

(35) コンクリートブロックのロッキング振動試験

国鉄 正。海野隆哉 正 村上温

1. まえがき

レンガ、石積、無筋コンクリートで造られた古い橋脚などが、地震により目地が切れて上半部が移動、転落(転倒)した例は少くない。しかし、キレツを生じても水平であることが多く、鉄桁が落下したりせず橋脚などの破損や移動量が小さければ、早期に復旧することが可能である。そこで、目地が切れた後の無筋橋脚の移動、転落、転倒現象を予測するため、模型のコンクリートブロックをつくり、振動試験を行った。この種の試験、解析は、建築で古くから数多く行われており、いくつかの転倒条件式も提案されている。震害例をみると軟弱地盤上のものが多く見受られるので、今回は剛床の外に、コンクリート版と振動台の間にゴムをはさんだ弾性床でも振動試験を行い、剛床と比較した。また、切断面が5度および10度傾いている場合についても振動試験を行った。なお、シミュレーションは、建設省建築研究所石山祐一氏の開発による剛体の回転、滑動、跳躍運動の解析プログラム^{*}(以後、転倒振動解析プログラムと略す)を使用させて頂いた。

2. 試験条件

1) 供試体 旧式橋脚として、加振方向の辺長4m、直角方向の辺長6m、重心高さ4mおよび8mの無筋橋脚を想定し、その1/10の模型コンクリートブロック(加振方向の中 B=40cm、高さH=80cm、および160cm)を作製した。H=160cmのブロックは、単体の外、中央部で水平に切断した二段積のもの、および、水平と $\theta=5^\circ$ および 10° の角度をなすように切断した二段積のもの(傾斜ブロック)を用いた。

2) 床版 鋼板に厚さ5cmのコンクリートを接着したものを、振動台にボルトで剛結したものを剛床とし、振動台と鋼板の間にゴムをはさんだものを弾性床とした(図-1)。ゴムの硬さは、 $N=10$ 程度の砂地盤を想定して決定した。ゴムの弾性係数は、完全な直線性は示さないが、静的載荷試験の結果では、ブロックを載せた荷重強度付近では、弾性床の鉛直バネ係数は $K_v=4.7 \text{ tf/cm}$ 、回転バネ定数は、 $K_R=1.30 \times 10^3 \text{ tf}\cdot\text{cm}$ 、水平バネ係数は、 $K_H=0.38 \text{ tf/cm}$ であった。弾性床での共振振動数、減衰定数は、表-1のとおりである。

また、供試体と床版との摩擦係数は、上下、水平加振時も含めて、0.6~0.8であった。

表-1 弾性床の振動特性

供試体高 H	共振試験		自由振動		静的試験からの 計算値
	共振振動数 max 50g	減衰定数 max 100g	共振振動数	減衰定数	
160cm	1.6 Hz	—	2.2 Hz	9%	1.7 Hz
80cm	4.2 Hz	3.5 Hz	—	—	3.4 Hz

注)これらの値は、ブロックが浮上らない状態に対するもの

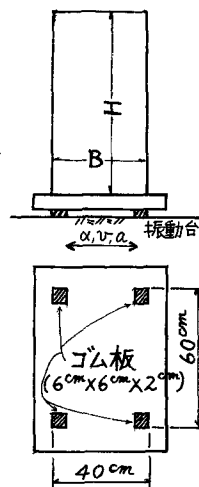


図-1 弾性床

3. 自由ロッキング振動試験

剛床においては、 $H=160 \text{ cm}$ の供試体の位置エネルギー減衰比は、 $\alpha=1.02$ であり、変位振巾は10波目になっても $2/3$ 程度にしか減小しなかった。弾性床においては、 $H=160 \text{ cm}$ の供試体のエネルギー減衰比は $\alpha=1.6$ 、 $H=80 \text{ cm}$ の供試体のそれは $\alpha=3$ と比べて大きく、それぞれ5~6波目および2波目で振巾は $1/20$ になった。

