

R C 製砂防ダム袖部の衝撃破壊モデル実験

防衛大学校土木工学科○鈴木 真次
 // 石川 信隆
 京都大学農学部 水山 高久
 建設省土木研究所 石川 芳治
 八千代エンジニアリング(株) 下田 義文

1. 緒言

現在、土石流防護のために急流河川域において、砂防構造物が数多く作られているが、そのほとんどは無筋コンクリート製砂防ダムであるため、土石流中の巨礫の衝突によりダム袖部がしばしば破壊される例がみられる。平成元年の土石流対策指針(案)¹⁾において、鉄筋や緩衝材等により補強が可能となったが、現在考えられている補強は、袖部の上流側(巨礫の衝突点側)のみに鉄筋や鉄骨を入れるもの²⁾と両側に入れるタイプとがある。しかし、袖部を鉄筋により補強した際の巨礫の衝突現象やその効果は未だ不明である。一方、鉄筋コンクリート部材に対する耐衝撃性に関する研究は数多く行われているが^{3), 4), 5)}、土石流中の巨礫を受けるダム袖部^{6), 7)}の耐衝撃性に関する研究は無筋コンクリートの袖部に関するもの以外ほとんど行われていない。

本研究では、上記のような観点から、鉄筋コンクリート(RC)製砂防ダム袖部の耐衝撃設計法を確立するために、その設計基準に必要な終局限界をまず定性的に定めようとしたものである。つまり、RC製砂防ダム袖部の破壊モードを衝撃载荷実験によって調べ、各種の破壊モードの中から共通かつ統一的な終局限界を実験的に求めようとしたものである。

2 実験の概要

2.1 水平衝撃载荷装置の概要

砂防ダム袖部は、本堤の上部に自立しており、主として水平方向からの巨礫を受けるため、水平衝撃载荷装置の開発が必要となった。ここでは、土石流の巨礫の速度が最大約20m/sec(相似則⁸⁾)により模型では6.3m/sec)程度⁹⁾であることと、袖部の破壊状況に多く見られる巨礫の重量が約10tonf(相似則によって100kgf)程度^{6), 9), 10)}であることなどを考慮し、かつ機構が単純で室内で水平的に加速できる「ばね载荷方式」を開発した。図-1は、本水平衝撃荷重装置の概要図であり、衝突物体をゴムで引っ張り、ガイドレールにそって供試体に水平に衝突させる装置である。性能および機能を表-1に示す。

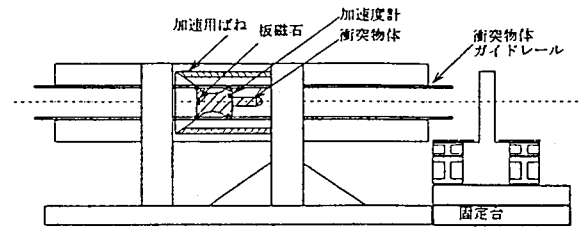


図-1 水平衝撃载荷装置

表-1 水平衝撃载荷装置の性能および機能

番号	項目	性能および機能
1	载荷方式	ばねによる加速载荷
2	衝突体重量	約100kgf~200kgf
3	衝突体先端形状	平坦、半球、円錐
4	衝突速度	0.7m/sec~20m/sec
5	载荷方向	水平
6	ばね伸長長さ	150cmまで可変
7	ばね伸長方式	油圧ジャッキ

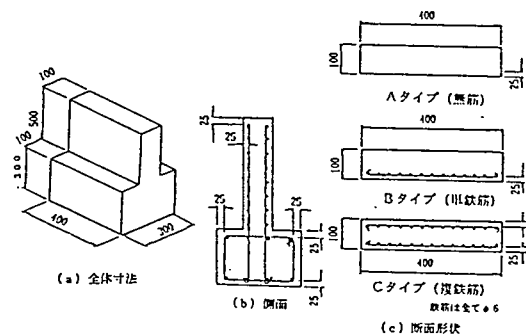


図-2 供試体の形状

表-2 モルタルの諸元

水セメント比(%)	55
水(kg/m ³)	245
セメント(kg/m ³)	461
砂(kg/m ³)	1310
圧縮強度(kg/m ²)	306

2. 2 供試体および測定項目

供試体は、図-2に示す砂防ダム袖部の1/10サイズの片持ちばりをA（無筋）、B（単鉄筋）、C（複鉄筋）の3タイプの断面として用いた。使用したモルタルの諸元を表-2に、また鉄筋は全てφ6を用い鉄筋量を表-3に示した。測定項目は、衝突体に取り付けた加速度計により荷重（加速度×重錘）および衝突点の変位（加速度を2回積分）を測定した。なお、衝突速度は、光センサーを用いて2点間の距離を衝突物体の通過時間で割ることにより測定した。

