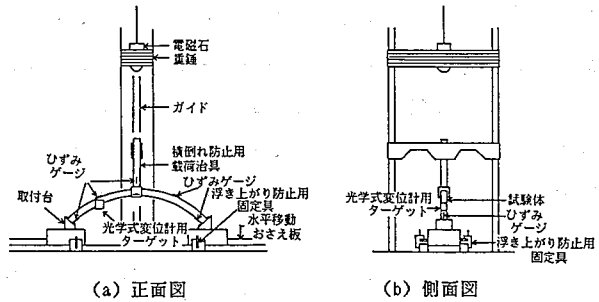


# 48 衝撃荷重を受ける鋼管円弧アーチの終局限界について

防衛大学校土木工学科      ○石川 信隆  
 同上                              星川 辰雄  
 同上                              松浦 幹佳  
 住友金属工業(株)              飯田 毅

## 1. 緒言

近年、土石流災害防止施設として従来のコンクリートダムに対し、機能性・施工性および経済性などの観点から鋼製透過式砂防ダムがいくつか考案され実用化されており、その1形態として鋼製アーチ式オープンダムも検討されている。土石流中の巨礫が衝突した際のアーチ型構造物の耐衝撃性について検討するため、先に著者らはアーチ



(a) 正面図                              (b) 側面図

図-1 落錘式衝突実験装置

の衝撃応答実験を行い、アーチの耐衝撃性すなわち衝撃吸収エネルギーおよび破壊形態についての考察を行った。本研究は鋼管円弧アーチにさらに大きな落下運動エネルギーを与えた場合の落錘式衝突実験および高速載荷実験を行い、アーチの終局限界を定性的ならびに定量的に調べようとしたものである。また、鋼管にモルタルを充填した場合の影響についても併せて考察したものである。

## 2. 実験の概要

2.1 落錘式衝突実験      実験は図-1に示すように昨年度より大きな運動エネルギーを与えるため、重量200kgf(または100kgf)の重錘を載荷治具上にガイドを通して自由落下させてアーチに衝撃を与えるようにした。試験体には座屈等横倒れを生じさせないように横倒れ防止用載荷治具を取り付け、これをガイドにはめ込み、強制的に試験体が鉛直運動のみするように工夫した。測定項目は衝撃荷重、衝突点変位およびひずみで、衝撃荷重は、載荷治具下部に4枚対称に貼付したひずみゲージの平均値によって測定し、載荷点の変位は載荷治具に光学式変位計用ターゲットを取り付け測定した。またひずみゲージを図-1の位置に貼付し、ひずみを測定した。実験ケースを表-1に示す。

2.2 高速載荷実験      実験は、図-2に示す高速変形負荷装置を用いた。この装置は、油圧ポンプにより一定の圧力に保たれた主

表-1 実験ケース

実験種類	重錘重量 (kgf)	衝突速度 (m/s)	モルタル 充填
落錘式	200	5.5	無
		4.8	
		4.0	
		4.5	
		4.65	
衝突実験	100	6.6	有
		6.86	
	200	5.5	
		4.8	
	100	4.5	
		6.23	
		6.2	

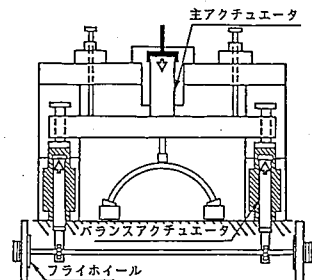


図-2 高速変形負荷装置

アクチュエータの荷重を左右2基のバランス・アクチュエータで保持し、次にバランス・アクチュエータに内蔵された制御バルブを機械的に一定速度で下方向に作動させることにより、所望の速度で試験体を変形させるものである。載荷速度すなわち試験体の変形速度は、フライホイールの回転数を調整することにより、0～4 m/sの範囲で任意に設定することができる。

表-2 実験ケース

実験種類	載荷速度 (m/s)	モルタル充填
高速載荷実験	2.0	無
	4.0	
	2.0	有
	4.0	

また、試験体の最大変位量は150mmである。測定項目は、載荷点荷重、載荷点変位およびひずみで、荷重は載荷体に付属したロードセルを用いて測定した。変位は差動トランス型変位計を用いて測定した。また、ひずみは落錘式衝突実験と同様にして測定した。実験ケースを表-2に示す。

表-3 鋼管の諸元

材質	STK 41
鋼管径 (mm)	φ 27.2
肉厚 (mm)	t 1.9
降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	4070
引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	4520
伸び (%)	28.0
断面積 (cm <sup>2</sup> )	1.510
単位重量 (kgf/m)	1.19

2.3 試験体 試験体はSTK41の鋼管(鋼管径φ27.2mm, 肉厚t1.9mm)を曲率半径559mm半中心角47.2°のアーチ型に加工したもので、鋼管にモルタルを充填した場合と中空のままの2種類を作製した。鋼管の諸元およびモルタルの配合はそれぞれ表-3および表-4に示す。

