

石造アーチ構造物の動的破壊強度に関する模型実験

DYNAMIC DESTRUCTION EXPERIMENT WITH MASONRY ARCH MODELS

紺野義仁*・伯野元彦**・相谷 武***・高田信行****

By Yoshisato KONNO, Motohiko HAKUNO, Takeshi AITANI
and Nobuyuki TAKADA

1. 過去の地震におけるアーチ構造物の強さ

1964年の新潟地震において、竣工したばかりの昭和大橋が落橋したことは、その後、桁の落下防止装置を全国に普及させるものになったほどの大事件であった。しかし、その隣に架かっていた万代橋は、古いアーチ橋であったが、落ちなかった。この橋のアプローチ盛土は、大きな亀裂が一面に口をあげ、歩行が困難なほどであったが、橋本体は落ちなかった。このことから、アーチ構造物（以下ではアーチと略称する）は地震に対し強いことが推定されるが、関東大震災においても、横浜市内の橋が、アーチ以外の橋はほとんど落ちたことが知られており、こうしたことは以前からいわれていることでもある。

最近では、1975年の大分県中部地震において、幸野橋が写真-1のように、裏込土は崩落し、橋は一時通行禁



写真-1 大分県中部地震（1975）における幸野橋の被害状況



写真-2 南イタリア地震（1980）におけるラビアーノ町のアーチ構造物の被害状況（その1）

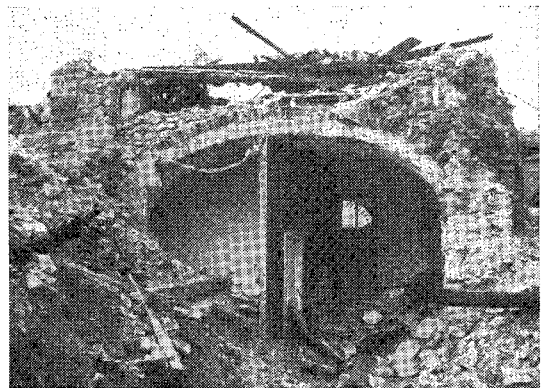


写真-3 南イタリア地震（1980）におけるラビアーノ町のアーチ構造物の被害状況（その2）

* 正会員 工修 日本道路公団（研究当時、東京大学大学院生）

** 正会員 工博 東京大学教授 地震研究所

*** 日本道路（研究当時、武蔵工業大学学生）

**** 斎藤建設工業（研究当時、武蔵工業大学学生）

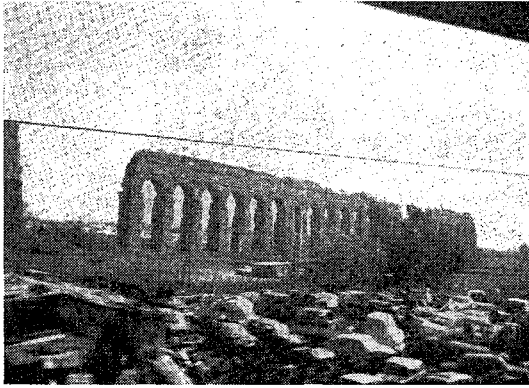


写真-4 アーチ構造であるローマの水道橋

止とはなかったが、アーチ本体には何の損害もなかった例がある。1978年の宮城県沖地震においても、アーチの一種であるランガー橋には何の被害もなかった。

さらに、建築の分野であるが、1980年11月の南イタリア地震²⁾では、このアーチ構造物の強さが随所にみられた。写真-2, 3は、被害地の中央部にあり、町全体ががれきの山となり、住民約600名中400名もの死者を出したラビアーノ(Laviano)の破壊された建物の一部であるが、アーチは他の部分が崩れても健全であることが認められる。これらのアーチは、施工も粗末なもので、ろくに整形もしていない石を漆喰で接着しているにすぎない。

また写真-4は、観光名所にもなっているローマの水道橋であるが、ローマ近郊は決して地震の少ないところではないことを考えると、これもアーチ構造であったから2000年近くも持ちこたえたのかもしれないと思いたくなる。このように、地震に対してアーチが強いのはなぜなのか、この疑問に何らかの回答を与えられればと、不連続に剛体を積み上げた石造アーチ模型の振動破壊実験を行ったので報告する。

2. アーチの振動実験の方法

この実験では、剛体を積み上げたような図-1に示す

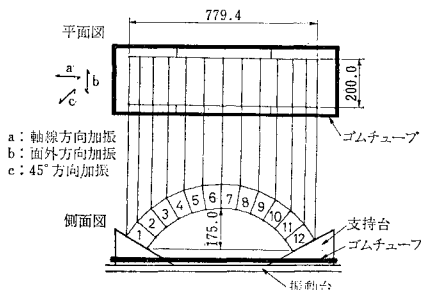


図-1 石積みアーチの実験模型

石造アーチ模型を振動させ、その振動性状と破壊形態をみる。

アーチ模型は、幅20cm、高さ10cm、上辺7.8cm、下辺6.1cmのコンクリート部材を12個、単純に積み上げただけのもので、アーチ部材間の摩擦力だけで自立している。アーチ部材の寸法は、振動台の加振能力より決定し、アーチ形状が円弧になるようにしている。支持部分は、アーチ部材と同じコンクリートできていて、固定した場合と、床との摩擦力と図に示すようなゴムチューブで結んだ引張り力だけでアーチを支える可動の場合とを考える。また、振動方向は、軸線方向、軸線と直角方向(面外方向)、斜め方向(軸線方向と45°をなす)の3種類で、いずれも水平方向である。アーチは、鉛直方向の振動に弱いことが推定されるが、振動台の加振能力の関係から、鉛直方向加振はできなかった。また、小型加速度計を、振動台とアーチ本体に取り付け、その部分の加速度を測定した。アーチ部材には、図-1に示すように、左から部材番号をつけていった。入力波には、正弦波を主として用いたが、場合によってはランダム波も用いた。

