

多層ラーメン構造物の波動特性

中部電力 K.K 水野敦宏
電力中央研究所 ○沢田義博 栗原千鶴子
桜井彰雄 矢島 浩

1. まえがき

地震時における構造物の挙動は、従来より、多質点系による振動論あるいはモーダルアナリシス的な立場より取扱われる場合が多いが、金井等の研究にみられるごとく、地震による構造物の振動は構造物内を上下に伝播する波動の合成された結果とも考えられ、又、地盤と構造物の連成振動を扱う上でも、構造物の動的挙動を波動的立場から検討することも必要であろう。

今回、重要構造物の大型模型を振動台上に製作し、種々の静的・動的試験を行う機会を得るに際し、構造物の波動特性を求めるために、主として衝撃力により構造物を伝播する波動を発生させる方法で、二、三の波動実験を行った。ここでは、得られた波動の伝播特性について述べるとともに、構造物の動的挙動モデル、地震応答結果について、本実験に基づく場合と多質点系による解析結果とを比較検討したものである。

2. 実験方法

実験に用いた模型は図-1に示すごとく、底面 $4.3\text{m} \times 4.3\text{m}$ 、高さ 8.25m 、重量約 90ton の鉄筋コンクリート造3階建である。波動の発生方法としては、(1)カケヤ打撃、(2)振動台の変位ステップ入力の2通りの方法を用いた。(1)は、建物模型の頂部又は底部の側壁をカケヤによって垂直に打撃してパルス波動を発生させる方法、(2)は振動台を種々の大きさにステップ変位させて波動を発生させる方法である。伝播波動の観測には、側壁に設置した速度計(3成分)及び各階(1F~4F)に設置した変位計、加速度計を用いた。なお、以下に述べる実験結果は全て建物模型のラーメン方向(E-W方向)についてのものである。

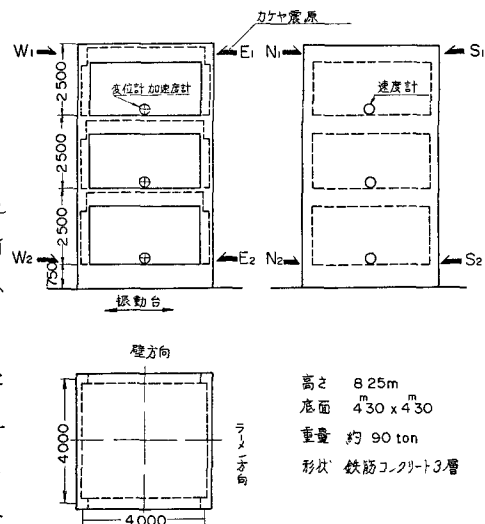


図-1 建物模型

3. 構造物を伝播する波動の特性

3-1 カケヤ震源による伝播波動

カケヤ打撃によって発生する波動は一般に短周期成分が卓越し、3成分記録では打撃方向の水平成分のみならず、上下方向成分も卓越したものが得られた。ラーメン方向における波形は図-2に示すごとく、約 50Hz の波

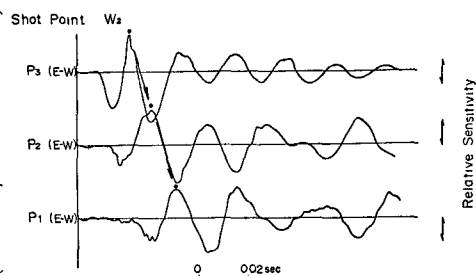


図-2 カケヤ打撃による速度波形

動が矢印に示すように建物の1Fと4Fの間を伝わることがわかる。これらの伝播波の初動より1波～2波をフーリエ解析し各測定の位相スペクトラムから振動の位相速度を求めたものを図-3に○印で示す。位相速度は周期によって異なり、いわゆる分散性を示すが、これはカケヤ打撃による振動が実作波よりもむしろ波動的な性質を持つ振動であることを示すものと考えられる。一方、建物のコンクリート壁を無限の広がりを持つプレートと見做した時、プレートを伝わるFlexural波の理論位相速度分散曲線は、プレートの厚さをパラメータとして同図に実線で示すごとくなり、観測値はプレートの厚さが約17cmの場合の理論曲線にほぼ一致する。この値は、柱などの影響を考慮した時の実際のコンクリート壁の厚さにかなり近いものである。