2. 3 実験ケース

実験ケースとしては表-4のように、衝突体の重量 $W=100\text{kgf}$ および先端形状 $R=10\text{cm}$ を一定として、衝突速度を各タイプに応じて変化させ、はり部根元部から30cmのところに衝突させた。

3 実験結果および考察

3. 1 各タイプの破壊状況

Aタイプでは、表-4に示すように徐々に速度を上げてその破壊状況を観察した。その結果 $V=0.78\text{m/sec}$ 以下では図-3(a)に見られるようにひび割れがほとんど発生しなかったが、 $V=1.08\text{m/sec}$ になると図-3(b)に見られるように根元部の引張ひび割れの発生により一挙にひびが裏面まで進展して破壊した。これは、無筋コンクリートの破壊の特性であるぜい性破壊であり、実際の砂防ダム袖部の土石流による破壊もほとんどがこのように根元部がきれいに切断されている⁸⁾。

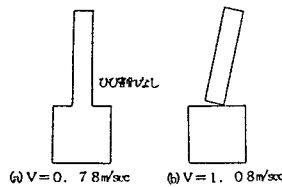


図-3 Aタイプの破壊状況

次に、Bタイプ（単鉄筋）の場合は、低速（0.69, 0.74m/sec）ではひびがまったく発生しなかったが、 $V=1.06\text{m/sec}$, 1.25m/sec , 1.39m/sec と速度を上げると、図-4(a)のように根元部で引張側のひび割れが発生した。さらに速度を上げると図-4(b)のように $V=2.69\text{m/sec}$ で根元部での表面からのひび割れと、裏面にもひび割れが生じ、 $V=4.93\text{m/sec}$ および 5.13m/sec では図-4(c)のように根元部の表面からの引張ひび割れと裏面からの引張ひび割れ（振動により裏面側も引張になる）が連結する状態となった。この状態では、はり部と固定部が完全に分離し、衝突後手で押すとぐらぐらすることを確認した。さらに、 $V=6.34\text{m/sec}$ になると、Bタイプは図-4(d)のようにほぼ完全に破壊した。

表-3 鉄筋量

タイプBの鉄筋量	主筋 (m)	$0.72 \times 13 = 9.36$
	配力筋 (m)	$0.42 \times 8 = 3.36$
基礎部 (m)	$0.82 \times 13 = 10.66$	
	$0.42 \times 6 = 2.52$	
計	25.90m	
重さ	$25.90 \times 0.249 = 6.45\text{kg}$	
タイプCの鉄筋量	主筋 (m)	$0.72 \times 26 = 18.72\text{m}$
	配力筋 (m)	$0.42 \times 16 = 6.72\text{m}$
基礎部 (m)	$0.82 \times 13 = 10.66\text{m}$	
	$0.42 \times 6 = 2.52\text{m}$	
計	38.62m	
重さ	$38.62 \times 0.249 = 9.62\text{kg}$	

鉄筋は全てφ6

表-4 衝突実験の実験ケース

	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
衝突体の重量 (W)	100kgf	100kgf	100kgf
衝突速度	①0.37m/sec ②0.54 ③0.78 ④1.08 ⑤1.21 ⑥1.62	①0.69m/sec ②0.74 ③1.06 ④1.25 ⑤1.39 ⑥2.69 ⑦2.69 ⑧4.93 ⑨5.13 ⑩6.34 ⑪7.15	①0.68m/sec ②0.76 ③1.10 ④1.11 ⑤2.51 ⑥2.77 ⑦4.96 ⑧5.09 ⑨7.17 ⑩7.19 ⑪7.23 ⑫8.01