3. アーチの振動実験結果

(1) アーチの破壊形態

a) 軸線方向加振・両端固定の場合(写真-5~7)

アーチの両端が、支持面の上を軸線方向に持ち上がるようにすべり、アーチ部材間にがたつきができる。次に、面外方向への振動が鉛直方向の振動とともに激しくなり、部材4付近より上側のアーチ部材が、面外方向へ回転するように倒れて破壊する。

b) 面外方向加振・両端固定の場合(写真-8~10)

アーチの上部が傾き、アーチの上部の動きとは逆方向に接続する部分が回転し、部材4を境にして全体が上部と下部に分かれ、がたつきのあまり生じないまま破壊に至る。

c) 45°方向加振・両端固定の場合(写真-11~13)

初期は、面外加振と同じような破壊形式をとるが、上部が大きく持ち上がり破壊する傾向がある。

d) 軸線方向加振・両端可動の場合(写真-14~16)

固定の場合と同じような破壊形態も多いが、全体的に支点間が広がり、ますますがたつきがひどくなり、形を保ったまま直下に落下する破壊形態が多い。

e) 面外方向加振・両端可動の場合

低周波域では、支持面上を両端の部材がすべって下り、全体的にバランスが崩れ破壊する。高周波域では、ねじれるような、固定の場合と同じような破壊をする。

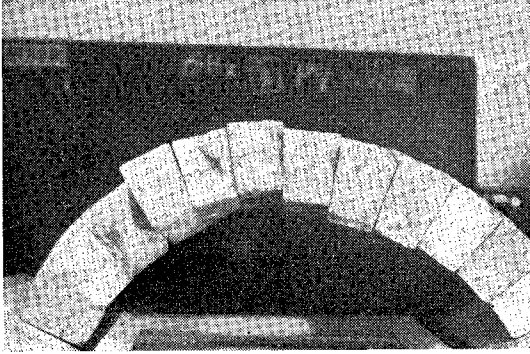


写真-5 軸線方向加振・両端固定における破壊までの経過(その1)

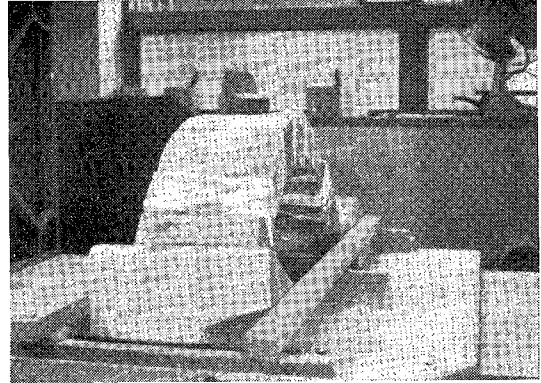


写真-8 面外方向加振・両端固定における破壊までの経過(その1)

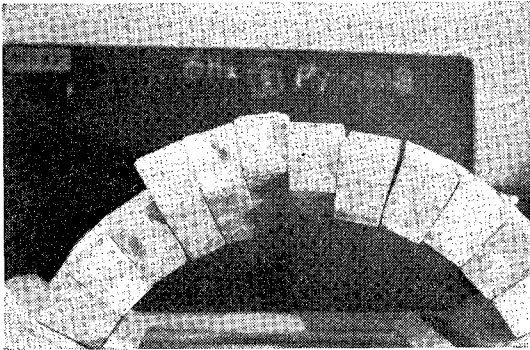


写真-6 軸線方向加振・両端固定における破壊までの経過(その2)

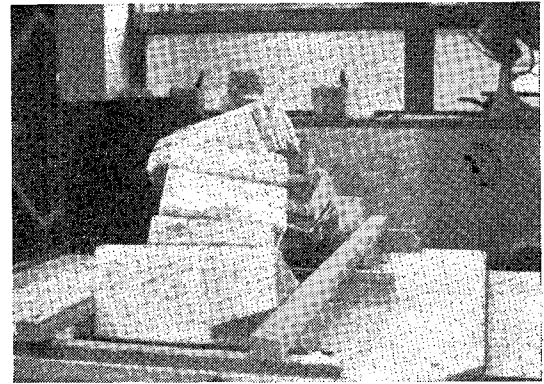


写真-9 面外方向加振・両端固定における破壊までの経過(その2)



写真-7 軸線方向加振・両端固定における破壊までの経過(その3)



写真-10 面外方向加振・両端固定における破壊までの経過(その3)

f) 45° 方向加振・両端可動の場合
ほとんど固定の場合と同じである。

(2) アーチの破壊加速度

表-1 は、加振方向、支点の状態の固定・可動の違いによる6ケースにつき、3Hz から6Hz までの正弦波を入力した場合に、非線形的な破壊振動の始まる振動台加速度(以下、基盤加速度ともよぶ)と、軸線・鉛直・面

外方向別に、各部材の応答加速度と継続時間を示したものである。3Hz まででは、破壊振動に至らず、6Hz 以上では、振動性状が大きく変化するので、こうした振動数に限定した。これによると、軸線方向加振の場合、平均破壊加速度が約 600 gal (600 cm/s^2) に対して、面外方向加振の平均破壊加速度は、約 300 gal (300 cm/s^2)