表-4 モルタルの諸元

水セメント比	0.60
セメント (kgf/m <sup>3</sup> )	710
水 (kgf/m <sup>3</sup> )	426
細骨材 (kgf/m <sup>3</sup> )	1065
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	347
備考	早強セメント使用

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 落錘式衝突実験

##### 3.1.1 荷重～変位関係

図-3は、中空鋼管に対し重量200kgfの重錘を速度V=5.5m/sおよび4.5m/sで衝突させた場合の荷重～変位曲線を示したものである。図-3より衝突速度が速いほど荷重は大きくなることが認められた。また図-4は、W=200kgf, V=4.5m/sのときの中空および

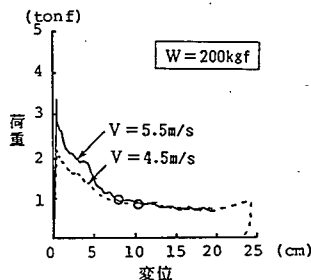


図-3 荷重～変位曲線 (中空鋼管の速度の影響)

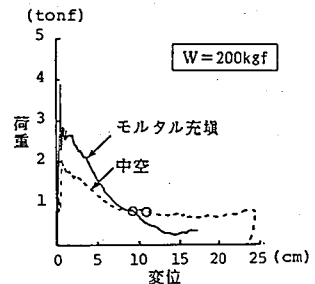


図-4 荷重～変位曲線 (V=4.5m/sにおけるモルタル充填の影響)

モルタル充填の場合の荷重～変位曲線を示したもので、モルタルを充填することにより耐力は大きくなることが認められる。

##### 3.1.2 破壊形態

先に行った衝撃応答実験<sup>1)</sup>の範囲では、アーチは図-5の(a)～(d)のように逐次塑性ヒンジが発生していき、破壊に至っていくことが認められた。本研究では、さらに大きな運動エネルギーを与えたので、モルタル充填の有無により最終破壊形態が図-5(e)の(i),(ii)のように異なっていることが認められた。すなわち、中空の場合は載荷部の局部的変形が可能であるので、図-5(e)の(i)のように固定端が破壊したが、モルタル充填の場合では局部的変形が拘束されるため図-5(e)の(ii)のように載荷部が破壊した。

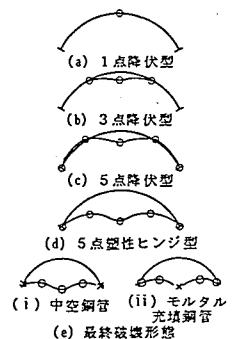


図-5 破壊形態

さて、図-6は中空鋼管にW=200kgf, V=4.65m/sで衝突した場合のアー

チのひずみ～時間曲線を示したものである。中空鋼管の他の実験ケースおよびモルタル充填鋼管の場合もほぼ同様な結果が得られている。図-6より、衝突後中央点、引き続いて1/4点のひずみが増加していくことが認められる。これに対し、支点のひずみは鋼管が降伏する程度( $\epsilon \approx 2000\mu$ )まで鋼管下面に引張が働くように増加していくが、ひずみが0となった点から鋼管下面に圧縮が働くように急激にひずみが増加していくことが認められる。このひずみが0となった点が図-5(d)の5点塑性ヒンジ型の破壊形態に対応しており、これより衝突点の変位が進むとアーチとしての構造形態の特性を有しなくなると考えられるので、この点が終局限界と定義される。よって、この点は

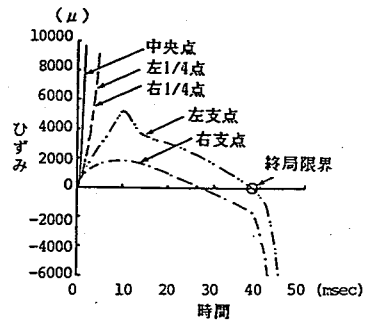


図-6 ひずみ～時間曲線

図-3および図-4の荷重～変位曲線において○印で示す変曲点に対応しており、この点までの面積を限界吸収エネルギーと定義した。

### 3. 1. 3 限界吸収エネルギー～衝突速度関係

図-7は、重錘重量 $W = 200\text{kgf}$ における限界吸収エネルギーと衝突速度との関係を、それぞれ中空およびモルタル充填の場合について示したものである。図-7より、衝突速度の大小によらず限界吸収エネルギーはほぼ一致した値を示すことが認められ、中空の場合の限界吸収エネルギーは、 $U_0 = 12.0 \sim 16.0\text{tonf}\cdot\text{cm}$ 、モルタル充填の場合は、 $U_0 = 14.0 \sim 18.0\text{tonf}\cdot\text{cm}$ であることがわかる。すなわち、本試験体はモルタルを充填することにより、約15%程度の限界吸収エネルギー量の上昇が認められる。この原因は、図-4の荷重～変位曲線において、モルタルを充填することにより荷重は大きな値を示すが、終局変位はモルタル充填の有無によらずほぼ等しい値を示すため、限界吸収エネルギーはモルタルを充填した場合の方が大きな値を示すものと考えられる。また、図-8は $W = 100\text{kgf}$ の場合を示したが、重錘重量が異なる場合でも限界吸収エネルギーは図-7とほぼ同様な結果を示すことが認められた。

