

(15) 鉄筋補強コンクリート製砂防ダムの 衝撃応答について

防衛大学校 ○鈴木 真次 山崎 義浩 石川 信隆
建設省土木研究所 石川 芳治
京都大学 水山 高久

1. 緒言

現在、土石流防護のために急流河川域においてコンクリート製砂防ダムが建設されているが、その殆どは無筋コンクリートであるため、土石流中の巨礫の衝突によりその袖部がしばしば破壊する例がみられる。巨礫には直径2 m以上のものがあり、その耐衝撃性のためには袖部厚を4 m以上としなければならない。先に著者ら¹⁾は、無筋コンクリート製砂防ダムの弱点を補うため、鉄筋コンクリート製片持ちりの模型を用いた衝撃実験を行い、鉄筋の効果を確認した。本研究は、この実験の現象を理論的に解明するため、まず鉄筋コンクリートの理論を応用した断面分割法を用いて曲げモーメント (M) ~ 曲率関係を求め、塑性曲げモーメント (M_p) と終局曲率 (ϕ_u) を算出した。次に、この $M \sim \phi$ 関係および曲げとせん断力を考慮した剛体ばねモデルを用いて鉄筋で補強したコンクリート製片持ちりの衝撃応答解析法を開発し、実験結果と比較して本解析法の妥当性を検討すると共に、鉄筋による補強を行った場合の効果について検討を行った。なお、本研究では以下の仮定を用いる。(1) 鉄筋補強コンクリート製片持ちりの断面は、平面保持の仮定が成り立つものとする。(2) 剛体ばねモデルは、曲げとせん断を考慮する。(3) 破壊は、鉄筋補強コンクリート製片持ちりの引張縁のひずみが破断ひずみに達したときとする。

2. 断面分割法による曲げモーメント~曲率関係の算定

鉄筋コンクリート製片持ちりの曲げモーメント (M) ~ 曲率 (ϕ) 関係を算定するために、まず図-1 に示すように断面を分割して図-2の応力~ひずみ関係を用いて圧縮合力 C と引張合力 T が等しくなるように中立軸の位置 x_0 を求める。よって、合力重心間距離 Z は $Z = Z_c - Z_t$ となり、曲げモーメント M は $M =$

