

85 鋼管円弧アーチの耐衝撃性に関する一考察

防衛大学校土木工学教室 ○石川 信隆

同 上 星川 辰雄

同 上 香月 智

住友金属工業（株） 飯田 毅

1 緒言

近年、砂防ダムの分野では、従来のコンクリートダムに対し、急速施工・補修の容易さ等の観点から鋼製砂防ダムが注目され、実用化の機運にある。このため、鋼製アーチ式砂防ダムも考案され検討されつつある。この砂防ダムの特色は、①外力を主として曲げと軸力で受けもつため、比較的少ない鋼材で大きな強度を発揮できる。②鋼製アーチ材を短スパン化して工場製作されるため、現場への搬入が容易である。③アーチの曲率を利用して土石流を谷の幅方向に振り分けるので、均一に堆砂させることができる。しかし、土石流中の巨礫が衝突した際のアーチの耐衝撃性については未だ不明な点が多い。よって、本研究は鋼製アーチ型砂防ダムの耐衝撃設計法を確立するため、鋼管円弧アーチに対する静的载荷実験および落錘式衝突実験を行い、その吸収エネルギーおよび破壊形態について考察しようというものである。

2 実験の概要

2. 1 静的载荷実験 実験に用いた装置は、200 t型アムスラーで、図-1に示すように载荷板下面にロードセルを取り付け、その下に面外座屈を防止するため、载荷治具を取り付けた。また、試験体は取付台にボルト締めし、取付台はアムスラーの载荷台上にシャコ万力等を用いて完全固定した。測定項目は、载荷点荷重、変位およびアーチのひずみで、荷重は载荷治具上に取り付けたロードセルにより、また変位はひずみゲージ式変位計を用いて測定した。ひずみは図-1に示す位置にひずみゲージを貼付して測定した。

2. 2 落錘式衝突実験 図-2に示すように、重量50kgf（または100kgf）の重錘を载荷治具上にガイドを通

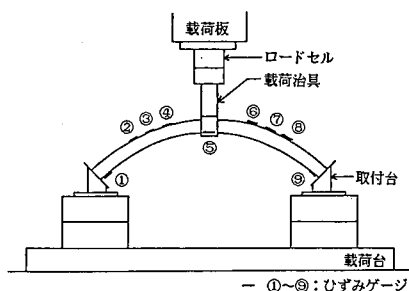
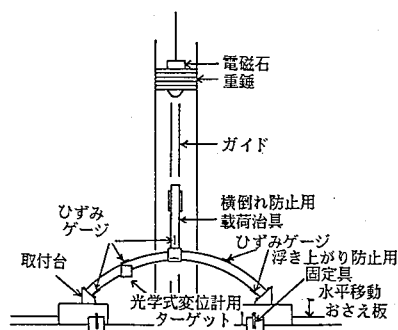
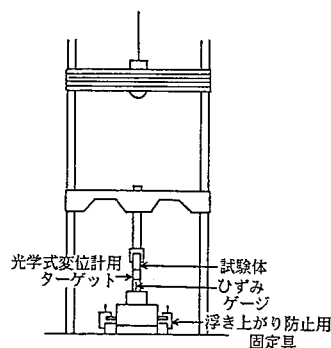


図-1 静的载荷実験装置



(a) 正面図



(b) 側面図

図-2 落錘式衝突実験装置

して自由落下させてアーチに衝撃を与えるようにした。最大落下高さは3.5mで、最大衝突速度は8.0 m/sである。重錘は電磁石により吊り上げ、電磁石のスイッチを開閉することにより落下させた。またアーチを固定支持するために試験体を取付台にボルト締めし、取付台は水平方向への移動および浮き上がりを防止するためシャコ万力等で地面上に完全に固定した。試験体には、座屈等横倒れを生じさせないように中央部（載荷位置）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をするように工夫した。測定項目は、載荷点荷重、変位およびアーチのひずみで、荷重の計測は載荷治具の下側に対称的にひずみゲージを4枚貼り付け、そのひずみ量の平均値から衝突荷重を測定した。また変位は、載荷治具および支点と中央点との中間点に光学式変位計用のターゲットを取り付け、載荷点および1/4点の

