ランダム波を受ける剛体ブロックのロッキング振動*

鄭 萬 溶^{*1}, 鈴木 浩 平^{*2}

Rocking of Rigid Block under Random Wave Excitations

Man-Yong JEONG^{*3} and Kohei SUZUKI^{*3} Department of Digital Engineering, Numazu College of Technology,
3600 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka, 410-8501 Japan

This investigation deals with the rocking response of rigid blocks subjected to narrow band random excitations. The numerical procedure and computer program are developed to solve the nonlinear equations of motion governing the rocking motion of rigid blocks on rigid base subjected to horizontal excitations. The analytical results presented show that the response of the block is very sensitive to small changes in its slenderness ratio, the energy dissipation, the friction condition between block and base, and the details of ground motion. Systematic trends are not apparent: The stability of a block subjected to a particular ground motion does not necessarily increase monotonically with decreasing slenderness ratio or excitation intensity, occurrence of sliding motion, increasing bandwidth of random wave. Overturning of a block by a ground motion of particular intensity does not imply that the block will necessarily overturn under the action of more intense ground motion. In contrast, systematic trends are observed when the problem is studied from a probabilistic point of view with the ground motion modeled as a random process. The probability of a block exceeding any response level, as well as the probability that a block overturns, increases with increase in ground motion intensity and slenderness ratio of the block, and occurrence of violent sliding motion.

Key Words: Rocking Vibration, Nonlinear, Phase Diagram, Stable Condition, Shape Ratio, Random

1. 緒 論

墓石, 石材遺跡, 大型コンピュータなどをはじめ本棚, 冷蔵庫, 筆筒などの家具類まで, その底部が拘束されていないブロック型構造物は, 地震時に転倒, 移動, 落下などにより損傷を受けることが多い。特に, コンピュータの転倒による制御システムの損傷はライフラインの麻痺などの大規模の二次災害につながる恐れがあり, その対策が重視されている。

著者らを含む多くの研究者たちは, これまで正弦波励振を受けるブロック型構造物のロッキング振動特性について, 実験と解析の両面から研究を行い, その非線形挙動特性を明らかにしてきた^{1)~3)}。しかし, ロッキング振動系がかなり非線形性の強い系であるため, 正弦波によるブロックの安定条件をブロック型構造物の耐震設計にそのまま適用するわけにはいかない。そのため, ランダム波および実地震波励振によるロッキング振動特性についても詳細な考察が必要である。

Housner は単一矩形パルス, ハーフサインパルスによるブロックの転倒条件を定め, ブロック型構造物

の耐震設計における基本的な基準を定めた。これに基づき, Yim らは模擬地震波を用いた数値解析によって, 反発係数, 励振加速度の最大値, 寸法比, ブロックの大きさなどのロッキングシステムパラメータや励振パラメータに対して統計的に転倒条件を明らかにした^{4)~6)}。

これらの研究では, ブロックの転倒にはブロックの大きさへの依存性が強くロッキング応答がすべてのパラメータの微小変化に対して鋭敏に反応することに注目しそれらの変化に対する挙動特性を明らかにしてきた。また, これらの研究では, ブロックと基礎が衝突したときのエネルギー消費を表す反発係数もブロックの転倒条件に大きく影響することが明らかになった。しかし, ブロックの大きさ, ブロックの寸法比, 反発係数以外のシステムパラメータにもブロックの転倒に大きく影響する要素があり, その中でブロックと基礎間の摩擦係数はブロックのロッキング振動に大きく影響する重要な要素となる。また, 実際のロッキング振動系では, 特にブロックの縦横寸法比が小さい場合には, 滑りが発生しやすくそれによって応答が大きく変わる可能性があるため, 考慮すべき重要な要素となる。

そこで, 本研究では, 滑りを考慮したロッキング振動モデルを用いて, ランダム波の一例として, 一定

* 原稿受付 2005 年 5 月 16 日。

^{*1} 正員, 沼津工業高等専門学校電子制御工学科(〒410-8501 沼津市大岡 3600)。^{*2} 正員, 東京都立大学大学院工学研究科(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)。

E-mail: jeong@numazu-ct.ac.jp

の周波数帯域幅をもつホワイトノイズを入力としてロッキング応答解析を行い、励振力の振幅や周波数特性、滑りなどがロッキング振動応答に与える影響について調べる。また、ロッキング振動の非線形性を考慮してブロックの転倒を統計的に評価するため、いくつかの周波数帯域幅をもつ入力波を想定し、その帯域幅毎に乱数の初期値の異なる 10 個のランダム波を作成し、それを励振力として加えたとき、ブロックが転倒にいたる確率についても評価を行なう。