4 強制ロッキング振動試験

1) 試験ケース 表-2に示す。加振方法は正弦波加振とし、ステップ毎に加速度および変位の記録をとる

ため、各ステップ10~20
波とした。

表-2 試験ケース一覧表

ケース	供試体諸元				床版条件		加振方法 (水平方向)		
	個数	高さ cm	巾 cm	傾斜 角	剛弾	固自	振動数一定 Hz	変位振巾一定 cm	加速度 振巾一定 gal
A1	単	80	40	—	剛床	自由	10, 5, 4, 3, 2, 1.8, 1.6	5(4)	gal
	2	"	"	—	弾性床	"	10, 5, 3.5, 1.6	5	400
B1	"	160	"	—	剛床	"	10, 5, 3, 2, 1.6, 0.95	5, 2.5, 1	170
	2	"	"	—	弾性床	"	10, 5, 1.6, 0.85	5, 3, 2.5	400, 140, 120
C1	2	80	"	5°	剛床	固定	10, 5, 3, 2	2.5	
	2	"	"	"	弾性床	"	10, 5, 3, 2	5, 2.5	
D1	"	"	"	10°	剛床	"	10, 7, 6, 5, 4, 3, 2	5, 2.5, 1	250
	2	"	"	"	弾性床	"	10, 5, 3, 2	5, 2.5, 1	

2) 直方体ブロック

ケースB(図-2)：

振動数一定試験では、剛床で2Hz、弾性床でその共振振動数1.6Hzのとき、振動台加速度50gal(以後、特に断らない限り振動台の値)で浮上り振動を生じる。それより振動数はなれるに従い浮上り

り加速度は高くなる。ただし、上記振動数は浮上り加速度は小さくとも、一旦、浮上ると、共振振動数は浮上り角に応じて変わるので、加速度が上がったからといって、浮上り量はそれ程大きくならない。物体の浮上り量や転倒には、速度—特に最初に浮上る時の—の影響が大きいと考えられる。従って、低振動数域での浮上り量が大きく、剛床では0.95Hz一定で170galのとき、弾性床では0.85Hzで120~130galで浮上り転倒した。この値は、それぞれ変位振巾を5cm一定にして、振動数を上げて行った場合の転倒振動数であって、同じ、振動台加速度、変位である。これは、低加速度の向、ブロックが振動台と同位相振動し、加速度が上って逆位相振動へ転移する際に生じる大きな浮上りである。変位振巾2.5~3cm一定の場合、剛床では1.4Hz(190gal)で転倒したが、弾性床では大きく浮上っても倒れるには至らなかった。

ケースA：剛床、弾性床とも、 $f \leq 2\text{Hz}$ 、 $\alpha > 350\text{gal}$ 程度の範囲で、浮上り量が大きくなった。それより大きな振動数において、剛床では200~300galで中~小浮上りしながら横移動したが、弾性床の5, 10Hzでは全く浮上らない。

総じて、弾性床は浮上り前の増巾率に影響され、共振振動数以下では、浮上り開始加速度は剛床より小さいが、共振振動数を5割程度越えと、逆位相振動となりブロック重心の加速度が小さくなるため浮上りも生じない。自由振動と異なり、強制振動では、弾性床でも剛床と甲乙つけ難い浮上りを生じる。

3) 傾斜ブロック ニ段積ブロックでも一部の例外を除き、下段ブロックを振動台に拘束しないと、一体ブロック

△横移動 ○浮上り ●浮上り ●浮上り
($\delta < 5\text{mm}$ $\delta < 2\text{cm}$ δ)