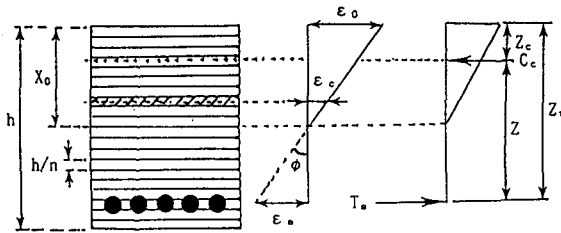


図-1 ひずみおよび応力分布図

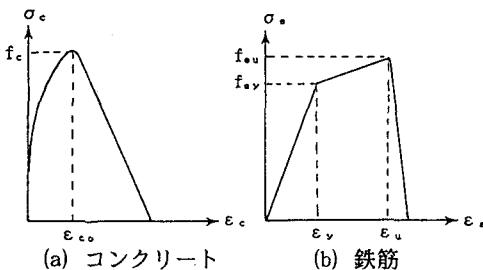


図-2 応力~ひずみモデル

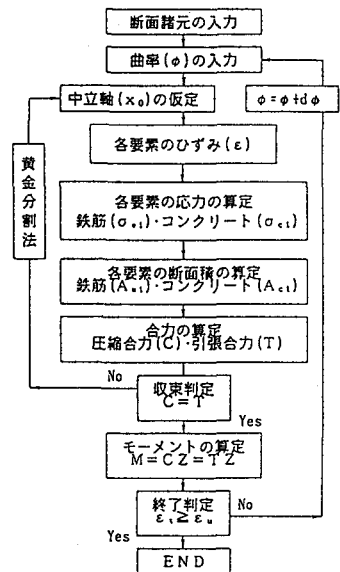


図-3 $M \sim \phi$ 関係算定フローチャート

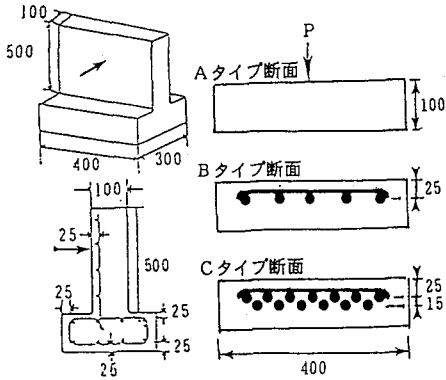


図-4 供試体断面

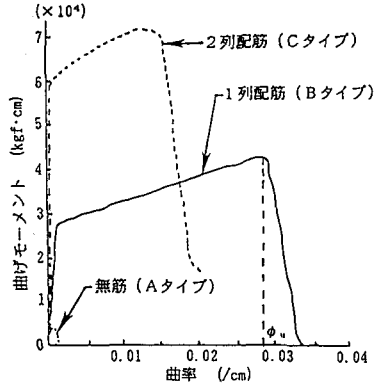


図-5 M~φ関係

C・Z=T・Zによって算定される。以上の計算を図-3のように逐次曲率を増加させながら引張縁のひずみが鉄筋の破断ひずみに達するまで計算を行う。

著者ら¹⁾が先に行った衝撃載荷実験で用いた図-4に示すAタイプ(無筋)、Bタイプ(1列配筋)、Cタイプ(2列配筋)の無筋および鉄筋補強断面の曲げモーメント(M)~曲率(φ)関係を求めると図-5のようなM~φ関係が求められる。なお、コンクリートの諸元は表-1に、鉄筋の諸元は表-2に示すとおりである。

3. 剛体ばねモデルによる衝撃破壊解析

3.1 離散化モデルによる基本式 図-6に示すように巨礫の衝突を受ける片持ちばりを、いくつかの要素に分割し、その各節点で曲げばねおよびせん断ばねを有する離散化モデルによって表すものとする。また、鉄筋補強コンクリート製はりに重錘が衝突する際の衝突点荷重Pは、図-6のように局部ばねと局部ダッシュポットを導入することにより、次式を用いて算定される。

($u_w - u_{AP}$) ≥ 0 の場合;

$$P = K_w(u_w - u_{AP}) + C_w(\dot{x}_w - \dot{x}_{AP}) \quad (1a)$$

($u_w - u_{AP}$) < 0 の場合; $P = 0 \quad (1b)$

ただし、 u_w, \dot{x}_w : 重錘の変位および速度、

u_{AP}, \dot{x}_{AP} : 衝突点におけるはりの変位および速度、

K_w, C_w : 局部ばね係数および局部減衰係数

3.2 衝撃破壊解析法 衝撃破壊解析の手順は、初速度 V_0 を与え図-7の計算フローチャートのようにニューマークβ法を用いて行い、最終的に応答曲率 ϕ_u が図-5に示すような終局曲率 ϕ_u に達したときをもって破壊として計算を終了する。

表-1 コンクリート諸元

種類	普通コンクリート
圧縮強度 (kgf/cm ²)	306
引張強度 (kgf/cm ²)	25.8
ヤング係数 (kgf/cm ²)	1.94 × 10 ⁵
せん断弾性係数 (kgf/cm ²)	8.34 × 10 ⁴
水セメント比 (%)	55
水 (kg/m ³)	254
セメント (kg/m ³)	461
砂 (kg/m ³)	1310

表-2 鉄筋諸元

種類	Bタイプ	Cタイプ
種類	D 6	
公称直径 (mm)	6.35	
単位重量 (kg/m)	0.249	
ヤング係数 (kgf/cm ²)	2.1 × 10 ⁵	
降伏点 (kgf/cm ²)	2400	
主筋 (m)	0.55 × 5 = 2.75	0.55 × 13 = 7.15
配力筋 (m)	0.35 × 5 = 1.75	0.35 × 5 = 1.75
合計 (kg)	4.5 (1.1205)	8.9 (2.2161)

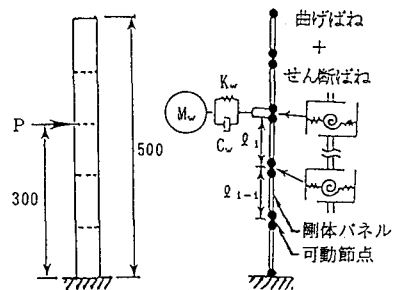


図-6 離散化モデル

4. 数値計算例

ここでは著者らが行った衝撃実験¹⁾を解析対象とし解析を行った。図-5のM~φ関係よりA、B、C各タイプのEI、M_p、φ_uを決定した。また局部ばね係数K_wは図-8の荷重~局部めり込み変位関係からK_w=4.17×10⁴kgf/cm、減衰定数h_wはコンクリート製構造物の一般的な値であるh_w=0.05を用いた。各タイプの入力データを一例として、表-3に示す。なお、降伏せん断力S_pについてはACIの式、

$$S_p = 0.924 \times \phi \times \sqrt{\sigma_{c2} \times A} \quad , \quad \phi = 0.75 \text{より計算した。}$$