変位を測定した。ひずみは、図-2(a)に示す位置にひずみゲージを貼布して測定した。

2. 3 試験体 実験に用いた試験体はSTK41の鋼管で、鋼管径 $\phi 27.2\text{mm}$ 、肉厚 $t 1.9\text{mm}$ の鋼管を曲率半径559mm、半中心角 47.2° のアーチ形状に加工したものをを用いた。なお、静的載荷実験および落錘式衝突実験においてモルタルを充填した場合も行った。また固定支持にするため、両端に $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の鋼板を溶接し、取付台にボルト締めできるようにした。

2. 4 実験ケース 今回は表-1のようなケースの実験を行った。

3 実験結果および考察

3. 1 静的載荷実験

3. 1. 1 荷重～変位関係 図-3は、実験からえられた載荷点荷重～変位曲線（P～ δ 曲線）を示したもので、実験においてモルタル充填なしの場合はアーチ固定端の溶接部に亀裂が発生したのに対し、モルタル充填ありの場合

は載荷点に局所的な切断が生じアーチが破壊した。図-3より一般にモルタル充填の有無によらず、荷重～変位曲線は軟化型の形状を示すことが認められる。また、モルタルを充填した場合、最大荷重は大きな値を示すが、破壊時の変位は小さくなることが認められる。

3. 1. 2 静的限界吸収エネルギー 図-3に示すP～ δ 曲線において、アーチが破壊するまでに行われた外力仕事量を静的限界吸収エネルギーと定義し、その面積を計算した結果、モルタル充填なしの場合 $13.7\text{tonf}\cdot\text{cm}$ 、モルタル充填の場合 $15.1\text{tonf}\cdot\text{cm}$ で、モルタル充填の方が約9%静的限界吸収エネルギーが大きいことが認められた。

3. 2 落錘式衝突実験

3. 2. 1 荷重～変位関係 図-4(a)はモルタル充填なしで重錘重量が50kgfの場合の荷重～変

表-1 実験ケース

実験の種類	シ-ス番号	キ-ス番号	モルタル充填	重錘重量 (kgf)	衝突速度 (m/s)
静的載荷 実験	S-1	S-1-1	無		
		S-1-2			
	S-2	S-2-1	有		
		S-2-2			
落錘式 衝突実験	D-1	D-1-1	無	50	1.0
		D-1-2			2.0
		D-1-3			4.0
		D-1-4			6.0
		D-1-5			8.0
	D-2	D-2-1	有	100	1.0
		D-2-2			2.0
		D-2-3			4.0
		D-2-4			6.0
	D-3	D-3-1	有		1.0
		D-3-2			2.0
		D-3-3			4.0
		D-3-4			6.0
		D-3-5			8.0

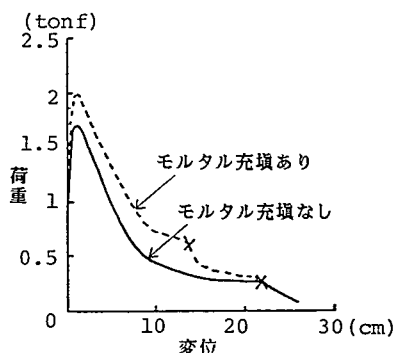


図-3 荷重～変位曲線（静的実験）

位曲線を示したものである。図-

4(a)より、一般に静的 $P \sim \delta$ 曲線より動的 $P \sim \delta$ 曲線の方が荷重 P が大きいことが認められ、また、衝突速度が速くなるに従い P が大きくなり、かつ最大および残留変位も増大することが分かる。また、動的 $P \sim \delta$ 曲線の形状は、衝突直後の荷重の立ち上がりおよび振動の影響を除けば静的 $P \sim \delta$ 曲線の