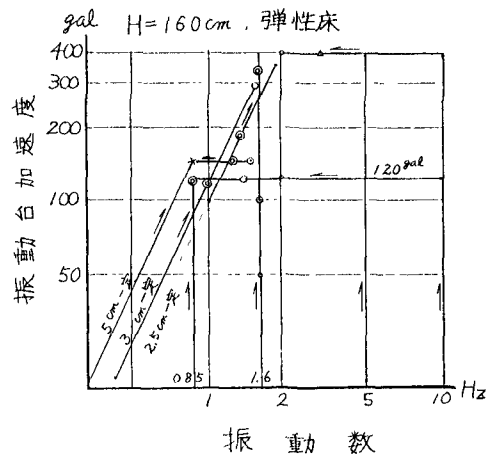
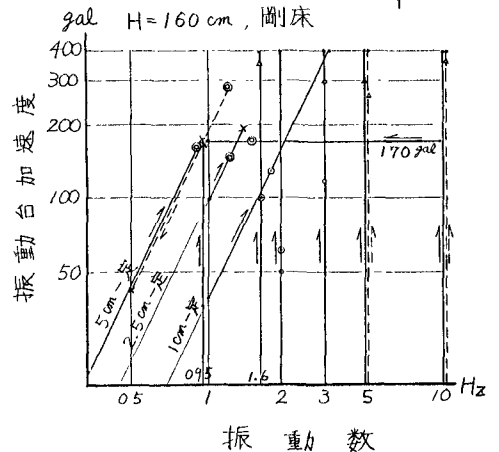


図-2 ケース B

同様に浮ってしまうので、下段ブロックを固定した。

ケースD(図-3)：剛床では、 $f \leq 2\text{ Hz}$, $\alpha \geq 350\text{ gal}$ の範囲で浮上り振動し、滑って傾き転落した。 $f \geq 3\text{ Hz}$ では、およそ250gal以上で中～小浮上り振動を生じ、加振を繰返すことにより徐々に滑った。ケースA1に比し、浮上り加速度には明らかな差はないが、大きく浮上った後の挙動に差があった。弾性床の変位振巾一定加振のうち、変位振巾5cm、2.5cmの場合、各々0.95Hz、1.2Hzで、全体に大きく揺れ、上ブロックはほとんど浮上ることなく滑り落ちた。変位振巾1cm一定の場合は1.2Hzで中程度の浮上りをしたが最後まで余り滑らず、むしろ、振動数2Hz一定加振で340gal(変位2.2cm)で2cm浮上り大きく滑った。このブロックの静的転倒震度(θ_{st})はほぼ0.5であり、さらに傾斜角の影響 $\tan 10^\circ = 0.17$ を考えると、この合計は、ブロック間の摩擦係数にほぼ等しく、浮上り振動が発生したり、滑落が発生したと考えられる。

ケースC：ケースDに比較し、剛床での2Hz一定、弾性床での変位振巾2.5cm一定加振では、転落に至らなかったが、剛床での2.5cm一定、弾性床での5cm一定加振では転落した。いずれも、浮上り量はケースDより大きく、浮上った後、大きく滑った。

4) 浮上り直前ブロック重心の水平加速度 硬い物体同士が完全平面状態で接していれば、その浮上り加速度は静的転倒震度以上であるはずであるが、今回の実験では、その3/3程度の振動台加速度でも、しばしば浮上ってしまった。そこで、加速度記録から、はっきり識別できる浮上り直前のブロック重心の加速度を調べたのが表-3である。重心の加速度はヤッ小さいとはいえ、ブロックの静的転倒震度に近いことが確認された。

5) 浮上り後のブロックの加速度 ブロックが浮上った後、再び床版に衝突する際に、大きな加速度を生じる。衝撃加速度は、ブロックの衝突端だけでなく、重心や反対側の端部でも大きく、かつ、鉛直のみでなく水平方向も大きい。最高3.5g記録し、鉛直方向には、平均して1gの加速度を記録した。ただし、ケースB2に限っては、平均0.3g(鉛直方向)の加速度しか生じなかった。浮上り量と衝撃加速度は比例せず、 $\delta < 5\text{ mm}$ のグループでも平均0.8g発生し、大きな浮上りを含む $\delta > 5\text{ mm}$ のグループでも平均1.1gであった。また、衝撃的加速度を除いた重心の鉛

