

I-451 振動外力を受ける剛体ブロックのDEM解析に関する基礎的研究

中央大学大学院

学生員 ○佐藤 唯行

東京大学生産技術研究所

正会員 目黒 公郎

東京大学生産技術研究所

正会員 片山 恒雄

1. はじめに 耐震技術の向上によって近年の地震工学先進国では、地震による構造物の被害はだいぶ減ってきた。その結果、家具などの屋内収容物の振動・移動・転倒などが、人的被害や屋内の様々な設備に損失を与える被害が相対的に目立つようになってきた。これまでも墓石の挙動と震度の関係や地震を受ける基礎の挙動など、振動外力を受ける剛体ブロックの動的挙動の研究が、実験と理論解析によって行われてきたが（例えば1),2),3), 家具のように組み合わせられた複数ブロックの挙動や、サイズや剛性が著しく違うブロックの挙動などは、非線形性が著しく高いことから、実験にしる数値シミュレーションにしる多くの制約を受け、解析が非常に困難であった。ところが、近年の電子計算機的发展（演算速度の高速化・記憶容量の巨大化など）を背景として、複雑な非線形挙動を直接的に数値解析することが可能になってきた。個別要素法(Distinct Element Method, DEM)もそのような数値シミュレーションの一つである。DEMは、要素同士が完全に離れたり、初期と違った要素と接触して新しい応力場を形成するような現象の追及が可能である。従って振動外力を受ける剛体ブロックの滑り、転倒、衝突等の解析法としては、最も適した手法の一つと考えられる。本報告では、振動外力を受ける剛体ブロック(単体+組み合わせ)の挙動解析へのDEM適用の第1歩として、単体ブロックを用いた簡単な実験とDEM解析を行って、ブロックのサイズと剛性、振動外力の周波数特性が挙動に与える影響を調べた。

2. 解析の流れ 図1に解析全体の流れを示す。本研究では、実験と数値シミュレーションの両面から解析を行っているが、実験で用いたブロックは表1のBlock1($b=30, h=100, d=50\text{cm}$)である。また、表1中の k は、Block1を基準とした場合の相似比である。Block1を用いた実験から材料定数(バネ定数、摩擦係数)を算定し、次にDEMを用いた自由振動解析からDEMに用いる時間ステップと減衰定数を決める。その後、単純な振動台実験をDEM解析によって再現し、両者の整合性を確認した上で、実験では再現の難しいケースについてDEM解析を行った。なお、本研究で扱う運動は、1次元加振による直方体ブロックの動的挙動であるので、シミュレーションは四角形要素(奥行き d は単位長)を用いた2次元DEM解析とした。

3. 解析結果 振動台実験に用いたBlock1を基本モデルとして、相似比が0.1, 1, 10, 100となる4サイズ(表1)の各ブロックに対して、剛性比が0.1, 1, 10となる3ケースのバネ定数を与えてDEM解析を行った。また、ブロックの挙動と振動外力の周波数特性の関係を調べるために、上記の12ケースのモデルに対して、振幅が0~100秒で、0~6gまで線形増加する1, 3, 9Hzの正弦波を水平1次元入力した。これら36通りの解析を行い、振動外力を受ける剛体ブロックの動的挙動を、ブロックのサイズと剛性の影響に着目して検討した。図2と図3・図4は、ブロックのサイズと剛性による

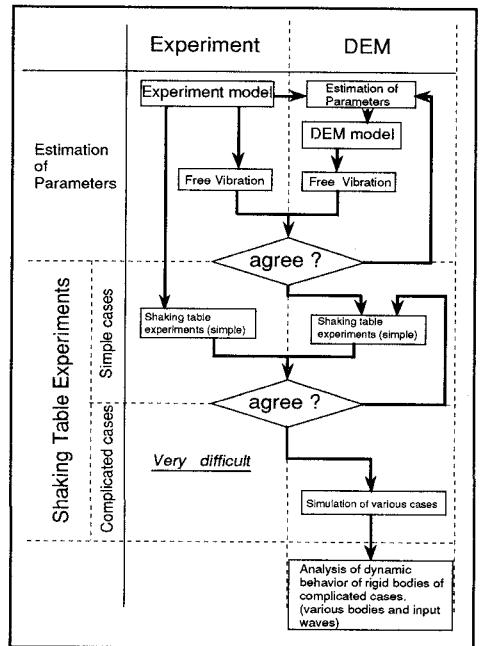


図1 解析の流れ

表1 解析に用いたブロックの形状寸法

Block	Size [cm]			k	b/h
	b	h	d		
Block1	30	100	50(ex)	1	0.3
Block2	3	10	-	0.1	0.3
Block3	300	1000	-	10	0.3
Block4	3000	10000	-	100	0.3