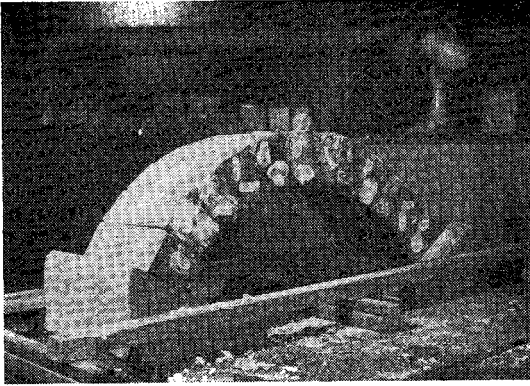


写真-11 45°方向加振・両端固定における破壊までの経過（その1）



写真-14 軸線方向加振・両端可動における破壊までの経過（その1）



写真-12 45°方向加振・両端固定における破壊までの経過（その2）



写真-15 軸線方向加振・両端可動における破壊までの経過（その2）

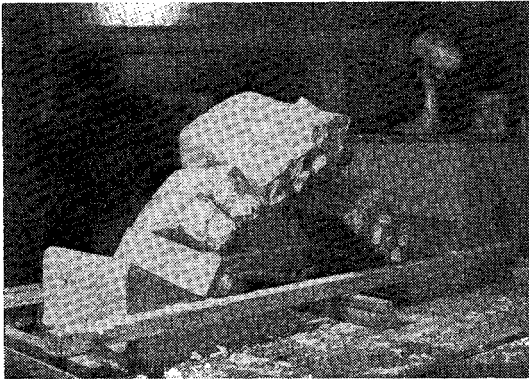


写真-13 45°方向加振・両端固定における破壊までの経過（その3）

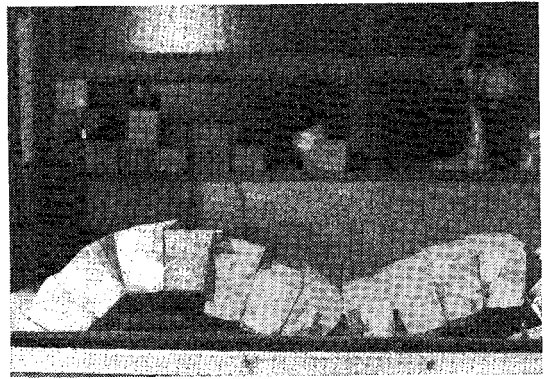


写真-16 軸線方向加振・両端可動における破壊までの経過（その3）

と小さい。これは、破壊の主形態が、面外方向への回転倒壊であることから予想されたことである。また、各加振方向別に応答倍率を比較してみることによって、アーチは面外振動によって、その応答がきわめて大きくなることが理解できる。45°方向加振は、軸線・面外両加振の中間的な状況を示す。このようにして、面外方向加

振の場合が最も弱いことがわかった。

次に、支点が図-1に示したような可動なものの場合をみる。これも表-1をみると、軸線方向、45°方向、面外方向加振の順に弱くなっていくことがわかる。軸線方向加振の場合は別として、45°方向加振、面外方向加振の場合、破壊加速度が高くなり、応答倍率が低くなっ

表-1 アーチの破壊開始時における加速度と応答倍率

加振方向	支持点	基盤加速度	軸線加速度	鉛直加速度	面外加速度	最大値を示す時刻	継続時間
軸線方向	固定	611.0 gal	947.2 gal	879.0 gal	546.9 gal	32.9 s	54.8 s
		応答倍率	1.55	1.44	0.87		
軸線方向	可動	536.6	923.9	826.5	—	14.3	20.4
		応答倍率	1.72	1.54	—		
面外方向	固定	322.7	666.6	871.0	744.6	16.9	26.3
		応答倍率	2.07	2.70	2.31		
面外方向	可動	420.1	611.5	798.8	—	9.5	12.4
		応答倍率	1.46	1.90	—		
45° 方向	固定	404.1	762.2	869.3	788.1	16.6	23.0
		応答倍率	1.89	2.15	1.95		
45° 方向	可動	487.5	770.0	925.3	780.2	13.9	18.6
		応答倍率	1.58	1.90	1.60		

表-2 アーチ幅の違いによる破壊時の基盤加速度と加振に要した時間

加振方向	支持点	20 cm		10 cm	
		基盤加速度 (gal)	時間 (s)	基盤加速度 (gal)	時間 (s)
軸線方向	固定	1026	9.4	1169	9.1
	可動	1071	9.9	1399	15.9
面外方向	固定	1179	7.2	856	6.1
	可動	1440	7.6	671	4.0
45° 方向	固定	901	6.9	692	6.7
	可動	1085	6.9	489	8.0

ていることがわかる。このことは、支点において、アーチ止め（支持台）の上をアーチ部材が動くことにより、アーチ部材間での衝突による衝撃を吸収し、アーチを壊れにくくしているためと考えられる。また、軸線方向加振の場合、支点可動の場合に強度を減じている理由は、アーチの破壊形態が、2次元面内に起こる破壊形態をとることが多くなったためと考えられる。

次に、アーチの幅が変化した場合、強度がどれほど変化するかをみる。表-2は、アーチが実際に破壊したときの各場合の基盤加速度と、そこに至るまでの時間を示したものである。非線形的な破壊振動が生じて、そこで止めず、アーチが波を打って完全に倒壊するまで基盤加速度を上げたので、表-1と比べて破壊加速度が非常に大きくなっている。そして、2つの表より、アーチは軸線方向加振に対しては、非線形振動を始めてから倒壊に至るまでの余裕が少ないのに対し、面外方向加振に対しては、かなり持ちこたえていられることがわかる。これは、アーチ構造の強さの一側面を示すものであらう。

また、幅が半分になると、面外方向加振、45°方向加振では、破壊加速度が大きくなる下がることわかる。このことから、面外方向には、回転に抵抗するアーチ作用が生じていることが推定できる。

(3) アーチの破壊に関する因子について

振動破壊は、加速度によらず、速度に関係するということがいわれている³⁾。

そこで、破壊振動が始まる入力加速度と入力周波数を用い、

$$|v|_{\max} \approx \frac{1}{2\pi f} |a|_{\max}$$

ここに、 f : 周波数、 v : 速度、 a : 加速度。

の近似式から、入力加速度を入力周波数で割った値を縦軸に、入力周波数を横軸にとり、加振方向・支持形式の各場合について示したものが図-2である。

図-2をみると、6Hzより高周波領域では、面外方向加振・両端固定の場合、入力速度値がほぼ一定となる。よって、面外方向加振・両端固定の場合の破壊は、速度によって支配されているといえる。すなわち、ある限界（ここでは6Hz）より短周期領域においては、長い周期成分ほど破壊に対して危険になることがわかる。軸線方