2. 非線形ロッキング振動モデル

非線形ロッキング振動モデルの概要を図 1 に示す。ここで、 B , H , R はそれぞれブロックの横幅、高さ、重心からブロック下端までの距離であり、 H/B はブロックの形状を表す寸法比（形状比）である。また、 ψ はブロックの形状角であり、 θ はロッキングによる回転変位である。さらに、 $a_h(t)$ と $a_v(t)$ はそれぞれ水平方向と垂直方向の励振力であり、本研究ではランダム波励振力となる。

Fig. 1 Rocking of rigid block

運動方程式の導出の詳細については参考文献^{9,10}を参照されたい。ここでは、無次元化された運動方程式と反発係数などの結果式のみを示すことにする。

$$\ddot{\theta} + p^2 f_1(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X}) = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{X} + p^2 f_2(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X}) = -\frac{a_h(\tau)}{R} \quad (2)$$

ここで $f_1(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X})$ と $f_2(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X})$ は次式で与えられる。

$$f_1(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X}) = \frac{S(\theta)\{\sin\psi(1-|\dot{\theta}|) + S(\theta)S(\dot{X}_o)/4 \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\} \ddot{\theta} + \frac{a_v(\tau)}{g} - \gamma \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\dot{\theta}_p^2}{(1+\gamma \sin^2\psi(1-|\dot{\theta}|) + \gamma S(\theta)S(\dot{X}_o)/4 \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\sin\psi(1-|\dot{\theta}|))} \quad (3)$$

$$f_2(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{X}) = \frac{S(\theta)S(\dot{X}_o)/4 \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\{\ddot{\theta} + \frac{a_v(\tau)}{g} - \gamma \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\dot{\theta}_p^2\}}{\gamma(1+\gamma \sin^2\psi(1-|\dot{\theta}|) + \gamma S(\theta)S(\dot{X}_o)/4 \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\sin\psi(1-|\dot{\theta}|))} \quad (4)$$

ここで

$$\gamma = \frac{mR^2}{I_o}, I_o = \frac{4mR^2}{3} \quad (5)$$

また、ブロック端の無次元化水平方向の変位 X_o と速度 $\dot{X}_o$ 次のようになる。

$$X_o = X - S(\theta)\sin\psi(1-|\dot{\theta}|) \quad (6)$$

$$\dot{X}_o = \dot{X} + \cos\psi(1-|\dot{\theta}|)\dot{\theta} \quad (7)$$

また、符号関数 $S(a)$ は次のように定義され、

$$S(a) = 1(a > 0) \quad (8)$$

$$S(a) = -1(a < 0) \quad (9)$$

無次元化量はそれぞれ $\theta = \theta/\psi$, $\dot{\theta}_p = \dot{\theta}/p$, $\tau = pt$,

$\Omega = \omega/p$, $X = x/R$ と $X_o = x_o/R$ となり、

$$p^2 = \frac{mgR}{I_o} = \frac{3g}{4R} \quad (10)$$

衝突後の速度成分 $\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$ と $\dot{\theta}_2$ は衝突前の成分 $\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$ と $\dot{\theta}_1$ によって与えられる。

$$\dot{X}_2 = -\frac{H\psi}{2R}\delta_1\dot{\theta}_1 \quad (11)$$

$$\dot{Y}_2 = -S(\theta_1)\frac{B\psi}{2R}(\delta_1 + 2e)\dot{\theta}_1 \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_2 = \delta_1\dot{\theta}_1 \quad (13)$$

衝突時に滑りが発生する条件は

$$\bar{\mu}_s < \left| \frac{H(\delta_1 + \lambda_x)}{B(1 + \delta_1 + 2e)} \right| \quad (14)$$

となる。また、衝突時に滑りが生じない場合のエネルギー消耗率 δ は次式で与えられる。

$$\delta_i = 1 - \frac{3}{4}(1 + \lambda_x)\cos^2\psi - \frac{3}{2}(1 + e)\sin^2\psi \quad (15)$$