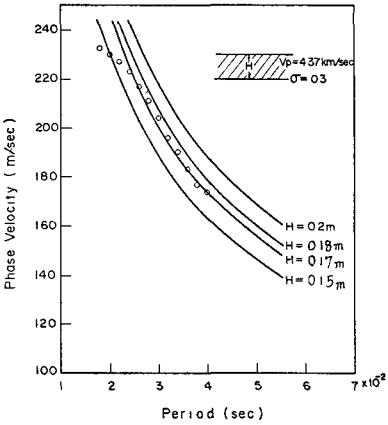
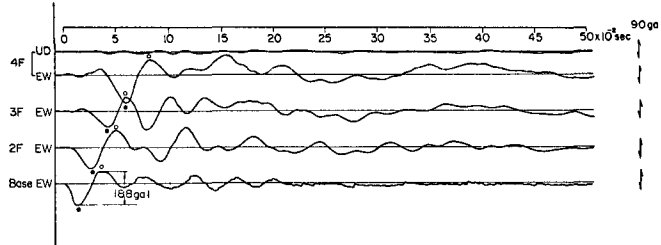


図-3 カケヤ打撃による振動の位相速度

従って、上記の事実と、3成分観測からせん断成分のみならず建物の軸方向成分も検出されたことを合わせて、カケヤ打撃により建物を伝播する振動は、壁、柱などの部材の波動的な性質を表わすにとどまり、建物全体の伝播振動として生長するまでに至らないものと考えられる。

3-2 振動台への変位ステップ入力による伝播振動

振動台を加速度にして30～300 gal 程度まで数段階にわけて変位ステップで駆動し、これにより建物を伝わる振動を観測した。



各階における加速度波形の一例を図-4に示す。

図-4 変位ステップ入力による加速度波形

に示すように、加速度波形では初動より約0.1秒までは建物の2次モードに近い約20～25 Hzの比較的短周期の伝播振動が卓越するが、時間と共に相対的に1次モードに相当する長周期の定常振動成分が優勢となる。又、4Fにおける上下動成分はカケヤ打撃による場合と異なり、水平成分の1/20以下であり、せん断成分の卓越した振動といえるだろう。

変位ステップ入力による振動の伝播速度を求めるために、加速度波形にみられる伝播振動の位相から走時図を求め、これを図-5に示す。図に明らかのごとく、伝播波の位相速度は建物の各階間で異なり、建物の下部から上部にゆくに従い伝播速度が低下する現象がみられる。入力加速度の大小により若干の差異はあるが、平均では、1F→2F：220 m/sec，2F→3F：170 m/sec，3F→4F：130 m/secの値が

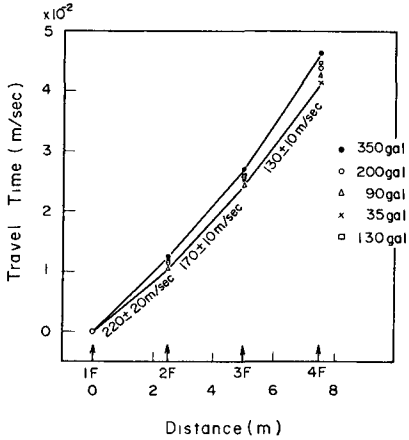


図-5 変位ステップ入力波の走時

得られた。又、フーリエ解析の結果によれば、この伝播波動の分散性は非常に小さく、例えば3Fと4F間では周期が0.04秒～0.08秒の範囲で速度に生ずる変化は、約6%程度であるため、全んど測定のパラツキ内に含まれる変化といえる。