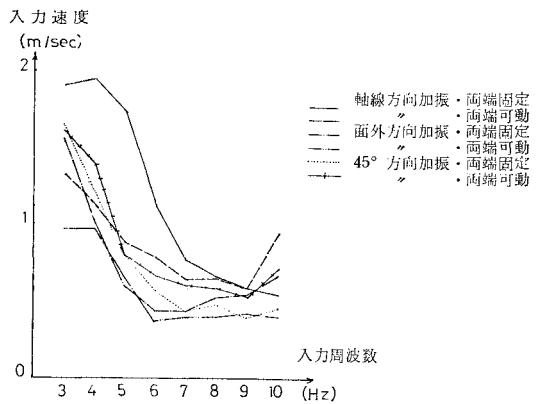


図-2 破壊開始時の周波数ごとの入力速度

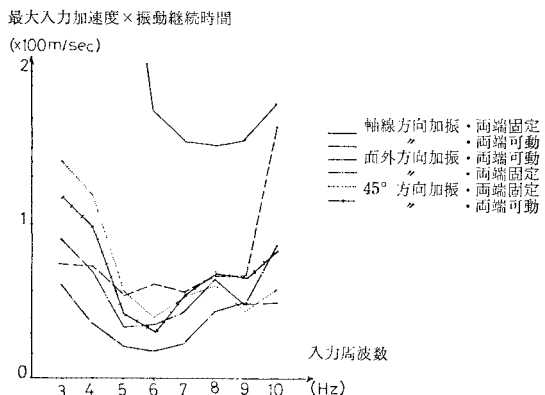


図-3 破壊の振動継続時間への依存性

向破壊に関しては、上述した関係は成り立たなかった。

次に、振動継続時間 t と最大入力加速度 $|a|_{max}$ をかけたものが、速度の dimension をもつことから、この値を縦軸にとり、横軸に入力周波数をとって、図-3 に各ケースごとに表わしてみた。5 Hz より高周波領域では、大体一定値になっており、このことから、アーチの破壊には、振動の継続時間が大きく関与していることが明白になった。

(4) アーチの振動挙動について

図-4 と 図-5 に、軸線方向と面外方向に加振した場合の、基盤とアーチ部材の加速度記録およびそのフーリエスペクトルを示した。これを見ると、軸線方向加振の場合、部材の応答波形は、いずれも長周期波に高周波ののった複雑な波形となっている。その中でも、面外方向や鉛直方向の応答加速度波には、高周波成分がみられる。軸線方向の応答加速度が、入力加速度に比例して徐々に増加するのに対して、面外方向や鉛直方向の応答加速度は、入力加速度がある値(約 300 gal 程度)より大きくなったとき、急激に増大する傾向がみられる。また、各スペクトルにはピークが生じているが、このピーク位置は、入力周波数とその整数倍の周波数の位置にある。これらのことから、アーチは、入力波と同じ周波数であ

