

論文 繰り返し鉛直荷重を受ける R C 門形架構の復元力特性に関する実験的研究

平松 晃^{*1}

要旨：実大の約 1 / 3 の縮尺をもつ R C 門形架構供試体に水平力と同時に柱軸圧比が 0.1 ~ 0.3 に相当する繰り返し変動鉛直荷重を加える実験を行なった。その結果、鉛直荷重の変動に呼応して水平荷重も変動すること、その変動は水平力の大きい領域で著しく、変動幅が水平耐力の 30% に及ぶ場合のあることが示された。

キーワード：変動鉛直荷重, 繰り返し水平荷重, 履歴曲線, 最小二乗法

1. はじめに

地震動を受けて建築構造物が振動するとき、柱の軸力は常に変動している。柱の軸力が大きく変動すると、損傷の進行や復元力特性が影響を受け、引いては地震応答性状にもその影響が及ぶものと考えられる。筆者は、これまで転倒モーメントの繰り返しを想定した変動鉛直荷重を加える実験を行ってきたが¹⁾、この度、上下振動による柱の軸力変動に着目し、これが R C 構造物の復元力特性にどのように影響するのかを検討するための繰り返し加力実験を行ったので、ここではその実験結果を報告する。

2. 実験概要

供試体は、1 スパンピロティアー架構の第 1 層を取り出したものを想定した実大の約 1 / 3 のスケールをもつ R C 門形架構の 2 体である。2 体は同じ設計仕様で製作されたものであり、断面寸法や配筋は図 - 1 に示すとおり、柱に比べ強剛な梁をもち、柱の曲げ降伏が先行する設計である。材料特性と柱の構造因子をそれぞれ表 - 1 と表 - 2 に示す。

荷重は、図 - 2 に模式的に示すように水平荷重 P と左右両柱の頭部のそれぞれに鉛直荷重 W_A と W_B を加える方法を採用した。2 体の供試体のうち 1 体には、変動する鉛直荷重を加えたが (変動鉛直荷重実験), 他の 1 体には一定の値 (軸圧比約 0.2 相当) を保つ鉛直荷重を加えた (定

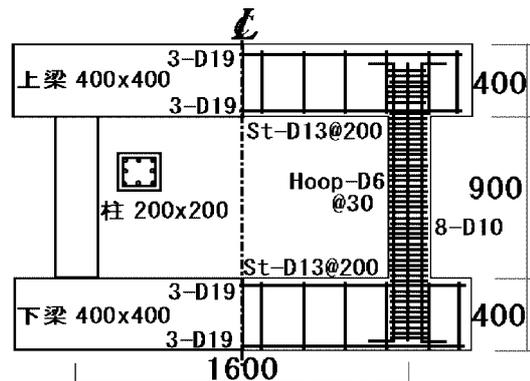


図 - 1 供試体配筋図

表 - 1 材料特性

コンクリート呼び強度	1 6
シリンダ - 圧縮強度 (N/mm ²)	19.9
柱主筋降伏点 (N/mm ²)	387
柱主筋強度 (N/mm ²)	552
柱帯筋降伏点 (N/mm ²)	488
柱帯筋強度 (N/mm ²)	650

表 - 2 柱の構造因子

軸圧縮応力比	0.1 ~ 0.3
せん断スパン比	2.25
せん断補強筋比 (%)	1.07
主筋比 (%)	1.43
断面 (mm x mm)	200x200
主筋 SD295A	8 - D 10
帯筋 SD295A	D 6
帯筋間隔 (mm)	3 0

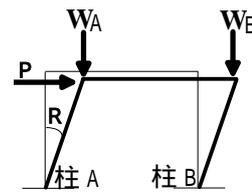


図 - 2 実験概要

表 - 3 鉛直荷重 W_A, W_B の概要

$W_A, W_B = W_0 + A \cdot \sin(p \cdot t - \quad)$
W_0 : 150kN (軸圧比約 0.2)
A : 80kN (変動成分の振幅, 軸圧約 0.1) or 0
p : 振動数 2 rad/sec (周期 1 秒) or $\pi/8$ (周期 16 秒)
: 位相差 (0 or π)

表 - 4 水平変位の概要

正弦関数
振幅 7 レベル 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0%
周期 1 6 秒 各振幅で 8 サイクル