ここで、速度比 λ_x と反発係数 e は次のようになる。

$$\lambda_x = \frac{2\dot{X}_1}{H\dot{\theta}_1} \quad (16)$$

$$e = 1 - \frac{3}{2}\sin^2\psi \quad (17)$$

ここで $\bar{\mu}_s$ は、衝突時のブロックと基礎間の静摩擦係数であり、衝突時に滑りが発生した場合の衝突前後の速度関係式は次のようになる。

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + S(\theta_1)S(\dot{X}_{i2})\bar{\mu}_k\frac{B\psi}{2R}(1 + \bar{\delta}_1 + 2e)\dot{\theta}_1 \quad (18)$$

$$\dot{Y}_2 = -S(\theta_1)\frac{B\psi}{2R}(\bar{\delta}_1 + 2e)\dot{\theta}_1 \quad (19)$$

$$\dot{\theta}_2 = \bar{\delta}_1\dot{\theta}_1 \quad (20)$$

ここで、 $\bar{\mu}_k$ は衝突時の動摩擦係数であり、滑りが発生時のエネルギー消耗率 $\bar{\delta}_1$ は次式で与えられる。

$$\bar{\delta}_i = \frac{1 - 3\{1 - S(\theta_1)S(\dot{X}_{i2})\bar{\mu}_k \frac{H}{B}\}(1 + 2e)\sin^2 \psi}{1 + 3\{1 - S(\theta_1)S(\dot{X}_{i2})\bar{\mu}_k \frac{H}{B}\}\sin^2 \psi} \quad (21)$$

上式において、 $S(a)$ は符号関数であり、例えば、 $S(\theta_1)$ は衝突直前の回転変位 θ の符号を表す。また、 $S(\dot{X}_{i2})$ は衝突端の水平方向の衝突後の速度である。

3. ランダム波励振によるロッキング振動

本研究では、地震波に対するブロックの転倒について考える前の布石として、定常ランダム波励振によるロッキング振動特性について、滑りなしと滑り発生の両方の場合に対して応答解析を行い、その応答特性と転倒の有無について調べた。数値計算には時間刻みを変化に柔軟に対応できる Ralston の最適ルンゲクッタを用いた。また、誤差が 10^{-8} 以下になるまで時間刻みを変化させながら数値積分を行なった。

3・1 励振入力 入力波は入力の低周波成分がロッキング応答に大きく影響することから周波数の上限を 50Hz とし、帯域幅をそれぞれ 1-5Hz, 1-10Hz, 1-15Hz, 1-20Hz, 1-50Hz と定め、各々の帯域幅に対して定常ランダム波を作成した。各々の周波数帯域幅をもつ定常ランダム波の時系列とパワースペクトルを図 2 と図 3 に示す。ただし、図 3 では周波数帯域幅 1-50Hz の場合のパワースペクトルは省略した。

Fig. 2 Time histories of stationary random wave with different frequency bandwidth

0 から 1Hz までの周波数成分はロッキング振動応答に及ぼす影響が大きすぎるため、その領域の周波数成分のエネルギーレベルを十分小さくした。また、それぞれの帯域幅の入力波形は、乱数の初期値を 0 から

9 まで変化させることによりそれぞれ異なった時系列特性をもつ 10 個の定常ランダム波を作成することができた。このとき、最大振幅は約 1g になるようにした。

Fig. 3 Power spectral densities stationary random wave with different frequency bandwidth

Fig. 4 Time histories of stationary random wave with identical frequency bandwidth

周波数帯域幅 1-10Hz のランダム波時系列の例を図 4 に示す。図 4 は上から順に乱数の初期値が 0 から 4 に対応する定常ランダム波の時系列を示す。乱数の初期値 5 から 9 までの波形は省略する。これらの波形は同一周波数特性を持つが、それらによるロッキング振動応答はそれぞれ異なったものとなる。

3・2 滑りが発生しない場合 滑りを伴わない場合、ロッキング振動応答は系の固有の特性を定めるプロッ

クの寸法比, 大きさ, 反発係数などのシステムパラメータや, 励振周波数と励振振幅の励振パラメータに左右される。しかしながらランダム波励振を受けるブロックのロッキング振動特性は, 非線形性が強いいため, これらのパラメータに対して決定論的方法ではその評価が非常に困難である。したがって, 前述した同一周波数特性をもつ時系列特性が異なる 10 個の定常ランダム波に対する転倒確率について評価することとする。本論文では, 簡便のため, ブロックの大きさ R を 206m に固定し, ブロックの寸法比の変化や励振振幅の変化によるロッキング振動特性について考えることにする。