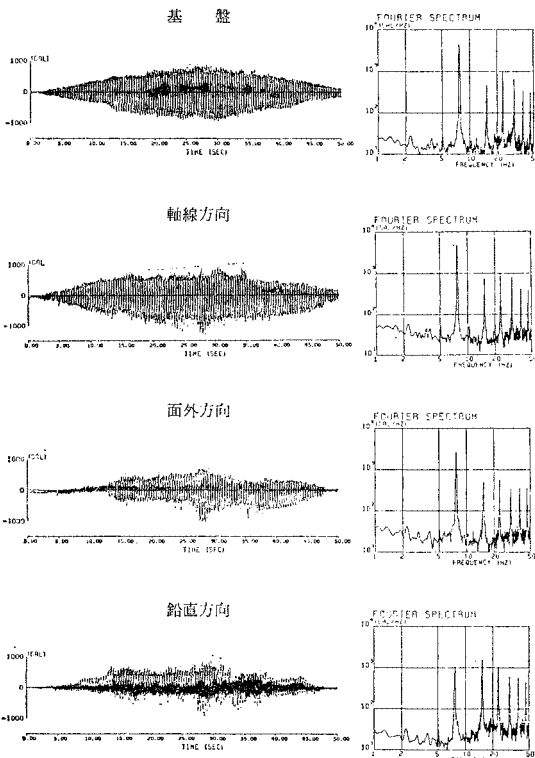


図-4 軸線方向 8 Hz 正弦波入力における部材 5 での各加速度

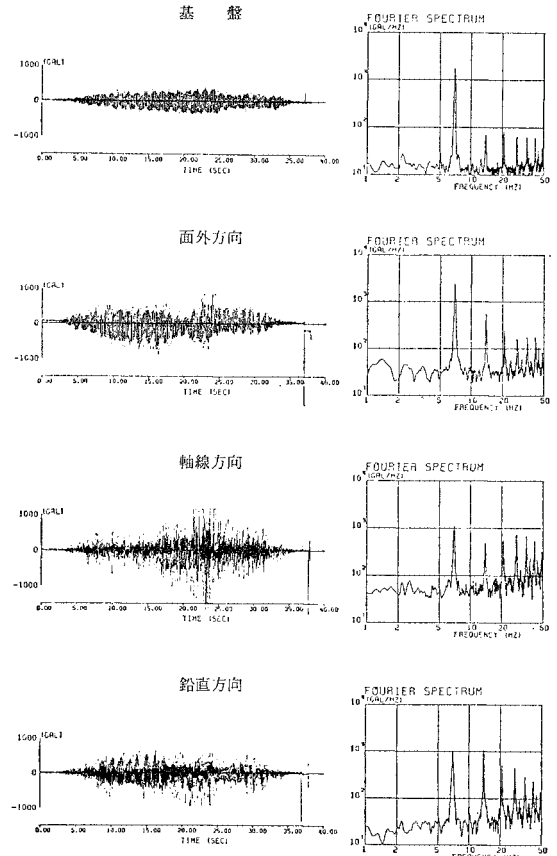


図-5 面外方向 7 Hz 正弦波入力における部材 5 での各加速度

る同期応答と、これの整数倍の振動数である高調波による応答など、非線形振動でみられる複雑な振動をしている。

次に、面外方向振動の場合、やはり複雑な非線形振動をして、高調波が生ずる。軸線方向加振の場合と比べて、一般に応答加速度が大きく、基盤に及ぼす影響が低いことが、基盤のスペクトルに高周波成分が少ないことから推定できる。また、振動方向に直角方向の加速度(軸線方向加速度)は、軸線方向加振の場合(軸線加振の面外方向加速度)に比較して高い値を示すことがわかる。アーチ部材間の摩擦力が大きいため、面外方向の加振は、軸線方向にきわめて伝えられやすく、逆に、軸線方向の加振は、この摩擦力がすべりを防止して、面外方向には伝えられにくいと考えられる。

(5) 加速度記録からみたアーチの振動挙動

(4) でアーチ部材に加速度計を取り付けて、アーチの振動の性質を調べた。ここではさらに詳しく、3 Hz から 10 Hz までの正弦波を入力し、各部材ごとに軸線方向、面外方向、鉛直方向の加速度を測定し、基盤加速度

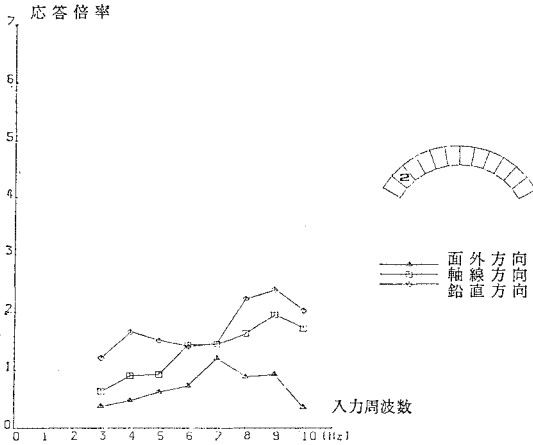


図-6 軸線方向加振・両端固定の場合における部材2の加速度応答倍率

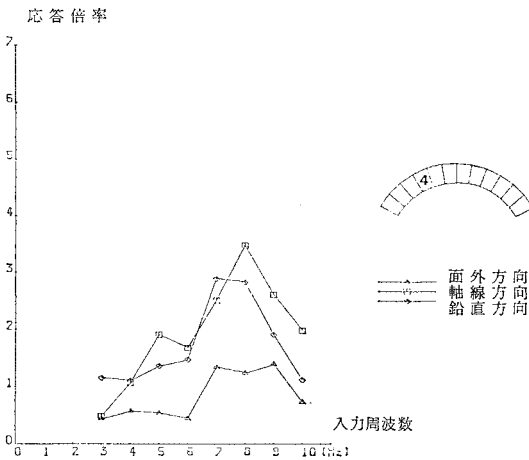


図-7 軸線方向加振・両端固定の場合における部材4の加速度応答倍率

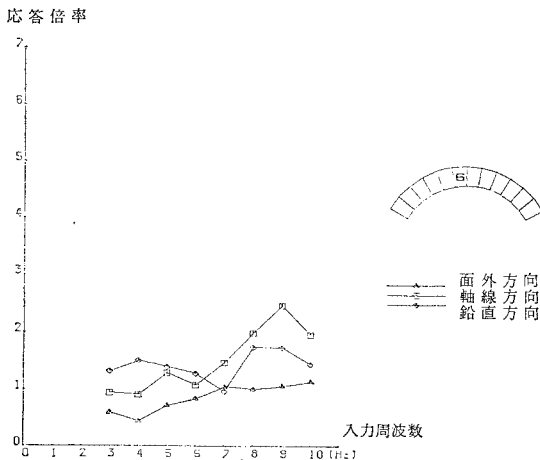


図-8 軸線方向加振・両端固定の場合における部材6の加速度応答倍率

と比較してみた。破壊振動発生の際の各加速度応答をみしてみる。

a) 軸線方向加振・両端固定の場合(図-6~8)

6 Hz から 10 Hz ぐらいの周波数で壊れやすい。下部部材ほど、鉛直方向の振動が、水平方向の振動に比較して相対的に大きくなっている。面外方向の振動は、部材4で出にくく、その上部と下部では振動性状が分かれる。また、軸線方向の振動は、部材4で振動の腹のように大きく、部材4は特色ある振動をしている。

b) 面外方向加振・両端固定の場合(図-9~11)