*1 近畿大学 産業理工学部 建築・デザイン学科教授 工博 (正会員)

鉛直荷重実験)。鉛直荷重 W_A, W_B は、表 - 3 に示すように、常時荷重を想定した W_0 に変動成分を上乗せする形で表すものとした。ここで、 W_0 は常に 150kN(軸圧比約 0.2 相当)とした。変動鉛直荷重実験の際に上乗せする変動成分は、振幅 A 、振動数 p の正弦関数とした。振幅 A には、80kN(軸圧比約 0.1 相当)、あるいは 0 を、また振動数 p には、2 (周期 1 秒)あるいは $1/8$ (周期 1.6 秒)を採用した。

他方、水平荷重 P は、変動鉛直荷重実験と定鉛直荷重実験とに同一の載荷履歴を採用するものとし、水平変位角 R が表 - 4 に示すような正弦関数で繰り返すよう制御した。すなわち、変位角 R の振幅は 0.5% から 5.0% までの 7 段階とし、各振幅で 8 サイクルずつ繰り返すものである。また周期については、変位角振幅が 4 % まではどの振幅でも 1.6 秒とし、変位角振幅が 5 % のときは 2.0 秒とした。

以上のことから、変動鉛直荷重実験では、例えば周期 1.6 秒で水平方向に 1 サイクル動く間に鉛直荷重は周期 1 秒で 1.6 回の変動をするということになる。これは、水平振動の周期に比べ鉛直振動の周期は極小さいと考えたことを反映した結果である。

図 - 3 は、変動鉛直荷重実験で計測した $W_A,$

W_B, R, P の時刻歴から変位角振幅 2 % の 8 サイクル間 (423 ~ 551sec) を抜粋したものである。図 - 3 で見るとおり、水平変位の繰り返しに伴って左右の鉛直荷重 W_A, W_B が種々に組み合わせられて加力されていることがわかる。

まず、水平変位の第 1 サイクルと第 2 サイクルの 32 秒間は鉛直荷重 W_A, W_B が同位相 ($=0$) で変動しており、この間は $W_A = W_B$ である。次いで水平変位の第 3 サイクルと第 4 サイクルの 32 秒間は鉛直荷重 W_A, W_B が逆位相 ($=\pi$) である。特に第 3 サイクルでは W_A や W_B の周期を水平方向と等しい 1.6 秒としている。これは、転倒モーメントが水平方向と等しい周期で変動する状態に対応する。これに続く第 5 サイクルでは、 W_A, W_B がともに一定値 W_0 を保つ場合であって、鉛直荷重に変動成分は無い。

さらに、水平変位の第 6 サイクルと第 7 サイクルでは、鉛直荷重 W_A, W_B のどちらか一方は変動するが他の方は W_0 を一定に保つように加力されている。そして最後の第 8 サイクルで再び W_A と W_B が同相となって、第 1 サイクルあるいは第 2 サイクルのときと同様に $W_A = W_B$ を保ったまま周期 1 秒で鉛直荷重が変動する加力である。このように、 W_A と W_B に種々の組み合わせ