形状に類似した傾向を示すことが認められる。図-4(b)は、モルタル充填の影響を調べるために、重錘重量が100kgfで衝突速度が4.0m/sの場合のモルタル充填なしとありの場合の $P \sim \delta$ 曲線を示したもので、図-4(b)より、モルタルを充填することにより耐力は上昇するが、最大および残留変位は減少することが認められる。これは、鋼管の変形が拘束されるため、やや脆性的になるためと思われる。

3. 2. 2 破壊形態 実験後の試験体の状態を大別すると、図-5に示すように6つに区別できる。ここで降伏とは、貼付したひずみゲージの値が2000 μ を越えたもの、塑性ヒンジとは完全に断面が破壊した状態で、特に5点塑性ヒンジ型とは、1/4点の変位が上側から下側に逆転している状態をいう。表-2は実験後の試験体の各状態を示したもので、各シリーズとも衝突速度が速くなるに従い、段階的に弾性応答型→1点降伏型→3点降伏型→5点降伏型→5点塑性ヒンジ型^{1), 2)}→完全破壊型へと移行していくことが認められる。

3. 2. 3 速度が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響 図-6は、モルタル充填なしの場合の衝撃吸収エネルギーと衝突速度との関係を重錘重量を変えて示したものである。図中の記号(a), (b), .. は、図-5に示した破壊形態に対応している。図-6より衝撃吸収エネルギーは重錘の運動エネルギーにほぼ一致していることが認められる。しかし、 $W = 50\text{kgf}$ の場合の $V = 8.0\text{m/s}$ および $W = 100\text{kgf}$ の場合の $V = 6.0\text{m/s}$ において、アーチは5点塑性ヒンジ型となっており、この破壊形態以上の運動エネルギーを与えた場合、アーチは破壊する。すなわち、このときの吸収エネルギーがアーチの限界衝撃吸収エネルギー U_u で、本実験における試験体では $U_u = 17 \sim 20\text{tonf} \cdot \text{cm}$ と推測される。

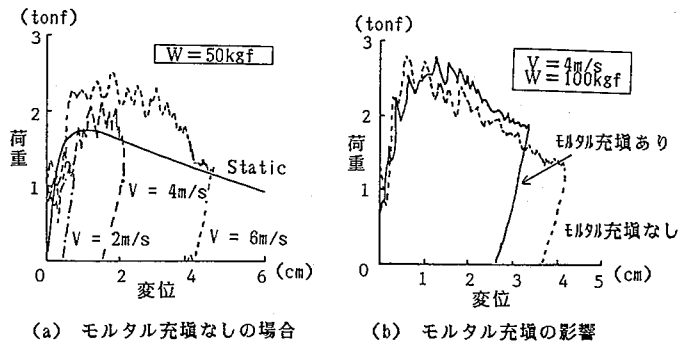


図-4 荷重～変位関係（衝突実験）

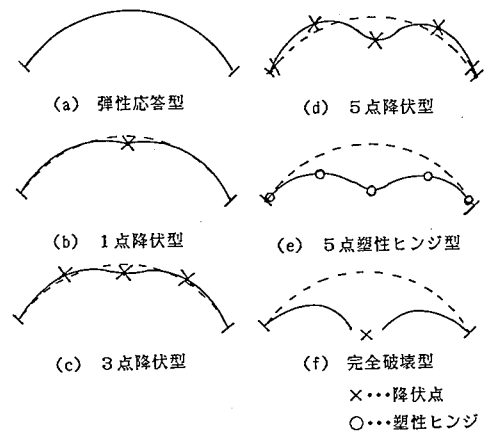


図-5 破壊形態

表-2 各ケースの破壊形態

	シリーズ D-1	シリーズ D-2	シリーズ D-3
重錘重量 (kgf)	50	100	
モルタル充填	無		有
$V = 1\text{m/s}$	(a)	(b)	(b)
$V = 2\text{m/s}$	(b)	(c)	(c)
$V = 4\text{m/s}$	(c)	(d)	(d)
$V = 6\text{m/s}$	(d)	(e)	(e)
$V = 8\text{m/s}$	(e)		(f)