6 Hz が最小の入力加速度で破壊に至ることがわかる。また、上部部材と下部部材の振動性状の分離が、軸線方向加振の場合よりもさらにはっきりしてくる(上部部材では、面外方向加速度の方が軸線方向加速度より大きく、下部部材では同程度となる)。

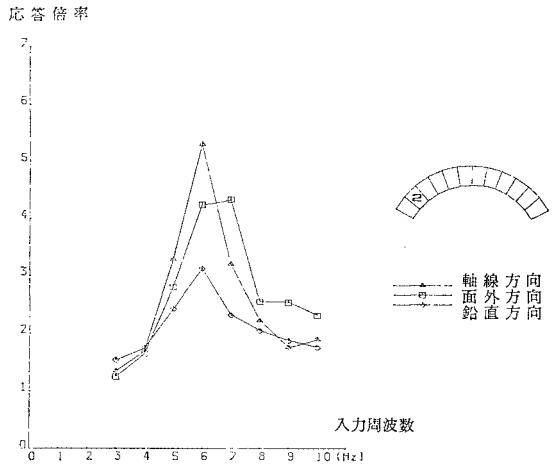


図-9 面外方向加振・両端固定の場合における部材2の加速度応答倍率

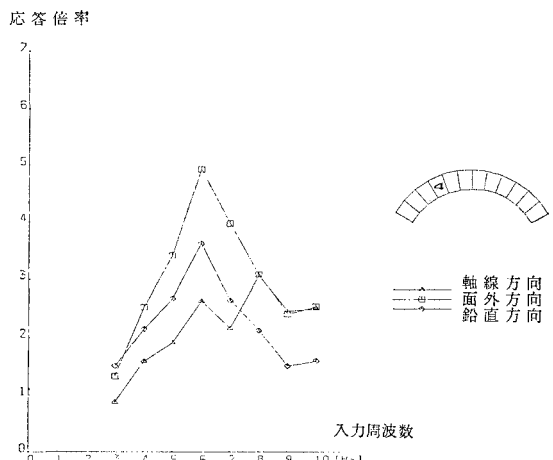
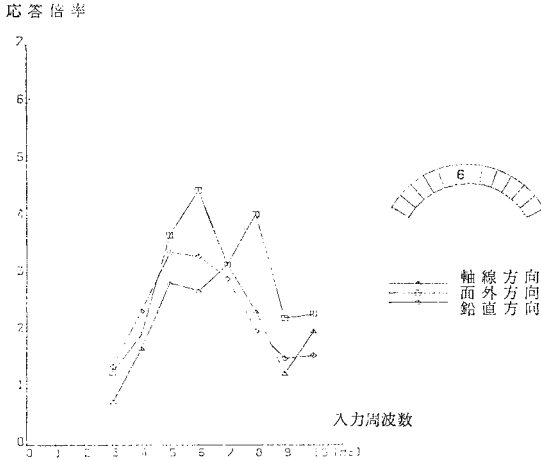


図-10 面外方向加振・両端固定の場合における部材4の加速度応答倍率



図一11 面外方向加振・両端固定の場合における部材6の加速度応答倍率

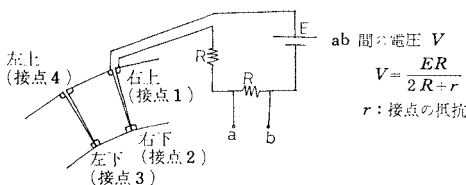
- c) 45° 方向加振・両端固定の場合
面外方向加振の場合とよく似た傾向を示す。
- d) 両端可動の場合

高周波域で、応答倍率が固定の場合に比べて低い。その他の点では、ほぼ両端固定の場合と同じであるが、軸線方向加振の場合、高周波を入力すると、支点のコンクリートごと、アーチ全体が基盤上をすべることがあり、この場合については有意な結果を導けなかった。

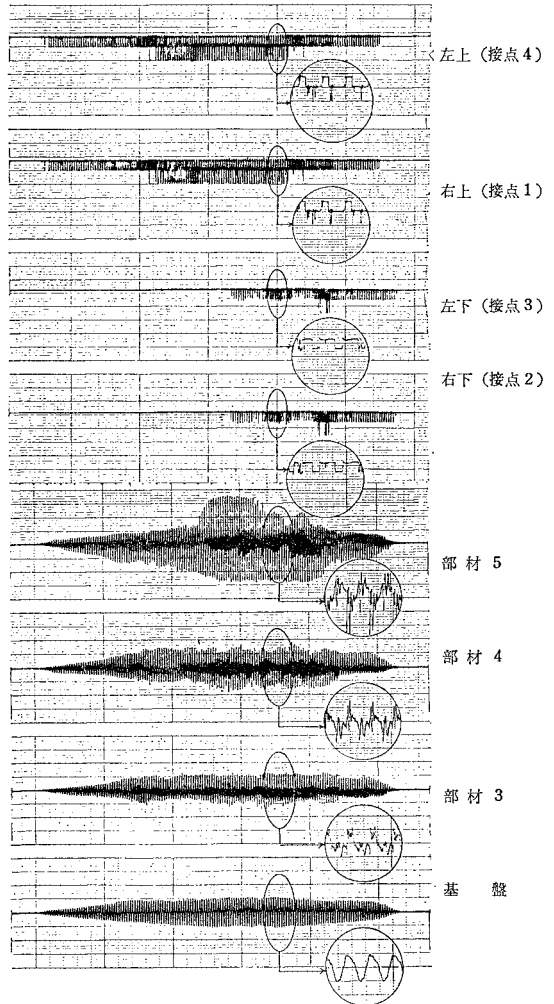
(6) アーチ部材間に生ずる空隙をみる実験

アーチ部材間に生ずる空隙の状態を調べるため、図一12に示す電気伝導板を用い、部材の右上(接点1)・右下(接点2)・左上(接点4)・左下(接点3)に電気接点を設け、加速度記録と同時に接触の記録をとった。すなわち、接点が接触しているとき、図のab間に電位差が生じるので、接触状態を判断できる。奥行きを含めてどこか1か所でも接触していれば、電位差が生じる。ここで、軸線方向に正弦波入力をしたときの接点の状態と、接点に関する3つの部材の軸線方向加速度記録の一例を、図一13に示す。これをみると、アーチの高周波成分は、アーチ部材同士の衝突によって生じている様子がわかる。

次に、このようにして集めたデータを整理してみると、衝突を始める部材の順番が推定できる。表一3は、



図一12 アーチ部材間の接触を測定する電気伝導板



図一13 部材4の角部における接触状況(上)と各部材での軸線方向加速度波形の様子(下)

衝突の始まる基盤加速度が低い順に、4つの入力周波数それぞれについて、部材番号を示したものである。これをみると、10 Hz以下の低周波加振の場合、部材3・4付近、すなわち全アーチの1/4のところが先に離れる傾向があり、最初上側から離れる傾向があることがわかる。他方、10 Hz以上の高周波を入力した場合には、下部の接点から先に離れることが多いことがわかる。以上、10 Hz以下の低周波成分を入力した場合には、部材4あたりで破壊の性状が変化することが予想され、観察結果と一致する。