次に、4Fにおける観測波形から、伝播波の速度を順次変えながら各階における波形を多重反射理論により求め、実際の観測波形と比較した。この結果各階における観測波形に最も近似していると考えられる理論波形を与える伝播波の速度は、図-6に示されるごとく、4F→1F: 170 m/sec, 4F→2F: 150 m/sec, 4F→3F: 130 m/sec となり、これは

図-5の伝播波の走時から直接求められる4Fと各階間との平均速度に良く一致する。この様にステップ入力による波動の伝播速度が建物の高々方向で異なる理由についてはまだ不明であり、さらに多くの実験を重ねる必要があるが、構造物を伝播する波動の性質の一つとして興味深いものがある。

4. 質点系モデルと波動モデルによる構造物の動特性の比較

変位ステップ入力による伝播波動から得られた建物の速度分布を用いて、建物を成層地盤状の波動モデルに置換する一方、主として静的試験結果に基づいて種々の多質点系モデルを考え、これらのモデルの示す諸特性と実測値を対応させた。

建物の減衰定数は、ステップ入力により励起される1次の自由振動の減衰からは $h \div 2.6\%$ (図-7)、起振実験の結果では1次、2次、3次ともに約2%前後で次数による差異はあまりない。このため、質点系モデルでは減衰定数を内部粘性系と外部粘性系の組合せで考慮することとし、次式によって減衰定数を表現した。

$$h_j = (\beta + \gamma \omega_j^2) / 2\omega_j \quad (\text{但し, } h_j: j\text{次のモードに対する減衰定数, } \omega_j: j\text{円振動数})$$

$h \div 2.5\%$ とすると、 $\beta = 1.3 (\text{sec}^{-1})$, $\gamma = 0.00036 (\text{sec})$ となる。波動モデルでは、媒質を線型粘弾性

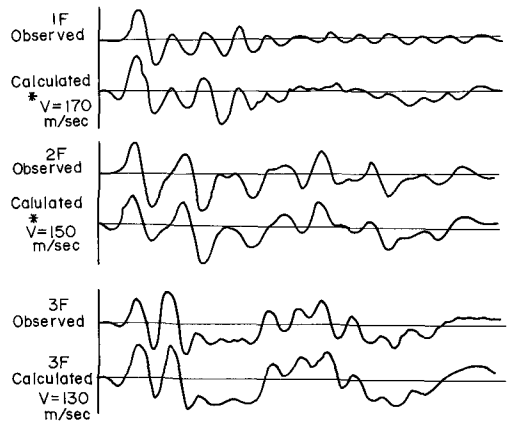


図-6 各階における観測及び理論波形

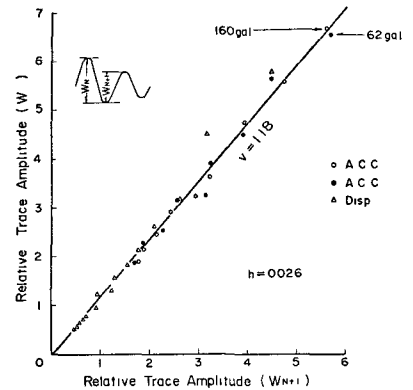


図-7 自由振動による減衰定数

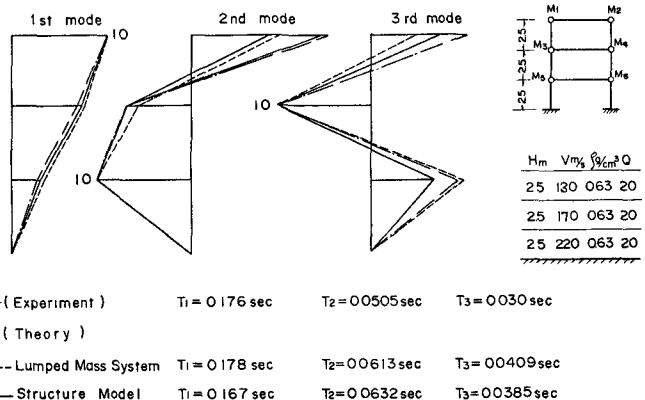


図-8 質点系モデルと波動モデルによる固有周期及びモードと実測値

体とし、減衰定数 $Q (= 1/2h)$ が周波数によらず一定であるとして解析を行った。

この様にして得られた各モデルによる固有周期及びモードを起振実験による実測値とともに図-8に示す。但し、質点系モデルは、6質点数でテストピースによる静弾性係数 $\times 2$ を用いた場合の例を示して