影響についてそれぞれまとめたものである。ただし、ロッキング、転倒の判定基準としては、ブロックの回転角1度と16.7度(釣合中心角)をそれぞれ用いた。シミュレーション結果を見ると、いずれのサイズ・剛性においても、振動外力が低周波数である程、小さな加速度振幅でロッキングや転倒を起こすことがわかる。なお図中で点がプロットされていないケースは、最大6gまでの外力を加えてもロッキングや転倒を起こさなかった例である。

a) サイズの影響：細長比の等しい相似な4供試体（他の条件は全て同じ）のDEM解析から、供試体のサイズによる挙動の違いを検討した(図2)。サイズの大きなものほど、ロッキングや転倒の挙動に到るには、大きな振動外力が必要なことがわかる。前報の実験で用いた程度(最大相似比4)の寸法差では有意な違いが見られなかったロッキングや転倒挙動におけるサイズの影響が明確に見られる。静的には相似形のブロックはサイズに無関係に等しい加速度(つりあい速度)で転倒するが、振動外力を受ける場合は、相似形でもサイズが大きくなると転倒しにくくなるという事が確認できた。

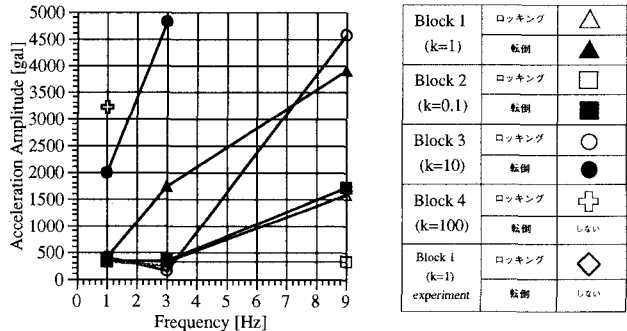


図2 サイズの違いが動的挙動に及ぼす影響

b) 剛性の影響：まず自由振動における剛性の影響を調べるために、同じサイズのブロックの剛性を変化（他の条件は全て同じ）させて自由振動のDEM解析を行った。Block1を用いた剛性の違う3モデルによるDEMシミュレーション結果を図3に示す。これは、自由振動時のブロックの中心の垂直(Z)方向の時刻歴変位である。剛性が高いほど振動周期が大きく、減衰しにくいことがわかる。次に同様の3モデルを用いて、剛性の違いが振動外力を受けるブロックの挙動に与える影響を解析した。図4に示すように、剛性の影響は外力が低周波数である場合はあまり見られないが、周波数が高くなるほど顕著になり、剛性の大きなものほどロッキングや転倒を起こしやすいことがわかる。

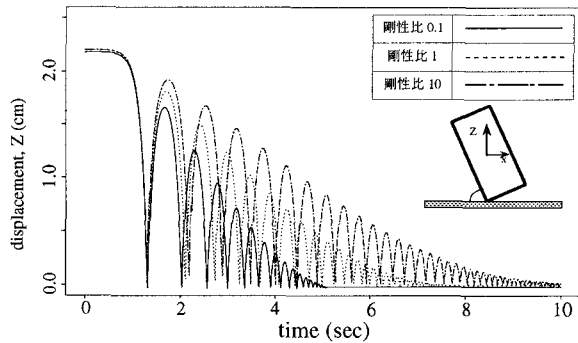


図3 自由振動における剛性の影響

4. おわりに 振動外力を受ける剛体ブロック(単体+組み合わせ)の複雑な挙動解析へのDEM適用の第1歩として、簡単な実験とDEMシミュレーションとの比較を行った後に、実験では再現の難しいブロックのサイズと剛性の影響をDEMを用いて調べた。その結果、一般的な傾向として、振動外力が低周波である程、小さな加速度でロッキングや転倒挙動を起こすことが解析された。サイズと剛性の影響は、剛性が高くサイズが小さいものほど、ロッキングや転倒挙動を起こしやすいことがわかった。

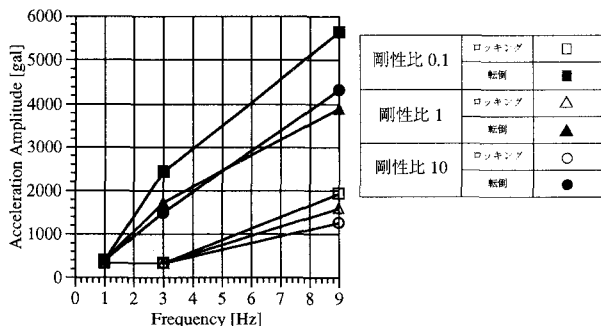


図4 剛性の違いが動的挙動に及ぼす影響

参考文献：1) 望月・小林：単体の運動から地震加速度を推定するための研究，日本建築学会論文報告集，第248号，1976。 2) 石山：Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 1982。 3) 川島・連上：地震に対する剛体基礎の回転振動の解析，土木技術資料，32-10, 1990。 4) 目黒・Tibor・山崎：屋内収容物の転倒被害に関する振動台実験とDEM解析，土木学会第48回年次学術講演会概要集，I, 1993