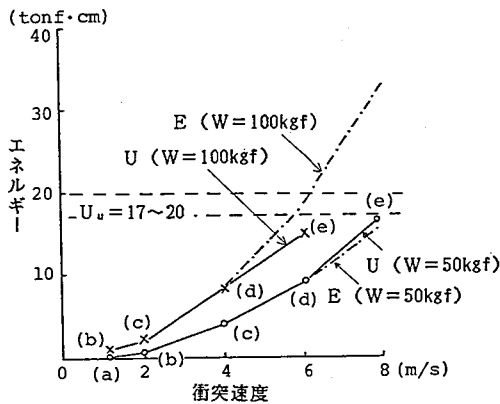


図-6 エネルギー～衝突速度関係
(モルタル充填なしの場合)

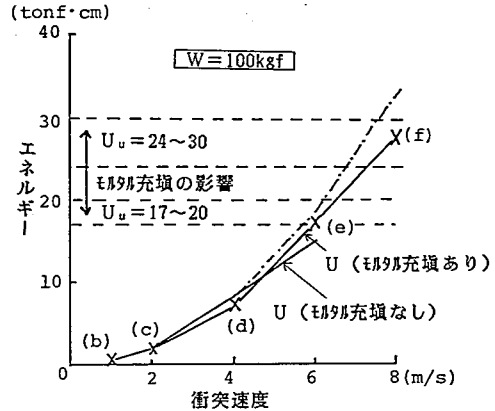


図-7 エネルギー～衝突速度関係
(モルタル充填の影響)

3. 2. 4 モルタル充填が衝撃吸収エネルギーに及ぼす影響 図-4(b)より、モルタル充填の有無によりP～δ曲線の形状は異なるが、その面積すなわち衝撃吸収エネルギーはモルタル充填の有無により変化することはない、図-7よりモルタル充填なしの場合と同様にモルタル充填ありの場合の衝撃吸収エネルギーは $V = 6.0\text{m/s}$ 以下では重錘の運動エネルギーとほぼ一致することが認められる。しかし、 $V = 8.0\text{m/s}$ においてアーチが破壊し衝撃吸収エネルギーは重錘の運動エネルギーより小さくなっている。このときの衝撃吸収エネルギーが衝撃限界吸収エネルギー U_u と予想でき、従って、本試験体のモルタル充填の場合の衝撃限界吸収エネルギーは $U_u = 24 \sim 30\text{tonf}\cdot\text{cm}$ と推測でき、モルタルを充填することにより衝撃限界吸収エネルギーは約30～50%上昇することが認められる。また静的限界吸収エネルギーに比し、衝撃限界吸収エネルギーは1.3～2倍程度大きな値を示すことが認められる。

4 結言 本研究によりえられた成果を再度要約すると以下のようになる。

- ① 鋼管にモルタルを充填することにより、衝撃限界吸収エネルギーは約30～50%増加することが認められた。
- ② 衝撃限界吸収エネルギーは静的限界吸収エネルギーの約1.3～2倍となることが認められた。
- ③ 破壊形態は、一般に衝突速度の増加に伴い1点降伏型→3点降伏型→5点降伏型→5点塑性ヒンジ型→完全破壊型のように段階的に移行することが認められた。

しかしながら、モルタル充填の有無により破壊の形態が異なり、統一的な破壊の定義ひいては衝撃限界吸収エネルギーの値が未だ明確ではない。よって、今後は統一的な破壊の定義を決めるため、アーチが破壊に至るまでの破壊実験を行っていく予定である。

最後に、本研究を行うに当たり、防衛大学校土木工学科柚山昌秀氏の御協力をえたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 横尾, 山肩: 建築構造物のリミットアナリシス, 日本建築学会, 第4章アーチ, 技報堂, 1963年7月
- 2) 山崎, 石川: 円弧アーチの弾塑性解析, 土木学会論文集第158号, pp.1～16, 昭和43年10月