3・2・1 励振振幅比による影響 定常ランダム波の振幅比は 0.1 刻みで 0.6 から 1.5 まで振幅比を変えることにより, 振幅比がロッキング振動に与える影響を調べた。ここで, 振幅比とは元のランダム波と全体に定数倍したとき, その定数, すなわち, 波形の最大値の比を意味する。

Fig. 5 Time histories of rocking responses by random excitation (band-width of random wave: 1-5Hz, initial value of random number: 0)

ここでは, 励振波の周波数帯域が 1-5Hz で乱数の初期値が 0 である場合の応答時系列の一部 (位相図は省略) を図 5 に示す。図 5 に表されているように, 振幅比の増加とともにブロックの転倒が早まる傾向を示している。しかし, ブロックの寸法比が小さければ小さいほど振幅の変化がブロックの転倒に与える影響が小さくなる。図 5 に示されているロッキング応答と同様に周波数帯域帯幅が 1-5Hz で励振力を作成するときの乱数の初期値が 1 の場合のロッキング応答時系列を図 6 に示す。また, 図 6 の (a) から (d) に示されたロッキング応答の位相平面上の軌道を図 7 に示す。

Fig. 6 Time histories of rocking responses by random excitation (band-width of random wave: 1-5Hz, initial value of random number: 1)

図 6 の場合にも, 図 5 と同様に振幅比の増加とともに最大応答振幅が早まる傾向を示している。また, 図 7 に示されているように, 励振時間の経過と共に応答振幅が大きくなる方向で応答軌道が螺旋状に発展している。そして, この図に示されているように, 回転変位と回転速度がともに小さい領域内では励振力が応答に及ぼす影響も小さい。逆に回転変位と回転速度がともに大きい領域では, 励振力の微小変動に対するロッキング応答の依存性が大きくなる。これらは正弦波励振を受けるブロック構造物のロッキング振動に関する過去の研究結果からも明らかである (4, 5, 6, 7, 8, 9)。

Fig. 7 Phase diagrams of rocking responses by random excitation (band-width of random wave: 1-5Hz, initial value of random number: 1)

これを正弦波によるロッキングに関連付けて説明すると, 回転変位と回転速度が, ロッキング応答形

態が高次モードになる条件, すなわち, 回転変位が 0 になる前に基礎の揺れ方向が変化する条件となると, その後の運動は非常に不安定なものとなり, 一気に転倒に向かう可能性が高い。

3・2・2 入力波による影響 図 6 と同様の条件で励振波の周波数帯域幅が 1-15Hz に変化したときの応答を図 8 に示す。これを図 6 と比較してみると, ロッキング応答の最大振幅が小さくなっている。また, 図 8 の(a)から(d)に対応するロッキング応答を図 9 に示す。

Fig. 8 Time histories of rocking response by random excitation (bandwidth of random wave: 1-15Hz, initial value of random number:1)

Fig. 9 Phase diagrams of rocking response by random excitation (bandwidth of random wave: 1-15Hz, initial value of random number:1)

図 7 と図 9 を比較すると, 図 7 では, ロッキング応答軌道が位相平面の広い範囲に広がっているのに対

し, 図 9 の位相図では狭い範囲に収束している。計算結果のほとんどは図 9 のような傾向を示したが, 一部, 転倒を示すケースもあった。紙面の関係で示せないが, 転倒する場合には, ロッキング位相の変化が入力位相の変化に追いつかなくなり, 狭い範囲の領域から一気に抜け出し転倒に至ることもあった。

3・2・3 ブロックの寸法比による影響 前述したように, ブロックの大きさ R を 206m に固定し, 励振振幅を 1, 周波数帯域幅を 1-15Hz, とし, ブロックの寸法比を 1, 2, 3 と 4 にしてロッキング応答を計算し考察を行なった結果, ブロックの寸法比が小さいと, ロッキング応答振幅も小さくなり, ブロックが転倒する可能性も低くなった。特に, ブロックの寸法比が 1 と 2 の場合には, 応答振幅が小さい範囲に止まっていた。しかし, これらの結果には, ブロックの大きさ R が等しい, すなわち, ロッキング周期が等しいという条件下で成り立つものである。