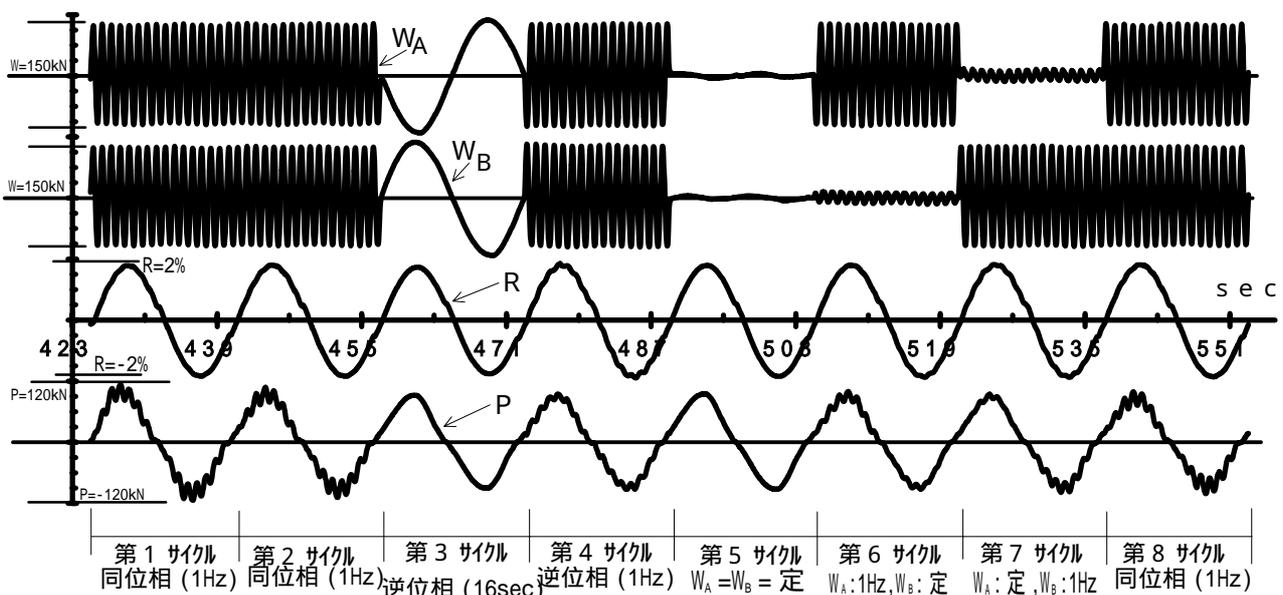


図 - 3 水平変位角振幅が 2 % の 8 サイクル間における各種時刻歴

せを設定することによって多様な鉛直荷重下での復元力特性を比較・検討できると考えた次第であり、水平変位角の他の振幅段階の場合でも図 - 3 と同様の W_A と W_B の組み合わせで加力した。

ところで、図 - 3 の最下段は水平荷重 P であるが、この波形に細かい凹凸のあることがわかる。この凹凸は、その大小がところによって異なり、その時点における鉛直荷重 W_A 、 W_B の有様によって異なっている様子が覗える。

3. 実験結果

損傷は、変動鉛直荷重実験と定鉛直荷重実験でほぼ同様の経過で進行した。変位角振幅が 1% の第 1 サイクルで曲げ降伏し、その後荷重の繰り返しにより柱頭部、柱脚部で曲げ亀裂や斜め亀裂による損傷が進行し、かぶりコンクリートが剥離・落下しながら断面欠損が進む経過である。当初、左右の両柱の損傷はほぼ同時に進行し、その進行も緩やかであったが、変位角振幅が 4% に達した段階から損傷が急速に進み、変位角振幅 5% の繰り返しで右柱 (B 柱) 頭部の圧潰が著しく進行した。

荷重 P - 変位角 R 曲線は、図 - 4、図 - 5 のように描かれていた。変動鉛直荷重実験の P - R 曲線 (図 - 4) には、全体にわたって不規則な凹凸があり、水平荷重 P が変動していることがわかる。この凹凸は、鉛直荷重の変動に呼応して表れるものであり、鉛直荷重が大きくなる時 P も大きくなり、逆に鉛直荷重が小さくなる時 P も小さくなっていった。そして、この傾向は、 W_A と W_B が同位相で変動する場合に特に顕著であった。

図 - 4 と図 - 5 を比べて興味深いのは、最大水平荷重の値が変動鉛直荷重実験 (図 - 4) と定鉛直荷重実験 (図 - 5) でほぼ等しい値を示していたことである。ちなみに、これらの値は、日本建築学会の曲げ終局強度略算式で柱軸力を W_0 の値である 150kN とし算出した結果と等しいものであった。

4. 鉛直荷重の変動と水平荷重の変化

図 - 6 は、図 - 4、図 - 5 の P - R 曲線からスケルトンカーブに相当する部分 (初めて経験する変位を進む過程) を抜粋して描いたものである。図 - 6 によれば、変動鉛直荷重実験に表れる凹凸は、変位角が $R = 1.5 \sim 2.0\%$ の丁度最大水平荷重を示す辺りで凹凸の落差も大きくなり、その値はほぼ 30kN であって、最大水平荷重の 27% に達していることが読み取れる。また、変動鉛直荷重実験のスケルトンカーブは常に定鉛直荷重実験のスケルトンカーブより下に