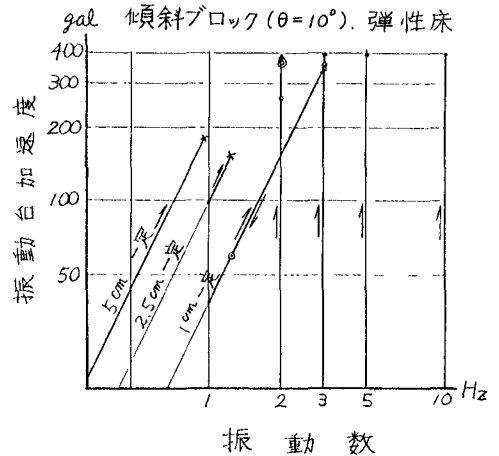
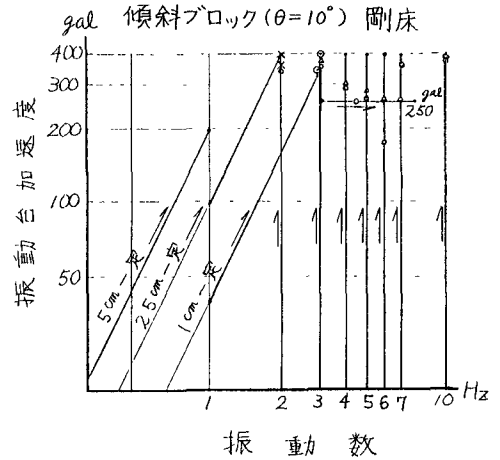


図-3 ケース D

表-3 浮上り直前のブロック重心の水平加速度

高さ	ケース	加振法	水平加速度			振動数	浮上り量 δ
			重心	弾性床	振動台		
160 cm	B1	$a = 5\text{ cm}$ 一定	260	gal	150	0.9	2.5
	"	$f = 0.95\text{ Hz}$ "	290		160		転倒
	"	$f = 1.6\text{ Hz}$ "	220		100		1.5
	B2	$a = 5\text{ cm}$ "	220	(280)	130	0.85	転倒
80 cm	"	$f = 0.85\text{ Hz}$ "	230	(140)	120		"
	A1	$f = 1.6\text{ Hz}$ "	460		360		5
	A2	$a = 4\text{ cm}$ "	440		340	1.47	10
	"	$f = 1.6\text{ Hz}$ "	480		340		4
	C1	$a = 2.5\text{ cm}$ "	420		350	1.9	8
	"	$f = 2\text{ Hz}$ "	400	(1120)	350		5
	C2	$a = 5\text{ cm}$ "	460	(210)	170	0.95	転倒
	"	$a = 2.5\text{ cm}$ "	370	(190)	140	1.2	10
	D1	$a = 2.5\text{ cm}$ "	400		370	2.0	3 転倒