4.1 荷重~時間関係 図-9にBタイプのV=5m/sの衝突点荷重~時間関係を示す。荷重のピーク値はほぼ一致しており、波形の第一目についても比較的良くシュミレートされている。

4.2 変位~時間関係 同じくBタイプ、V=5m/sにおける衝突点の変位~時間関係を図-10に示す。計算値は比較的良く実験値をシュミレートしている。

4.3 荷重~変位関係 図-11にCタイプV=5m/sにおける衝突点荷重~変位関係を示すが、この場合も概ね実験値を良くシュミレートしていることが認められる。次に、図-12にV=5m/sにおけるA、B、C各タイプの荷重~変位関係を計算した図を示す。ここで最大荷重値は、Aタイプに比べB、Cタイプの方が大きく鉄筋により補強したことによる耐力の増加が認められる。また変位について見るとA、Bタイプはそれぞれ終局曲率においてAタイプは7.2mm、Bタイプは17.5mmで破壊したが、Cタイプは破壊に至らずC、B、Aタイプの順に応じて変形性能が高いことが確認される。

4.4 衝撃吸収エネルギー~変位関係 図-13はCタイプのV=5m/sにおける衝撃吸収エネルギー~変位関係を示したもので、計算値は実験値よりも約2倍も大きくなっているが、これは計算値の方が限界まで示したのに対し、実験値は応答値を示したもので、未だ破壊に至っていないことを示している。次に、V=5m/sにおけるA、B、C各タイプの衝撃吸収エネルギー~変位関係を計算した図を図-14に示す。

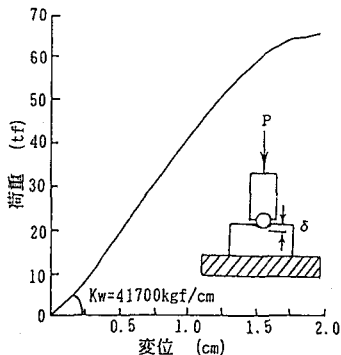


図-8 荷重~局部めり込み変位関係

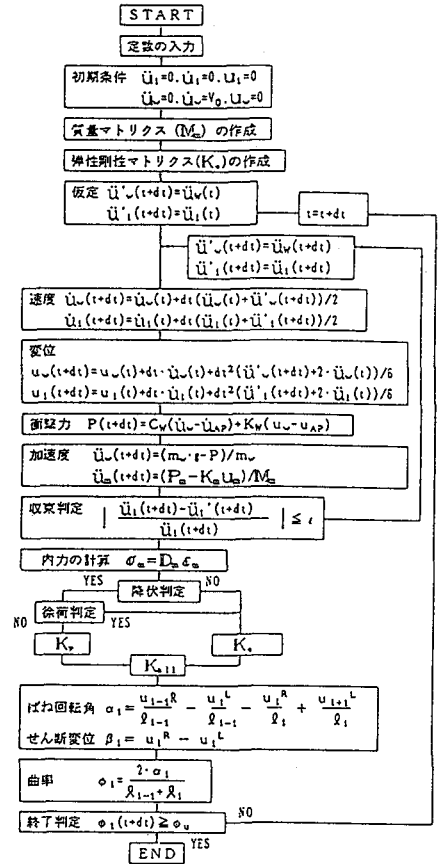


図-7 衝撃破壊解析フローチャート

表-3 入力データ

		Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
曲げ剛性:EI	kgfcm ²	19.50×10 ⁸	4.236×10 ⁷	1.44×10 ⁸
せん断弾性係数:G	kgf/cm ²	8.34×10 ⁴		
降伏モーメント:Mp	kgf·cm	3900	42360	72023
降伏せん断力:Sp	kgf	7274	3297	2827
終局曲率:φ _u	/cm	2.0×10 ⁻⁵	2.85×10 ⁻²	1.5×10 ⁻²
局部ばね定数:C _w	kgf·s/cm	4.17×10 ⁴		
局部減衰係数:K _w	kgf/cm	2.0×0.05√(80.0/980)K _w		

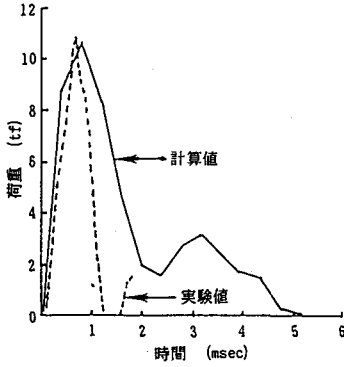


図-9 荷重～時間関係
(Bタイプ V=5.0m/s)