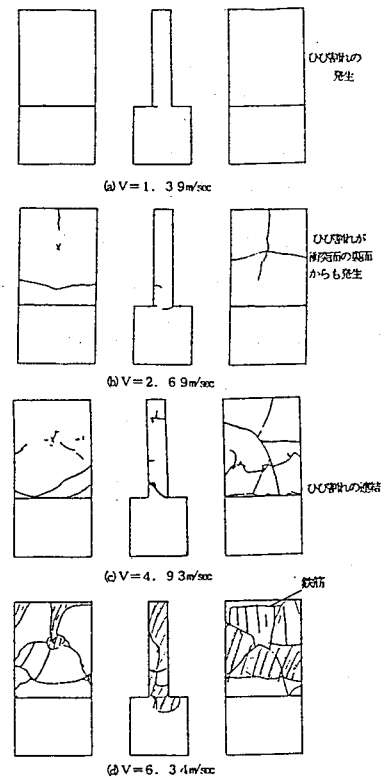


図-4 Bタイプの破壊状況

Cタイプ（複鉄筋）の場合は、 $V=1.11\text{m/sec}$ まではひび割れの発生は認められなかったが、 $V=2.$

77m/secとなると図-5 (a)のように根元部に引張りひび割れが観察された。さらに速度を上げると $V=4.96, 5.09\text{m/sec}$ で図-5 (b)のように、根元部の表面からのひび割れと同時に、裏面からも僅かに圧壊による圧縮ひび割れが生じており、 $V=7.17, 7.19, 8.01\text{m/sec}$ では、図-5 (c)のように表面からの引張りひび割れと裏面からの圧壊による圧縮ひび割れが進行して連結していることが認められた。また衝撃点の裏面には放射状ひび割れと円弧状のひび割れが同時に発生しており、裏面剥離が起こる寸前の状態であった。

3.3 動的終局限界の定義に関する検討

次に、終局限界状態の候補として表-5に示す5つの定義を検討する。すなわち、①載荷点での局部破壊、②袖部付近引張側ひび割れ生起、③最大耐力点、④袖部根元部のひび割れ連結によるモルタル部切断および⑤鉄筋切断である。

①載荷点での局部破壊：Bタイプ（単鉄筋）において $V=6.34\text{m/sec}$ 以上ではり部全体の破壊とともに衝突点の破壊が発生した。しかし、Cタイプ（複鉄筋）では図-5 (c)に見られ

るように全体的にひび割れが見られるが局部の破壊は観察できなかった。また、Aタイプ（無筋）では局部破壊と見なされる現象は見られなかった。

②袖部付近引張側ひび割れ生起：Aタイプでは図-3 (b)、Bタイプでは図-4 (b)、Cタイプでは図-5 (a)に対応している。しかし、単鉄筋や複鉄筋であるB、Cタイプがこれにより耐力が低下することは考え難い。

③最大耐力点：荷重～時間における最大耐力は衝突速度ごとに変化し、その際に袖部に生じている破壊現象を特定することは困難である。

④袖部根元部のひび割れ連結によるモルタル部切断：Aタイプでは、この定義は②と同じ点となり②を包含する定義となる。Bタイプでは、図-4 (c)に対応しており、定義①の局部破壊限界への移行期とも考えられる。Cタイプでは図-5 (c)に対応し、この状態ではほぼ全体にひび割れが広がるが、裏面側の鉄筋により定義①の局部破壊への移行を抑制しているものとする。