また, 正弦波励振を受けるブロック構造物のロッキング振動に関する過去の研究結果からも明らかであるように, ブロックの寸法比が大きいと励振力の微小変化に対する影響が大きく応答時系列も高周波成分を多く含むものになる。すなわち, ブロックの寸法比が増加すると, 衝突時のエネルギー消耗が小さくなり, ロッキング振動の非線形性も強くなる。これによって, ブロックが転倒する可能性が高くなるだけではなく, 途中から混入することが考えられる外部からの動揺に対する影響も大きくなり, それによって実際にはブロックが転倒する可能性も解析結果より高くなることが予想される。

3・2・4 転倒確率 一般にこの種の非線形現象では, 決定論的な評価が困難である。そのため, 本研究では, 乱数の初期値の異なる 10 個の定常ランダム波励振によるロッキング応答について制限時間内にブロックが転倒した回数を明らかにし, それについて考察を行なった。

Table 1 Overturning probabilities in the case of without-sliding

Intensity	Frequency bandwidth				
	1-5	1-10	1-15	1-20	1-50
0.6	2/10	0/10	0/10	0/10	0/10
0.7	3/10	0/10	1/10	0/10	0/10
0.8	6/10	2/10	2/10	1/10	0/10
0.9	4/10	4/10	0/10	0/10	0/10
1.0	7/10	4/10	1/10	1/10	0/10
1.1	10/10	5/10	1/10	3/10	0/10
1.2	10/10	5/10	4/10	1/10	1/10
1.3	10/10	9/10	4/10	3/10	1/10
1.4	10/10	9/10	7/10	3/10	2/10
1.5	10/10	9/10	6/10	3/10	1/10
Total	72/100	47/100	26/100	15/100	5/100

表 1 におおのの振幅比と周波数帯域に対する転倒回数を示した。ここでは、ブロックの大きさ R は 206m とし、ブロックの寸法比 H/B は 4 にした。表に示されているように、周波数帯域が狭いほうが転倒する可能性が高くまた当然のことながら振幅比が大きくなればなるほど転倒する可能性が高くなる傾向を示している。

3・3 滑りが発生する場合 正弦波励振によるロッキング振動に関する過去の研究において、滑り運動は入力の時系列特性とロッキング応答の位相との関係によって大きく影響されることを明らかにしている^{①②}。すなわち、滑り運動は、単純に入力の振幅だけに依存するのではなく、入力と応答の位相差に関係し、滑り発生後の応答形態も大きく変化する。

3・3・1 ブロックの寸法比による影響 ブロックの大きさ R を 206m に固定し、ブロックの寸法比を 1, 2, 3 と 4 にしたとき、ブロックの寸法比がロッキング応答と滑り運動に与える影響を調べた。まず、寸法比が 1 の場合には励振振幅の最大値が 1 以下の励振力に対してはロッキングが発生しなく横滑りのみが発生する。また、寸法比 2 の場合にはロッキングは発生するものの、転倒する例は見られなかった。入力波の周波数帯域幅が 1-15Hz、振幅比 1、ブロックの寸法比 4、ブロックと基礎間の静摩擦係数を 0.35、動摩擦係数を 0.3、入力波の乱数の初期値を 0 から 4 までの入力に対する応答を計算した結果を図 10 に示す。以下の滑り変位を表すグラフに矩形パルス状に表されている部分は衝突時の滑り発生とそのときの滑りによる水平方向の変位を意味し、曲線状で表される部分は回転運動時の滑りの発生とそのときの滑りによる水平方向の変位を表す。

図 8 の滑りなしの場合には転倒が見られなかったのに対して、滑りが発生する場合の応答では転倒を示すことがあった。その一例を図 10 に示す。これは、次節で議論する滑りが転倒確率に与える影響の一般的特性とは異なり、滑りが発生することによって転倒の割合が大きくなった。図 10 の(a)以外の場合には応答の最大振幅が大きくなっている。すなわち、ブロックの寸法比が大きければ大きいほど滑り運動がロッキングに与える影響が大きいくことがわかる。逆に、紙面の関係上示さないが、ブロックの寸法比が小さい場合、滑りが発生することによってロッキング応答変位も小さくなる。また、回転運動時に発生した滑りが小さければ、滑りによる影響も小さい。

Fig. 10 Time histories of rocking response and sliding displacement by random excitation (band-width of random wave: 1-15Hz, initial value of random number: 0-4, $\mu_s = 0.35$, $\mu_k = 0.3$)