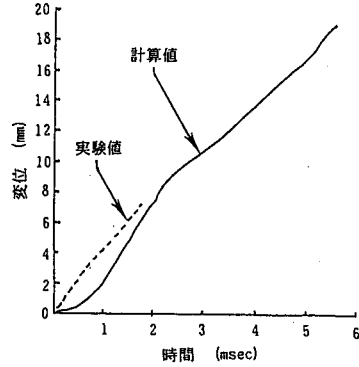


図-10 変位～時間関係
(Bタイプ V=5.0m/s)

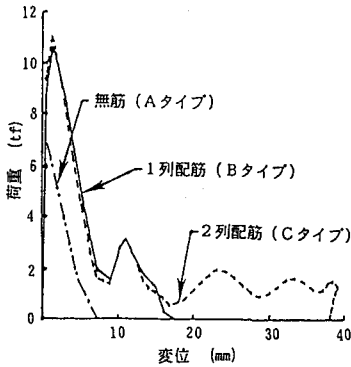


図-11 荷重～変位関係
(Cタイプ V=5.0m/s)

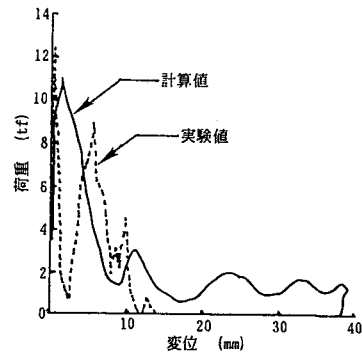


図-12 荷重～変位関係
(W=80kgf V=5.0m/s)

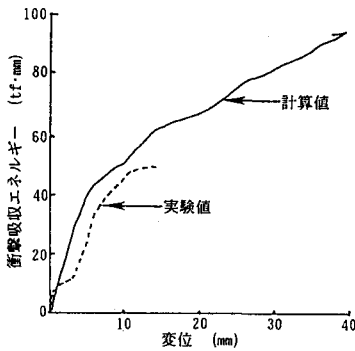


図-13 衝撃吸収エネルギー
～変位関係
(Cタイプ V=5.0m/s)

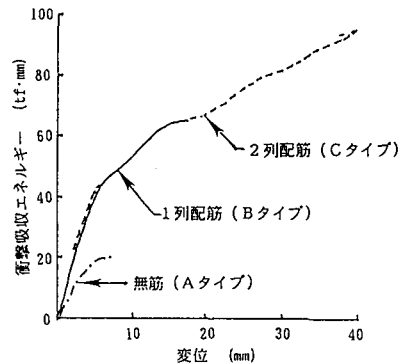
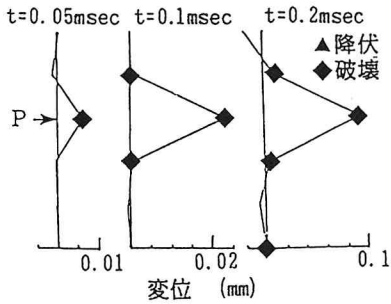


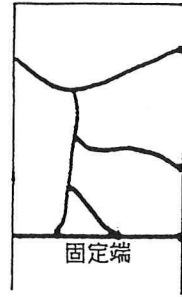
図-14 衝撃限界吸収エネルギー
～変位関係
(W=80kgf V=5.0m/s)

吸収されたエネルギーはC、B、Aの順に大きく、破壊しなかったCタイプの衝撃吸収エネルギーは重錘 (W=80kgf) の持っていた運動エネルギー (E=102.0tf·mm) にほぼ等しい。

4. 5 破壊状況 V=5m/sにおいてA、B、C各タイプの時間経過にともなうはりの変形および降伏、破壊状況を図-15、16、17と写真-1、2、3に示す。計算ではAタイプについてまず衝撃荷点が50μsecで破壊し、さらに100μsecでその周辺の節点部が破壊した。その後固定端部が200μsecで破壊した。これはV=5m/sにおけるAタイプが固定端だけでなく衝撃荷点を中心として四方に砕け散った状況に一致する。さらに、図-16のBタイプについては衝撃荷点が0.5msec、固定端部が1.4msecで降伏し横一線

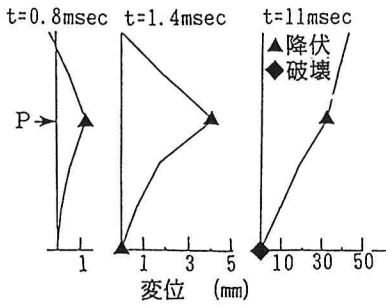


(a) 変形モード

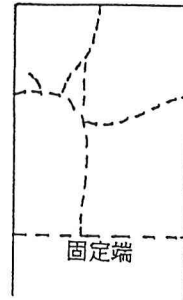


(b) 裏面の状況 (実験)