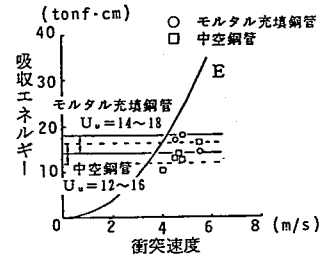


図-7 限界吸収エネルギー～衝突速度関係  
( $W = 200\text{kgf}$ の場合)

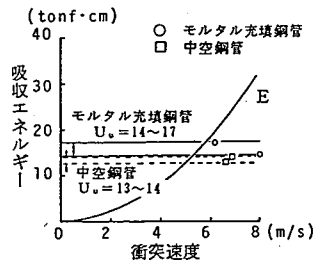


図-8 限界吸収エネルギー～衝突速度関係  
( $W = 100\text{kgf}$ の場合)

### 3. 2 高速載荷実験

3. 2. 1 荷重～変位関係 図-9は、中空鋼管およびモルタル充填鋼管に速度 $4.0\text{m/s}$ で載荷した場合の荷重～変位曲線を示したもので、図-9からもモルタルを充填することにより耐力は上昇することが認められる。図-9において○印は先に定義した終局限界に対応する点であり、高速載荷実験においても変曲点が存在することが認められる。

また、図-10は充填鋼管に $V = 4.0\text{m/s}$ で載荷した場合と先に述べた落錘式衝突実験において $W = 200\text{kgf}$ を $V = 5.5\text{m/s}$ および $4.5\text{m/s}$ で衝突させた場合の荷重～変位曲線を比較して図示したものである。図-10において衝突直後の変位速度は、 $V = 5.5\text{m/s}$ の場合は $4.6\text{m/s}$ 、 $V = 4.5\text{m/s}$ の場合は $3.5\text{m/s}$ であ

った。よって、図-10より、载荷(衝突)直後の荷重は変位速度の大きな順に大きな値を示すことが認められる。しかし、約4cm以上変位した場合、荷重値が逆転している。これは、高速载荷実験では応答が終了するまで変位速度が一定であるのに対し、衝突実験では変位速度が小さくなっていくため、ひずみ速度効果による降伏点の上昇率が逐次低下する。よって、応答が進むにつれ、高速载荷実験による荷重の方が衝突実験より大きくなったものと考えられる。

### 3. 2. 2 限界吸収エネルギー

高速载荷実験から得られた荷重～変位曲線において、先の終局限界変位までの面積を限界吸収エネルギーと定義して算定した。その結果、中空鋼管では $U_0 = 13.5 \sim 14.5 \text{ tonf} \cdot \text{cm}$ 、充填鋼管では $U_0 = 17.0 \sim 19.5 \text{ tonf} \cdot \text{cm}$ であり、落錘式衝突実験による結果よりもやや大きな値を示すものの、ほぼ等しい値を示すことが認められた。

### 4. 結言

本研究から得られた成果を要約すると、以下ようになる。

- ① 破壊形態は、一般に衝突速度の増加にともない、弾性応答型→1点降伏型→3点降伏型→5点降伏型→5点塑性ヒンジ型のように段階的に移行していくが、アーチが完全破壊した際の破壊形態は、モルタル充填の有無により異なることが認められた。
- ② アーチの終局限界は、5点塑性ヒンジ型の塑性崩壊と完全破壊型の破壊限界とに分けられるが、統一的な終局限界を定義するためには、前者の5点塑性ヒンジ型を終局限界とすることが望ましい。これは、固定端のひずみが引張から圧縮に変化した点に対応している。
- ③ モルタル充填鋼管は、中空鋼管に比し、約15%限界吸収エネルギーが大きい。
- ④ 高速载荷実験による限界吸収エネルギーは、衝突実験による値よりもやや大きくなるが、ほぼ一致することが認められた。

### 参考文献

- 1) 石川信隆, 星川辰雄, 香月智, 飯田毅: 鋼管円弧アーチの耐衝撃性に関する一考察, 平成元年度 砂防学会研究発表会概要集, pp.315~318, 平成元年5月

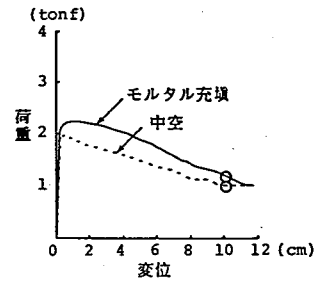


図-9 荷重～変位曲線  
(高速载荷実験:モルタル充填の影響)

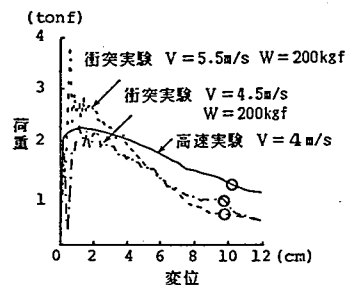


図-10 荷重～変位曲線  
(高速実験と衝突実験との比較  
:モルタル充填鋼管)