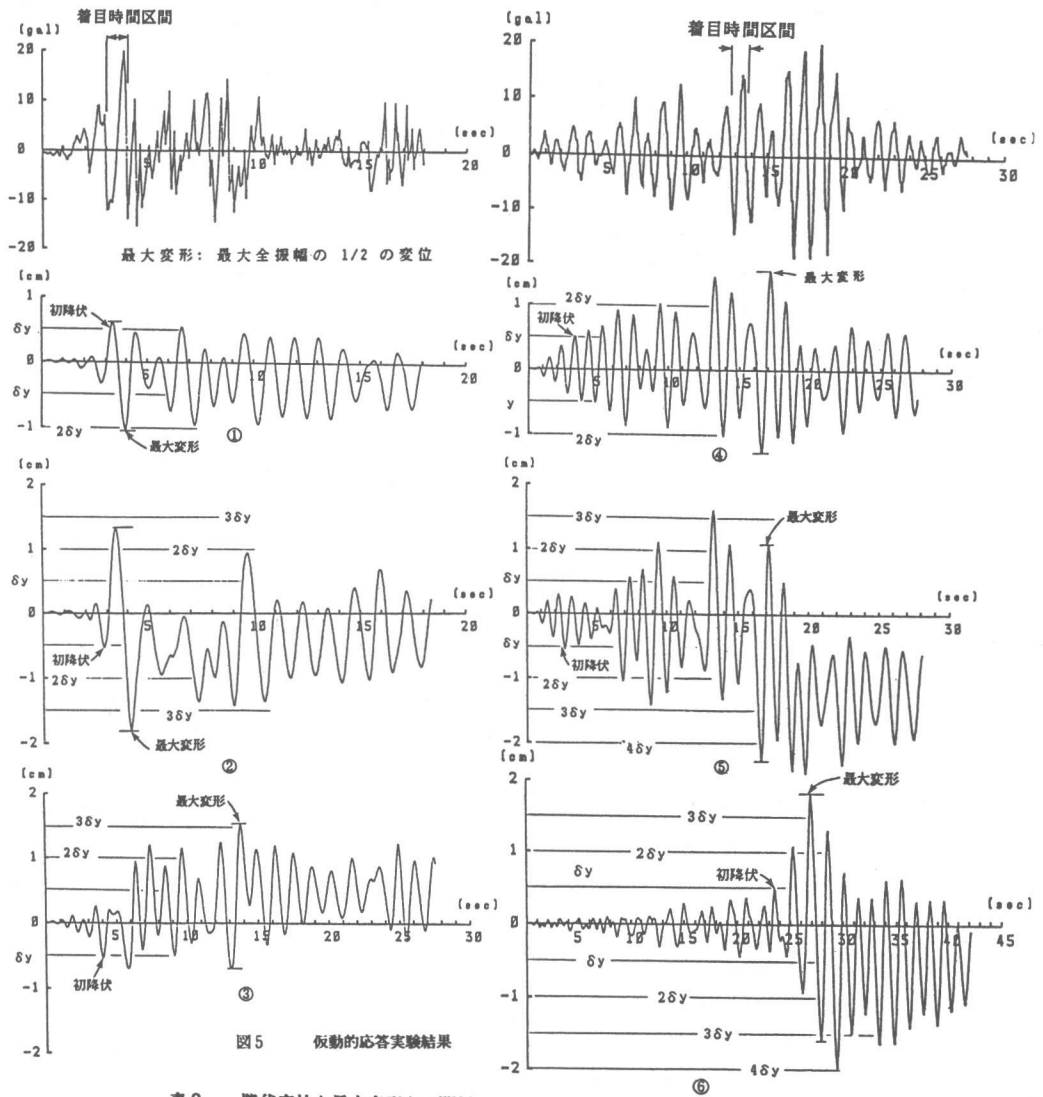


図5 仮動的応答実験結果

表2 降伏変位と最大変形との関係

条件番号	降伏変位 (mm)	降伏荷重 (kg)	最大変形 (mm)	最大変形/降伏変位
①	4.8	800	8.21	1.71
②	5.2	740	15.60	3.00
③	5.0	790	11.10	2.22
④	5.1	800	14.02	2.75
⑤	5.1	760	16.63	3.26
⑥	4.8	720	17.20	3.49

表3 地震波の周期と構造物の剛性（固有周期）との関係

表3-1 EL-SENTORO地震波

条件	着目点	剛性 (Kg/cm)	固有周期 T (sec)	Z.C (sec)	T/Z.C
①	降伏点	1411	0.91	0.83	1.10
	最大変形点	867	1.17	0.98	1.19
②	降伏点	1581	0.86	0.83	1.04
	最大変形点	375	1.77	0.98	1.81
③	降伏点	1489	0.89	1.71	0.50
	最大変形点	570	1.43	1.44	0.99

剛性は復元力がゼロの状態の変位と最大変位点との割線剛性とした。

Z.Cは入力地震波のゼロクロッシング周期

表3-2 MEXICO地震波

条件	着目点	剛性 (Kg/cm)	固有周期 T (sec)	Z.C (sec)	T/Z.C
④	降伏点	1537	0.87	1.08	0.81
	最大変形点	347	1.77	1.04	1.70
⑤	降伏点	1682	0.84	1.08	0.78
	最大変形点	290	2.00	1.04	1.92
⑥	降伏点	1514	0.88	0.94	0.94
	最大変形点	392	1.73	1.63	1.06

8. 結論

入力地震波と構造物の応答変位との関係は、入力地震波形の特徴、入力地震波の周期特性によって応答変位が大きく増加する傾向がみられた。2節で掲げた目的に対してまとめてみると、以下ようになる。

- 1) 入力地震波形自体の特徴による違いは、最大変形で比較するとEl-Centro地震波に対する応答が $1.71\delta_v$ であるのに対し、Mexico地震が $2.75\delta_v$ の応答変位で影響が大きい。
- 2) 入力地震波の最大加速度の影響は、El-Centro地震波の基本入力地震波に対する最大変形の1.73倍で、Mexico地震のそれの1.19倍よりも大きく、El-Centro地震波の方が最大加速度を1.5倍にした効果が応答変位に及ぼす影響が大きかった。
- 3) 入力地震波の周期特性が応答変位に対する影響は、両地震波ともに基本入力地震波の最大変形で比較すると、それほど違いはない。しかし、応答波形に対する影響はEl-Centro地震波の最大変形が $2.22\delta_v$ に対し、Mexico地震波は $3.49\delta_v$ で、卓越周期を持つMexico地震波の方が大きい。

以上の実験結果から、入力地震波の特徴が構造物の応答変位に及ぼす影響を何等かの修正係数を用いて現すのはまだ困難である。今後実験条件を増やし、実験パラメータの整備をしていくことにより入力地震波と構造物の応答変位との関係を対応づけていこうと考えている。

謝辞：この研究は文部省科学研究総合研究（A）(No62302042)により行い、研究代表者：町田篤彦・埼玉大学教授に厚く御礼申し上げます。実験に協力して下さった当時大学院生 杉本優君、並びに卒研 寺島善宏、矢沢英治にここに謝意を表す。

参考文献：

- 1) 早川、長浜、山崎：RC構造物の地震損傷評価のための仮動的実験装置、第10回コンクリート工学協会年次公演会論文集(1988)、PP.479~484