(7) アーチの振動の非線形領域について

この実験では、人為的要因をなくすため、入力波をあらかじめプログラムし、各部材ごとに軸線方向の応答加速度と基盤加速度との関係を解析した。ここでは幅10

表-3 振動時におけるアーチ部材の接触を始める順番(上ほど早く接触を始める)

入力周波数	部材	離れる位置	接点
6 Hz	4	右上および左上	1, 4
	5	右上および左下	1, 3
	3	全部	1, 2, 3, 4
	2	全部	1, 2, 3, 4
	6	右上および左上	1, 4
9 Hz	5	右上および左上	1, 4
	3	右下および左下	2, 3
	4	右上および左上	1, 4
	6	右上および左下	1, 3
	2	全部	1, 2, 3, 4
11 Hz	3	右下および左下	2, 3
	2	右下および左下	2, 3
	5	右下および左下	2, 3
	6	右上および左上	1, 4
	4	右上および左上	1, 4
16 Hz	2	右下および左下	2, 3
	3	右下および左下	2, 3
	5	右下および左下	2, 3
	4	右下および左下	2, 3
	6	右下および左下	2, 3
	3	右下および左下	2, 3

cm の部材を用いた。アーチを両端固定のコンクリート支点上にのせて、1~10 Hz の正弦波を軸線方向に加えた。幅が 10 cm なので、今までの幅 20 cm の部材の実験とはやや一貫性に欠けるが、この実験では、アーチの非線形性を調べることを主眼としており、部材幅の小さい方が適している。アーチ部材の応答加速度を y 座標、基盤加速度を x 座標にとってみると、図-14 に示すような非線形範囲に (x, y) の値が収まることがわかった。

$$y \geq x$$

$$y \leq a(x-b)$$

この a, b の値を、各部材ごとに表-4 に示す。これを見ると、部材 1・2・3 と部材 5・6 とで、まったく非線形領域が異なることがわかる。また、その中間の部材 4 は両者の中間の状態にある。

(8) 石積みアーチに上載荷重を加える実験

これまで、単純に部材を積み上げただけの石積みアーチの耐震性について述べてきたが、実際の石積みアーチ構造物は、橋梁の下部構造に使われている例からもわか

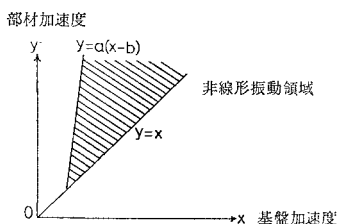


図-14 非線形振動の様子

表-4 図-14 におけるパラメーター a, b の値

部材	a	b
1	5.0	0.8
2	5.0	0.8
3	5.0	0.8
4	4.1	0.8
5	2.2	0.8
6	1.9	0.8

るとおり、上載部分が存在することが多い。この上載部分が、石積みアーチの耐震性にどれほど関係してくるのかについて、実験を行ってみた。

図-15 は、実験に用いたアーチとその上載部分の模式図である。上部の鉄棒(重さ 4900 g)の中に、袋に詰めたガラスビーズ(重さ 23750 g)を入れ、その効果を調べてみた。その結果、アーチは非常に壊れにく

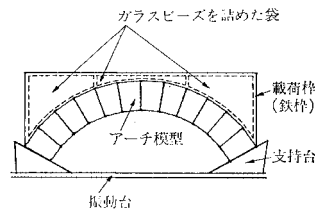


図-15 アーチ模型に対する上載荷重の方法の模式図(図-1 も参照ください)

くなり、特に軸線方向加振の場合は、破壊の傾向さえ見えなかった。45° 方向加振と面外方向加振の場合は、破壊の傾向がみえたが、この破壊形態も、上部部材が回転しながら載荷部分を持ち上げ、ゆっくり破壊していく形態をとる。表-5 に、3 Hz から 10 Hz までの正弦波を入力したときの、各方面加振の場合の、基盤加速度と、部材 3 の軸線方向加速度と鉛直方向加速度、部材 4 の軸線方向加速度記録を示す。

表-5 載荷されたアーチの平均加速度と応答倍率

加振方向	基盤	軸線方向部材 3	鉛直方向部材 3	軸線方向部材 4	継続時間
軸線方向	746 gal	1050 gal	574 gal	1279 gal	23.2 s
	応答倍率	1.41	0.77	1.71	
面外方向	673	363	618	421	20.6
	応答倍率	0.54	0.92	0.63	
45° 方向	483	567	579	675	24.8
	応答倍率	1.17	1.20	1.40	

これから、45° 方向加振の場合が最も弱いことがわかる。その理由は、上載部分を持ち上げながら回転するような破壊形態をアーチがとるため、面外方向の振動とともに、軸線方向の振動にも影響するためだと考えられる。

(9) 地震波入力を仮定した場合

これまでの実験は、すべて正弦波入力で行ってきた。ここでは、ランダム波により加振して、実際の地震波に近い状態でアーチを振動させてみる。図-16 は、ランダム波入力の、面外方向加振の例である。この例から、入力ランダム波が、フーリエスペクトルの 5 Hz 付近にピークをもった、不完全な白色雑音であることがわかる。しかし、アーチの応答波形には、そのピークが消えている。これから、ある周期をもった正弦波入力の方が、破壊に関して危険であることが推定される。表-6 は、入力ランダム波の最大加速度と部材の応答加速度の最大値