注) () は主なノイズの値

直加速度は、いずれも $1g$ 以下で、ブロック全体の跳躍があったとしても、ごくわずかと考えられる。

5. シミュレーション

転倒振動解析プログラムの使用にあたって、入力

波以外に 利用者の選択しうるパラメーターは、

① 剛体の高さ H ② 剛体の巾 B ③ 鉛直方向
反撥係数 e_y ④ 接線方向反撥係数 e_x ⑤ 静
止摩擦係数 μ_s ⑥ 動摩擦係数 μ_d である。

1) 自由ロッキング振動 $H=160\text{ cm}$ 供試体

の自由ロッキング振動の供試体天端の水平変位 振巾の減衰状況 (図-4参照) について実験とシミュレーション結果を比較すると表-4のようになる。剛床での実験では、シミュレーションのいずれよりも減衰が小さく、弾性床での実験は減衰が大きい。プログラムでは、完全平面衝突を前提としているのに対し 模型ブロックと床版との間はそのようになっていなかったため剛床では減衰が小さかった。本来のプログラムの目的からは、弾性床のシミュレートは向題であるが、衝突直後は、ブロック・床版とも下方に沈み込むので、 $e_y=-1.0$ までシミュレートしてみたが、実験値はさらに減衰が激しかった。鉛直方向の運動は、 e_y が大きい程減衰しないが、浮上り振動では $e_y \geq 0.5$ になると剛体が跳躍しはじめため、 $e_y=1.0$ のときの減衰が最小とはならない。

2) 強制ロッキング振動 強制振動実験の結果から、反撥係数の影響は比較的小さいので、剛床については $e_y=0.4 \sim 0.7$ 、弾性床については $e_y=0.4, -1.0$ でシミュレーションを行った。入力としては、振動台の値の替りに、ブロック重心での値を想定して、浮上り開始時の振動数が一致するよう変位振巾、加速度を調整した。その結果、実験で転倒したケースは、シミュレーションでも転倒したが、実験よりも浮上り開始時の変位が大きくなるためか、浮上り量はシミュレーションの方が大きくなる傾向がある。実験では小さな浮上りなのに、シミュレーションでは転倒したケースもあった。剛床で $e_y=0.4$ 、弾性床で $e_y=-1.0$ とした場合、そのために転倒に要する
[加速度が大きくなるケースが見られた。

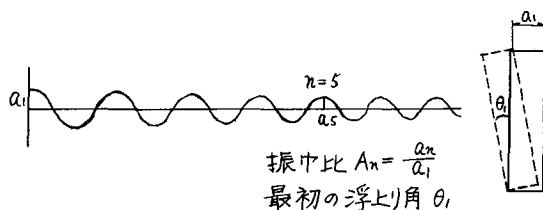


図-4

表-4 シミュレーション結果

ケース	θ_1	e_x	e_y	A_5	A_8
実験 $\approx 3^\circ$		剛床		0.77	0.65
実験 $\approx 3^\circ$		弾性床		0.03	—
S1	13°	-0.5	1.0	0.50	0.34
S2	"	"	0.8	0.62	0.49
S3	"	"	0.6	0.61	0.47
S4	"	"	0.4	0.42	0.25
S5	"	"	0.2	0.37	0.21
S6	"	"	0	0.32	0.16
S7	"	"	-0.4	0.24	0.13
S8	"	"	-1.0	0.16	0.05

注) $H=160\text{ cm}$ $B=40\text{ cm}$ }とした値
 $\mu_s=\mu_d=0.7$

6. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) コンクリートブロックの自由ロッキング振動試験の結果では、弾性床の減衰はきわめて大きく、剛床では小さかった。しかし、強制振動試験の結果では、低振動数域で弾性床の方が浮上り易いなど、減衰(反撥係数)の影響は小さい。

(2) (1)の傾向は、転倒振動解析プログラムによるシミュレーションにも表われており、強制振動によるブロックの転倒、浮上りに対する鉛直方向反撥係数 e_y の影響は鈍く、剛床については $e_y=0.4 \sim 0.5$ 、弾性床については $e_y \leq 0.4$ として計算するのがよい。

(3) 切断面が傾斜していることによる浮上り加速度への影響は大きくなかった。ブロックの静的転倒震度と傾斜角の正接の合計が摩擦係数に近くなると、ほとんど浮上らずに滑って転落することがある。

最後に、転倒振動解析プログラムを貸与、指導して頂いた建設省建築研究所石山室長、シミュレーション・振動実験に協力頂いた八千代エンジニアリングK.K.、国鉄・鉄道技研、岐阜工務局の方々に感謝申し上げます。

*参考文献：石山祐二「地震動による剛体の運動に関する研究」日本建築学会論文報告集 No 314, 昭57.4