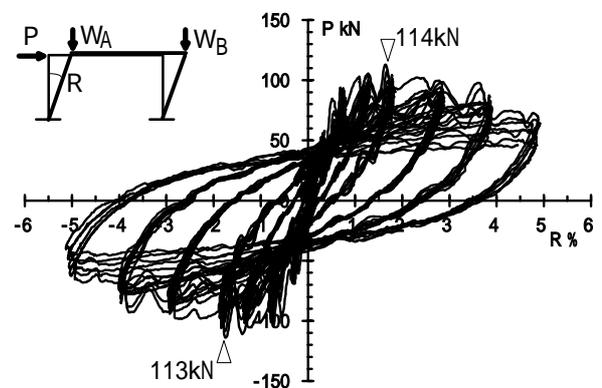


図 - 4 荷重 - 変位角曲線 (変動鉛直荷重実験)

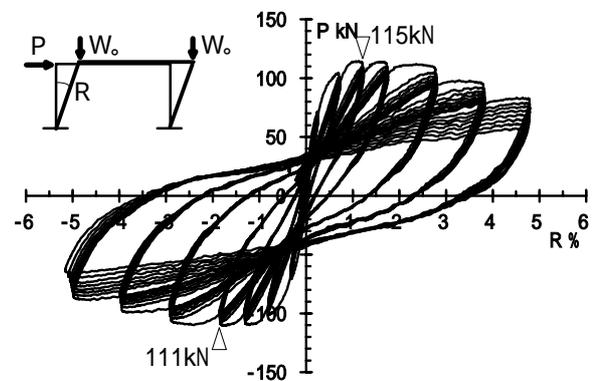


図 - 5 荷重 - 変位角曲線 (定鉛直荷重実験)

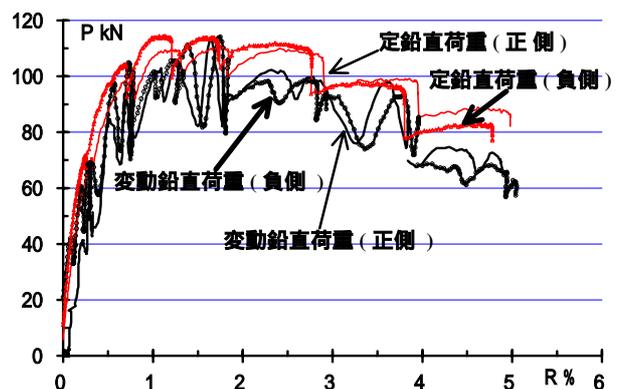


図 - 6 スケルトンカーブ

あって、しかも凹凸の頂部が定鉛直荷重実験のスケルトンカーブに接するような形で描かれていることがわかる。

変動鉛直荷重実験のP-R曲線(図-4)から変位角振幅2.0%における8サイクルの部分抜粋して示したものが図-7である。図-7にもやはり水平荷重Pの変動による履歴曲線の凹凸がみられる。この凹凸は、スケルトンカーブの場合と同様に、水平荷重Pの大きい領域、ループの頂点に近い領域で凹凸の落差も大きくなっていることがわかる。この傾向は特に、第1, 第2, 第8サイクルの W_A と W_B が同相で変動する場合の載荷過程で顕著に表れている点が注目される。

図-8と図-9は、図-4, 図-5のP-R曲線からそれぞれ変位角振幅2.0%における第2と第5サイクルの履歴ループを抜粋して重ねて描いたものである。図-8の2つのループを見ると、図-6のスケルトンカーブの場合と同様に、変動鉛直荷重実験のループは常に定鉛直荷重実験のループよりも水平荷重の低い側に描かれ、しかも凹凸の頂部が定鉛直荷重実験のループに接するような形で描かれていることがわかる。この傾向は図-9にも表れている。図-9では、鉛直荷重が変動しない時間帯である第5サイクルの履歴ループではあるが、変動鉛直荷重実験のループは常に定鉛直荷重実験のループよりも荷重の低い側に描かれている。

5. 水平荷重のモデル化

鉛直荷重の変動は水平荷重に凹凸をもたらすことをこれまでの実験結果が示している。そこで次は、簡単な数式モデルで表した水平荷重Pを用いて、凹凸振幅の検討を試みる。

まず、図-10に示すように、鉛直荷重の各1サイクルに対応する時間(ここでは1秒)で水平荷重Pの波形を区切り、各区間ごとのPを時刻tの関数として表すモデルを考える。ここではPを2次関数と正弦関数を重ね合わせるものとして、次式で表した。