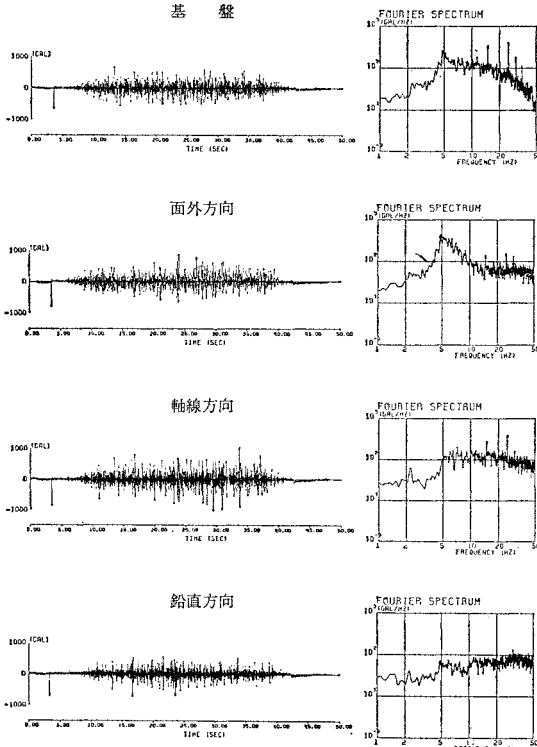


図-16 面外方向ランダム波入力における部材3での各加速度

の関係を表わしたものである。表-1と表-6から、特に面外方向加振において、ランダム波入力の場合、応答倍率がかなり低くなることわかる。実際、ランダム波入力では、振動台の加振能力の範囲内で、破壊に至ることがなかった。また、ランダム波を入力しても、アーチの固有周期は現われなかった。

4. 考察

さまざまな角度から、石積みアーチ構造の耐震性について検討してきたが、全体的に次のような特徴が現われた。

(1) 振動モードと固有周波数について

軸線方向について、図-17に推測される振動モードを示した。このような逆対称の振動モードをとることが、観察と加速度記録から推定された。また、面外方向には、アーチの1/4を節とする、対称の振動モードをとることが推定された。

次に、固有周波数は、非線形振動となったために計算ができなかったが、ランダム波入力や入力周波数を徐々に変化させる実験を行い、これを求めようとした。しかし、はっきりした固有周波数はわからなかった。面外方

表-6 ランダム波入力に対するアーチの最大加速度

加振方向	部材	基盤	軸線方向	鉛直方向	面外方向
軸線方向加振	1	454 gal	836 gal	917 gal	309 gal
		応答倍率	1.84	2.02	0.68
	2	456	862	710	388
		応答倍率	1.89	1.56	0.85
	3	456	805	745	557
		応答倍率	1.77	1.63	1.22
	4	488	646	804	501
		応答倍率	1.32	1.65	1.03
	5	485	577	819	415
		応答倍率	1.19	1.69	0.86
	6	596	726	1011	377
		応答倍率	1.22	1.70	0.63
平均		489	742	834	425
		応答倍率	1.52	1.71	0.87
面外方向加振	1	694 gal	811 gal	1740 gal	1279 gal
		応答倍率	1.17	2.51	1.84
	2	716	818	1225	1238
		応答倍率	1.14	1.71	1.73
	3	609	875	1161	962
		応答倍率	1.44	1.91	1.58
	4	579	845	1127	782
		応答倍率	1.46	1.95	1.35
	5	647	872	1235	1012
		応答倍率	1.35	1.91	1.56
	6	660	889	1166	681
		応答倍率	1.35	1.77	1.03
平均		651	852	1276	992
		応答倍率	1.31	1.96	1.52

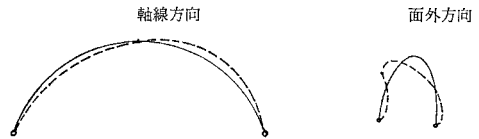


図-17 観察されるアーチの振動モード

向に関しては、6 Hz 付近に非常に応答値が大きくなる部分があり、ここが固有周波数にあたる場所ではないかと考えられた。

(2) 地震に対する石積み構造の強さについて

石積みアーチ構造の地震に対する強さが、2つの速度の dimension をもった量で規定されることから、石積みアーチは、継続時間の長い地震動に弱いことが考えられる。したがって、継続時間の短い、直下型の地震には有利なのではないかと推定できる。

アーチ形をしているときには、このように単純な構造

でも、300 gal もの耐震力を示し、実際の構造のように上載部分がある場合、アーチ部材間が何かで固定されている場合、さらに強固になることから、非常な強度をもつことが推定できる。

このように、石積み構造自体は決して有利な構造とはいえないが、アーチ形になると非常に強度が増すことが想像できる。また、レンガ構造が破壊するとき、アーチアクションが生ずる例が報告されている⁹⁾ように、クラックの入った後の振動挙動についての一つのモデル化とも考えることができる。

謝 辞：片田敏行氏（武蔵工業大学）には、実験方法やデータの取り方など、多方面の指示をいただきました。データ処理面で、飯田昌弘氏（東京大学助手）には、AD 変換・MT 操作など、森川修君（建設省）には、BASIC 言語・プロッターによる作図など、たいへんお

世話になりました。また、柴田裕司君（武蔵工業大学学生）は、相谷君・高田君とともに実験を手伝っていただいた方です。地震研究所の技術部の方々には、実験に用いた型枠などのことで助けていただきました。その他、名前を挙げきれなかった方々を含めて、深く感謝を表すところです。』

参 考 文 献

- 1) 伯野元彦ほか：1975 年大分中部地震被害調査報告，地震研究所彙報，Vol. 50, pp. 343~358, 1975.
- 2) 福岡正巳：イタリア地震の調査報告，土木学会誌，Vol. 66-10, pp. 73~79, 1981.
- 3) 畑野 正：地震の強さを決定する要素について，土木学会誌，Vol. 35-8, pp. 353~356, 1950.
- 4) McDowell, E.L., K.E. Mckee and E. Sevin : Arching Action of Masonry Walls, ASCE, Structural Division, 915-1, 18, March, 1956.

(1982.3.29・受付)