これより静的および動的実験に対して、この④の状態が共通した終局限界と定めることができる。

⑤鉄筋切断：本実験の範囲では、生起しなかった。

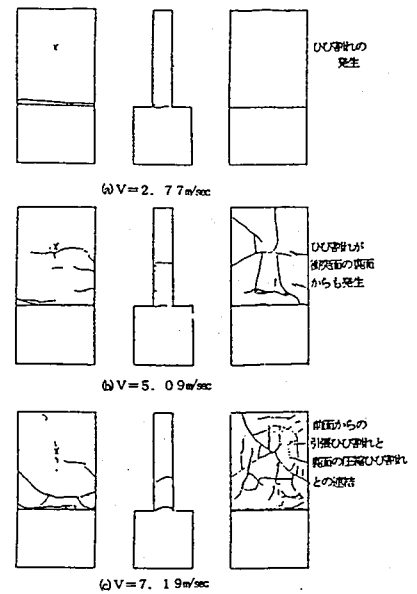


図-5 Cタイプの破壊状況

表-5 衝突実験結果に対する終局限界定義の検討

区分	Aタイプ (無筋)	Bタイプ (単鉄筋)	Cタイプ (複鉄筋)
① 載荷点での局部破壊	発生せず	$V=6.34\text{m/sec}$ $E=205\text{tonf}\cdot\text{mm}$ 表裏面コンクリート部に大きな欠落部分発生 裏面剥離なし (図-4 (d) 対応)	対応状態なし 図-5 (c) の場合 全面にひび割れが 発生しているが欠 落部分なし
② 袖部付根の引張りひび割れ	$V=1.08\text{m/sec}$ $E=6\text{tonf}\cdot\text{mm}$ ほぼ同時に袖部切断 裏面剥離なし (図-3 (b) 対応)	$V=1.06\text{m/sec}$ $E=6\text{tonf}\cdot\text{mm}$ 裏面剥離なし (図-4 (a) 対応)	$V=2.77\text{m/sec}$ $E=39\text{tonf}\cdot\text{mm}$ 裏面剥離なし (図-5 (a) 対応)
③ 最大耐力	衝突速度ごとに変化し、その際袖部に生じている破壊状況を特定することが困難となる		
④ 袖部根元部のひび割れ連結によるモルタル部切断	$V=1.08\text{m/sec}$ $E=6\text{tonf}\cdot\text{mm}$ 定義②と同じ (図-3 (b) 対応)	$V=4.93\text{m/sec}$ $E=124\text{tonf}\cdot\text{mm}$ ほぼ全面にひび割れが広がるが定義①の限界への移行初期とも考えられる (図-4 (c) 対応)	$V=7.19\text{m/sec}$ $E=263\text{tonf}\cdot\text{mm}$ ほぼ全面にひび割れが広がるが、裏面側の鉄筋によりひび割れ形状は抑制されている (図-5 (c) 対応)
⑤ 鉄筋の切断	定義できず	生起せず	生起せず

以上の検討を総合的に判断すると、定義④によるものが、衝突実験においてA, B, C各タイプの破壊モードを統一的に適用でき、鉄筋補強を的確に表現できる終局限界であると思われる。

以上より、無筋および鉄筋コンクリート製砂防ダム袖部における破壊モードは、根元部におけるはり部と固定部（本堤部）との切断という型となり、これは、局部応答でなく全体的応答の破壊モードであり、共通かつ統一的な終局限界と定義することができる。よって、鉄筋コンクリート製砂防ダムにおける設計基準としては、この定義④の破壊モードに達するまでのエネルギーを定量的に決定すればよいことになる。

3. 5 鉄筋補強の効果

衝撃実験では、Aタイプが限界速度 $V=1.08\text{m/sec}$ に対し、Bタイプ（単鉄筋）では $V=4.93\text{m/sec}$ とエネルギー的には約25倍、Cタイプ（複鉄筋）では、 $V=7.2\text{m/sec}$ とエネルギー的に約50倍あることが認められ、またCタイプはエネルギー的にBタイプの約2倍あることがわかった。よって、破壊モードからみても振動による裏面の引張りひび割れを防ぐ意味からも当然ながらCタイプのような複鉄筋の断面を採用することが望ましいといえる。

4. 結論

本研究は、鉄筋コンクリート製砂防ダム袖部の耐衝撃設計法を確立するため、砂防ダム袖部をモデル化した無筋および鉄筋片持ちはりの供試体に対し、水平衝撃実験を行ったもので、再度本研究の成果をまとめると以下のようなことになる。

(1) 衝撃載荷実験において、根元部における表面ひび割れと裏面ひび割れの連結による破壊モードを動的終局限界状態と定義できた。

(2) 動的には、鉄筋の影響により単鉄筋では約25倍、複鉄筋では約50倍のエネルギー上昇が認められた。

(3) 鉄筋コンクリート製砂防ダム袖部の耐衝撃設計の設計基準としては、局部的破壊ではなく袖部と本堤との境界部におけるひび割れの連結による全体応答としての破壊モードが共通かつ統一的な終局限界状態と定めることができた。

参考文献 1) 建設省河川局砂防部砂防課；土石流対策技術指針（案）、平成元年10月

2) 建設省土木研究所；土木技術資料第32巻第11号、pp. 20~21、1990年11月

3) 土木学会；構造物の衝撃挙動と設計法、第三篇、pp. 56~136、平成6年1月

4) 藤井学、宮本文穂、森川英典；衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集、第360号/V-3、pp. 51~60、1995. 8

5) (財) 電力中央研究所；飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法、電力中央研究所報告、総合報告U24、1991. 7

6) 下田義文、水山高久、石川信隆、古川浩平；巨礫を受けるコンクリート製砂防ダム袖部の衝撃模型実験と被災例シミュレーション、土木学会論文集、No. 145/I-20、pp. 131~140、1992. 7

7) 下田義文、鈴木真次、石川信隆、古川浩平；個別要素法によるコンクリート製砂防ダムの衝撃破壊シミュレーション解析、土木学会論文集、No. 480/VI-21、pp. 97~106、1993. 12

8) 江守一郎；模型実験の理論と応用第2版、技報堂出版、pp. 156~pp. 161、1988年9月20日

9) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室；砂防ダムの被害実態調査、土研資料、第1514号、昭和54年6月

10) 建設省土木研究所砂防部砂防研究室；砂防ダムの被害実態調査(2)、土研資料、第2491号、昭和62年6月