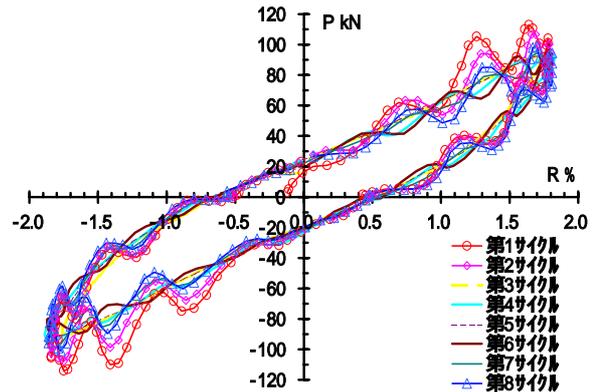


図-7 変位角振幅2%における履歴ループ

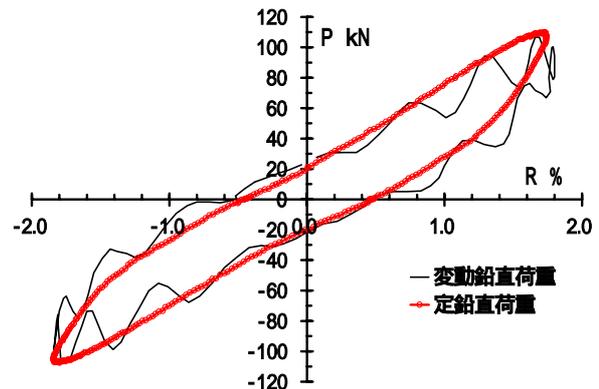


図-8 履歴ループ(第2サイクル, 変位角振幅2%)

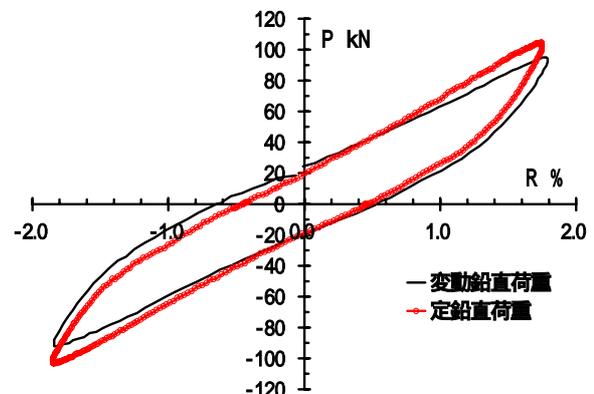
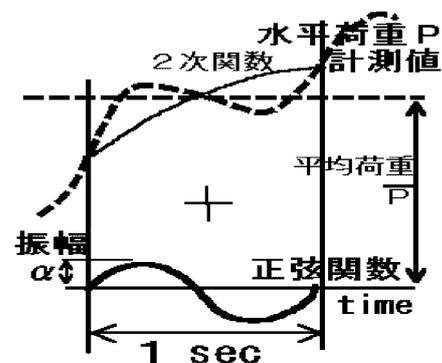


図-9 履歴ループ(第5サイクル, 変位角振幅2%)



$$\text{水平荷重 } P = \text{正弦関数} + \text{2次関数}$$

図-10 水平荷重のモデル化

$$P = a_j \cdot \sin(p \cdot t) + b_j \cdot t + c_j \cdot t + d_j \cdot t^2 \quad (1)$$

ここに、 p ：鉛直荷重 W_A の振動数
 (この実験では、常に $p = 2$)
 a_j ：水平荷重 P の凹凸部の振幅
 b_j, c_j, d_j ：2次関数に係わる定数
 j ：区間番号

鉛直荷重の周期は常に1秒である。そのため例えば、変位角振幅2%における水平変位1サイクルの所要時間は16秒であるから、この1サイクルは16の区間に分割されることになる(図-11)。式(1)の各係数 a_j, b_j, c_j, d_j は、水平荷重 P の計測値を基に最小二乗法で定めることができる。

こうして定めた係数を式(1)に代入して求めた水平荷重 P は、例えば変位角振幅2%における第2サイクルの P を計測値に重ねて描くと図-11のような結果となる。図-11を見ると式(1)による P と計測値は、まったくと云ってよい程に重なっており、モデルと計測値とは一致していることがわかる。これより、振幅 a_j によって水平荷重における凹凸成分の大小を評価してもよいと考えられる。