以上のことを総合して考えると、ブロックの寸法比が小さい場合には滑りが激しく、滑り運動に取られた分だけ回転運動に対する運動エネルギーが小さくなり、ブロックが転倒に至る可能性も低くなる。しかし、ブロックの寸法比が大きい場合には滑り運動は小さいが、滑りが発生したときに滑り運動がロッキング応答に与える影響は大きくブロックが転倒する可能性も高くなる。その理由はブロックの寸法比がある程度大きい場合には衝突時のエネルギー消耗率が極端に大きくなり、衝突後の運動が大きく変化するからである。

ブロック寸法比の変化により、同一入力に対しても応答の形態がまったく異なったものとなる。ここでは、一般的傾向としてブロックの寸法比が小さくなれば、ロッキング応答振幅も小さくなりブロックが転倒する可能性も低くなる。しかし、これはすべての応答を総合的に考えたときに言えることであり、基本的な応答形態は各々の励振波の時系列の詳細に大きく依存する。また、ブロックの大きさが等しい

とき、ブロックの寸法比が小さければ小さいほど応答振幅が大きくなりやすく転倒する確率も低くなる。

3・3・2 滑り運動がブロックの転倒に与える影響

ブロックと基礎間の静摩擦係数を 0.4、動摩擦係数を 0.35 に固定し、入力波の振幅比を 0.6 から 1.5 まで 0.1 間隔で変化させながら応答を計算しブロックの転倒有無を調査した。その結果を表 2 に示す。

Table 2 Comparison of overturning probabilities for without-sliding and with-sliding

Intensity	Frequency bandwidth				
	1-5Hz	1-10Hz	1-15Hz	1-20Hz	1-50Hz
0.6	2/102	0/100	0/100	0/100	0/100
0.7	2/103	0/100	1/100	0/100	0/100
0.8	3/106	2/102	2/102	1/100	0/100
0.9	6/104	4/104	0/100	0/100	0/100
1.0	4/107	4/104	1/100	1/100	0/100
1.1	9/100	3/105	0/100	2/103	0/100
1.2	10/100	4/105	2/104	1/100	1/100
1.3	10/100	7/109	4/104	2/103	1/100
1.4	10/100	8/109	4/107	2/103	0/102
1.5	10/100	8/109	7/106	5/103	1/100
Total	71(72)	40(47)	21(23)	14(15)	3(5)

表 2 において括弧の中の数字は滑りなしの場合、10 個の入力波に対して応答が転倒になる回数を表す。双方を比較すると、一般的には滑りが発生する場合の方が、全体的に転倒を示す割合が小さくなっている。しかし、比較的広い周波数帯域幅をもち、励振振幅比も大きい入力に対しては、滑りの発生が原因で転倒の割合が大きくなることもあった。また、入力波の周波数帯域幅が大きい場合には励振振幅比の変化がほとんど転倒の割合に影響しないが、帯域幅が小さい場合にはその影響が大きい。すなわち、励振振幅が小さい場合には、滑りがブロックの転倒に与える影響は、入力波の周波数帯域幅が広ければ広いほどまた励振振幅比が大きければ大きいほど滑り運動が激しくなり、滑り運動がロッキング応答に与える影響も大きくなっている。

3・3・3 動摩擦係数の変化による影響 過去の研究において、滑りが発生した場合の実験ロッキング振動では、ブロックの横滑りによってブロックと基礎の接触状態が変化することがあり、それによって応答の再現性がなくなることが報告された⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。すなわち、滑りによるブロックの位置変化によりブロックと基礎間の摩擦条件に微小変動が生じることがあり、それによってロッキング応答も大きく変化することが明らかにされている。しかし、そのような条件を解析に直接反映することは非常に困難であるため、ここではブロックと基礎間の動摩擦係数のみを微小変化させそれがロッキング応答に与える影響について調べることにする。

過去の研究⁽¹⁰⁾でも明らかになっているように衝突時のエネルギー消耗率が、ロッキング振動に与える影響を調べるため、ブロックと基礎間の動摩擦係数の変化がロッキング応答に与える影響が顕著に現われた例を図 11 に示す。

Fig. 11 Time histories of rocking response and sliding displacement by random excitation (band-width of random wave: 1-15Hz, initial value of random number=4, amplitude rate=0.9)