ある。

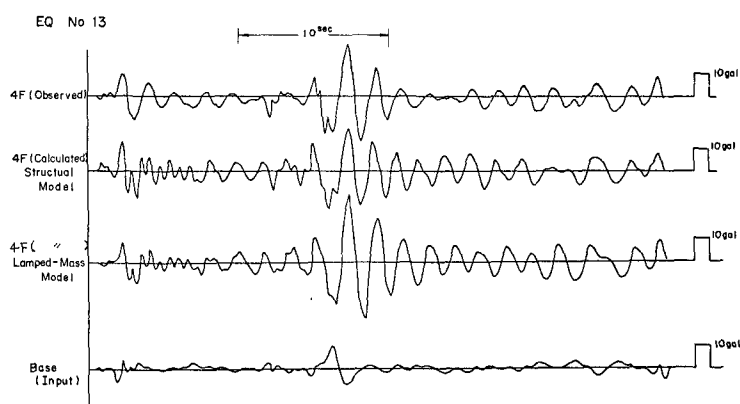


図-9 地震入力による観測及び理論波形

質点系モデルでは、固有周期・振動モードとも1次に関しては実測値と非常に良く一致するが、高次振動ほど次第に近似が悪くなってくる。各階の中間に質点を設け、さらに自由度を増したモデルでは、高次振動における近似はよくなるが、まだ十分とはいえない結果となった。一方、波動モデルでは、1次の固有周期が若干小さく出ており、この点、質点系モデルより近似度が劣るといえるが、2次・3次の固有周期は質点系モデルと大きな差異はなく、又、振動モードにおいても、両者とも実測値と比較的良好に対応しているといえる。

次に、振動台によってランダム起振を行い、各階の観測波形と、振動台の入力波形を入力とした各モデルの応答波形を比較した。一例を図-9に示す、この図にみられるごとく、質点系モデルは波動モデルに比べ、1次の固有振動成分が卓越し、最大加速度値も実測値より大きい値となっているが

別の応答例では、逆に質点系モデルによる方がむしろ実測波形との対応が良いという結果も得られており、モデルによる差異は明確ではないが、概して、これらのモデルによる計算波形は実測波形に良く近似しているといえよう。

5. 結 論

鉄筋コンクリート造の大型の建屋模型について、そのラーメン方向の波動特性を調べた。

- (1) カケヤ打撃により生ずる伝播波動は分散性を示し、壁・柱などのまげ波的特性の強い波動である
- (2) 振動台のステップ入力による伝播波動は、水平成分が卓越し、分散性も小さく、せん断波的特性を有するが、その位相速度は建物の高さ方向で異なり、上部ほど小さな値となる。
- (3) 伝播波動の速度分布から建物を波動モデルに置換し、その動特性、地震応答特性を求め、質点系モデルによる解析結果と比較したところ、両モデルにおける差異は小さく、いずれも実測値とほぼ良く一致する結果を得た。

本実験に際しては、当時研究室に所属された佐藤孝雄氏（現住鉄コンサルタント）の御指導に蒙るところが多かった。又、多くの電力会社、大学関係者より御支援をいただいたことを記し、深甚なる謝意を表したい。

参考文献 *1 Kanai, K. et al "Some New Problems of Vibration of a Structure, Part 4, 2", B. E. I., vol 41, 1963

*2 堤, 柳原, 他 "原子力発電所建物の模型振動実験, (1)~(6)", 技研研報, 1971