さらに図-12は、図-11の時刻歴の値を用いて水平荷重 P -変位角 R 曲線として描いたものである。図-11や図-12の正弦成分によれば、図-7で凹凸成分の大きさについて指摘したことをよりわかりやすく見ることができる。

図-13は、図-11や図-12と同様に変動鉛直荷重実験における変位角振幅が2%の履歴曲線の中から第6サイクルの P を抜粋してモデルと計測値を重ねて描いたものである。図-13に見られる特徴は、水平変位角 R の正側領域と負側領域で正弦成分が大きく異なることである。 R の正側領域では正弦成分の振幅が大きく(約10kN)、負側領域では小さい(約5kN)。なお、図示はしていないが第7サイクルでも同様の特徴が見られ、第7サイクルの場合は R の負側領域では凹凸の成分が大きく、正側領域では小さい結果となっていた。

これらのことから、 W_A と W_B の二つの鉛直荷重のうちどちらか一方の鉛直荷重だけが変動するとき、例えば図-13の場合のように左の鉛直荷重 W_A が変動するときは、架構が右に傾いているときに柱の鉛直荷重の変動による水平荷重の変化が大きく、逆に架構が左に傾いているときは、水平荷重の変化が小さいということを示している。

図-3で示した通り、第6サイクルでは鉛直荷重が W_A は変動(軸圧比約0.1~0.3相当)するものの W_B は常に W_0 (軸圧比約0.2相当)

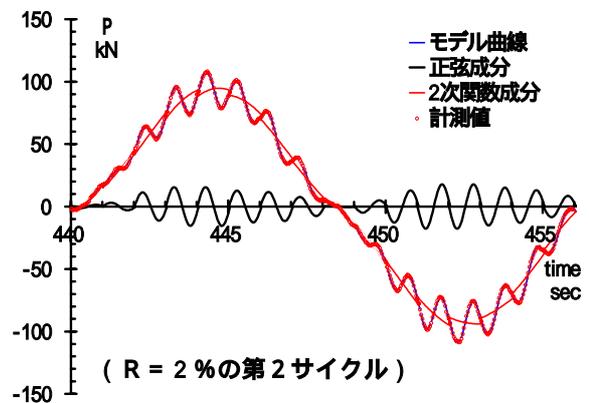


図-11 モデル曲線と計測値の比較(1)

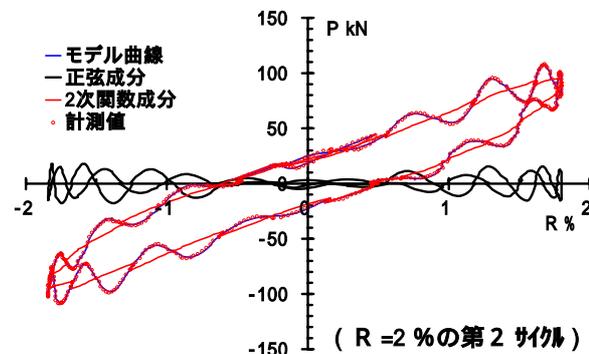


図-12 モデル曲線と計測値の比較(2)

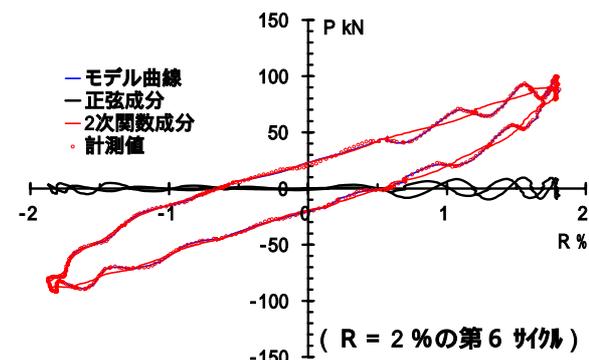


図-13 モデル曲線と計測値の比較(3)

を保つよう制御されている。従って、この間の柱の軸力も概ね、左柱（A柱）で変動が大きく、右柱（B柱）の変動は小さいと考えられる。このとき、水平荷重 P が正の場合は左柱（A柱）は引き抜き側となり、梁のせん断力の影響を受けて左柱の軸力は右柱（B柱）よりも小さい値を中心に変動することになる。他方、 P が負の場合は左柱は圧縮側となるので左柱の軸力は大きい値を中心に変動することになる。