滑りがロッキングに与える影響が大きいのは、ブロックと基礎間の静摩擦係数が大きければ大きいほど滑りが発生したときにロッキング応答に与える影響も大きくなるがこの検討結果でまず明らかになった。図 11 はブロックの寸法比が 4、周波数帯域幅が 1-15Hz、乱数の初期値が 4、振幅比が 1.2 の場合の応答例を示す。

これらのロッキング応答では、一箇所にのみ衝突時に滑りが発生しその滑り運動がその後の応答に大きく影響するケースの一例である。これは過去の研究でも明らかにしているように、摩擦係数の微小差によって衝突時のエネルギー消耗率が変化し、それによってまた滑りによる横変位とロッキングによる回転変位が異なってくることを表している⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

4 結 論

本研究では、定常ランダム波励振によるロッキング応答解析を行い、それらの結果の評価と考察から次の結論を得た。

(1) 一般的には、励振力の振幅比が大きければ大きいほどロッキング応答の最大振幅が大きくなり、ブロックが転倒する確率も高くなる。しかしながら、励振波時系列の最大値と応答時系列の最大値の位置は必ず一致するわけではなく、励振力の振幅比が大きくなれば、ロッキング応答も必ず大きくなるとは言えない。

(2) 励振波の帯域幅が広くなればなるほどロッキング応答変位が小さくなり、ブロックが転倒する確率も低くなる。その理由はブロックの転倒が励振力の低周波成分の時系列特性に影響されるからである。

(3) ブロックの大きさが小さければ小さいほど、転倒しやすくブロックの寸法比が大きければ大きいほど転倒しやすい。

(4) 滑りがブロックの転倒に与える影響は励振波の帯域幅が広ければ広いほどまた励振振幅比が大きければ大きいほど顕著になる。

(5) ブロックと基礎間の摩擦係数がロッキング応答に与える影響は非常に大きく、摩擦係数の低下が直接滑りによる横変位とロッキングによる回転変位の増加を伴うわけではない。ただし、滑り発生はその後のロッキング応答や転倒の有無に大きく影響する。

(6) ブロックの寸法比が小さい場合の方が同一摩擦条件に対して滑り運動が激しく滑り運動によるエネルギー消耗が大きいため、応答の振幅が小さくなり、転倒する可能性も低くなる。しかし、ブロックの寸法比が大きくなると、滑り運動は小さくなるが、滑り運動がロッキング応答に及ぼす影響が大きくなり転倒する確率も高くなる。

参 考 文 献

(1) Housner, G.W., "The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes", Bulletin of The Seismological Society of America, Vol. 53, N. 2, (1963), 404-417.

(2) Yim, C. S.C., A. K., and Penzien, J., "Rocking response of rigid blocks to earthquakes.", Earthquake Engng. Struct. Dna. 8(6), (1980), 565-587.

(3) Aslam, M., Godden, W. G., and Scalise, D. T., "Earthquake rocking response of rigid bodies", J. Engrg. Struct., ASCE, 106(2), (1980), 377-392.

(4) 鄭萬溶, 鈴木浩平, 剛体ブロック型構造物のロッキング振動に関する基礎的研究, 機論, 62-603, C(1996), 4139-4146.

(5) 鈴木友和, 鄭萬溶, 鈴木浩平, 正弦波を受けるブロックのロッキング振動に関する研究, D&D97, 97-A, (1997), 435-438.

(6) Jeong, Man-Yong and Suzuki, Kohei, "Experimental investigation of rocking vibration on characteristics by two dimensional excitation, The 74-th JSME Spring Annual Meeting Vol.4, (1997), 124-127.

(7) Jeong, Man-Yong and Suzuki, Kohei, "Rocking vibration of rigid block structure subjected to two dimensional seismic excitation, ASME PVP Con. 98' Vol. 364, Seismic Engineering 6, (1998), 327-334.

(8) 鄭萬溶, 鈴木浩平, 二次元正弦波励振を受ける剛体ブロックのロッキング振動におけるカオス (滑りなしの場合), 機論, 65-639, C(1999), 4277-4285.

(9) 鄭萬溶, 鈴木浩平, 滑りを伴う剛体ブロックのロッキング振動に関する研究 (二次元正弦波励振の場合), 機論, 66-648, C(1999), 2540-2548.

(10) 鄭萬溶, 鈴木浩平, 正弦波励振を受ける剛体ブロック構造物のロッキング振動特性, 機論, 66-645, C(2000), 1453-1461.