釣り合い軸力より小さい軸力を受けるRC柱では、一般的なNM耐力相互関係が示すように、軸力が釣り合い軸力から離れる程、軸力差による曲げ終局強度の違いが大きくなる。このことは、図 - 13に見られるRが正側にあるときと負側にあるときとで P の凹凸の大小が異なることと定性的には一致する。しかし、 P が 100kN のときの梁のせん断力は 30kN 程度であると考えられ、この値が柱の軸圧比としては 0.04 という小さい値に相当するので、R の正負が P の凹凸の大小に及ぼす定量的な影響は極く小さいと判断される。変動鉛直荷重と P の凹凸の関係は、今後、解析的に検討する計画である。

変動鉛直荷重実験における変位角振幅 2% の履歴曲線の中から鉛直荷重が周期 1 秒で変動している場合の水平荷重 P について正弦成分の振幅を求めてプロットしたところ、図 - 14 が得られた。図 - 14 の横軸は、各 P に対応する 1 秒間の平均水平荷重 \bar{P} (図 - 10) である。

図 - 14 によれば、第 1, 第 2, 第 8 サイクルの R は、平均水平荷重 \bar{P} の増加に伴って増大し、 \bar{P} が 100kN のとき R は 15kN を超えることがわかる。このことは、凹凸の全振幅が 30kN 以上になるということを示すものである。すなわち、左右の柱の軸力が軸圧比で 0.1 ~ 0.3 の間を短い周期で変動するとき、復元力は保有耐力の 30% 程度の変化をするということである。

次に、図 - 14 の第 4 サイクルの R に着目すると、この場合は、 \bar{P} の値によらず R が約 7kN を示すことが読み取れる。第 4 サイクルは、左右の鉛直荷重が逆位相で、かつ周期 1 秒で変動

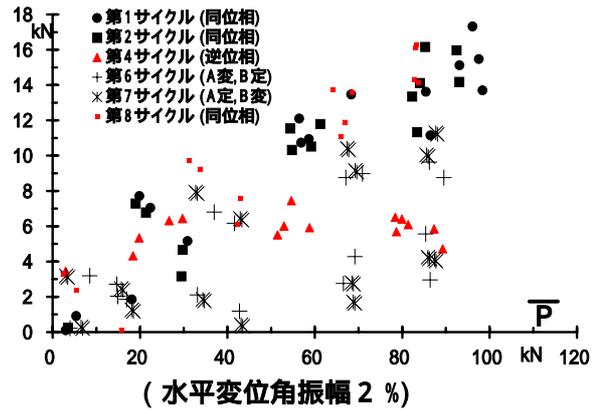


図 - 14 変動振幅 と水平荷重 \bar{P} の関係

する場合である。これは、高次モードのように短い周期で転倒モーメントが変動する状況に相当するが、このような場合は、柱の軸力変動による復元力の変化は、水平変位がどこにあってもほぼ同じであって、その変化量も大きくないことを示唆している。さらに図 - 14 の第 6, 第 7 サイクルを見ると、このときの R は、2つのグループに分けられることがわかる。一つは、第 1, 第 2, 第 8 サイクルの R とほぼ重なるように \bar{P} の増加に伴って R も増大するグループ、他は、 \bar{P} が増加しても R が 4kN 以下に留まるグループである。このように 2つのグループに分かれるのは、図 - 13 の例で述べたことが反映したものであり、左右の鉛直荷重のうちのどちらか片方だけが変動するときは、水平変位が正負のどちら側に位置するかによって水平荷重の凹凸が異なることに起因するものである。

6. まとめ

鉛直荷重の変動の有様によって水平荷重に表れる凹凸の様相は異なることがわかった。

特に、軸圧比で 0.1 ~ 0.3 の間を柱の軸力が変動するとき、復元力が保有耐力の 30% 程度の変化をする場合のあることを強調したい。

参考文献

- 1) 平松晃：転倒モーメントによる柱軸力の変動が 1 スパン RC ピロティ建築物の地震応答に及ぼす影響、日本建築学会九州支部研究報告、第 4 1 号、pp.265-268、2002、03