図-15 Aタイプ (無筋) の破壊状況
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)

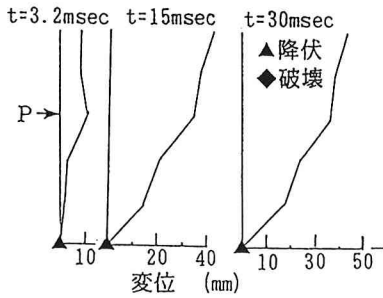


(a) 変形モード

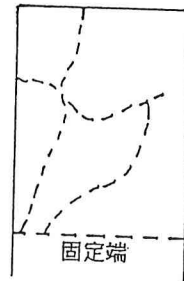


(b) 裏面の状況 (実験)

図-16 Bタイプ (1列配筋) の破壊状況
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)



(a) 変形モード



(b) 裏面の状況 (実験)

図-17 Cタイプ (2列配筋) の破壊状況
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)

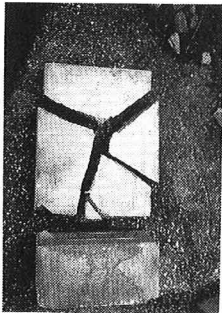


写真-1 Aタイプの破壊
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)

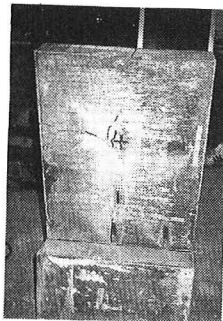


写真-2 Bタイプの破壊
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)

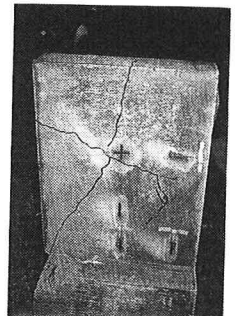


写真-3 Cタイプの破壊
($W=80\text{kgf}$ $V=5.0\text{m/s}$)

のひび割れを生じ、11msecで固定端部が破壊した。図-17のCタイプは3.2msecで固定端部が降伏したが、はり部にはひび割れを生じることなく破壊には至らなかった。しかし、 $V=5\text{m/s}$ における実験ではB、Cタイプ共に固定端部の他、載荷点を中心として四方に向かってひび割れを生じて破壊し、B、C両タイプの間にも顕著な違いが見られなかった。しかし、これらの計算結果は写真-1、2、3の実験結果と一致する。 $V=7\text{m/s}$ においてはB、Cタイプ共に写真-4に示すような裏面剥離を生じて破壊したが、その状況についてはシュミレートできなかった。

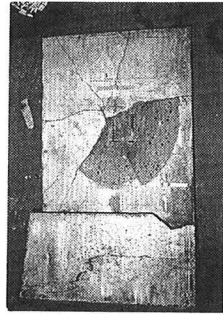


写真-4 Cタイプの破壊
($W=80\text{kgf}$ $V=7.0\text{m/s}$)

次に、計算において各速度についてA、B、Cタイプの固定端部と衝撃載荷点の降伏、破壊の順序の比較を表-4に示す。 $V=3\text{m/s}$ ではAタイプは衝撃載荷点、固定端部の順に破壊し、Bタイプでは固定端部、衝撃載荷点の順に降伏したが破壊しなかった。またCタイプも固定端部のみが降伏したが破壊に至らなかった。 $V=5\text{m/s}$ ではAタイプは $V=3\text{m/s}$ と同じであったが、Bタイプは先に衝撃載荷点が降伏し、後に固定端部が降伏し固定端部で破壊した。Cタイプは $V=3\text{m/s}$ と同様であった。 $V=7\text{m/s}$ ではA、Bタイプは $V=5\text{m/s}$ と同様な破壊を示した。Cタイプでは衝撃載荷点が先に固定端部が後に降伏し、ついには固定端部で破壊した。以上の結果より、載荷速度が増加するに従い衝突直後の載荷部における加速度および慣性力が増大し、固定端だけでなく自由端も拘束されたような動きとなり、両端固定はりのようになる傾向が増して瞬間的に載荷点に局部的な応力が発生し固定端部よりも先に降伏、破壊するものと思われる。

5. 結論

以上より本研究の成果をまとめると以下になる。

- (1) 無筋および鉄筋補強コンクリート製片持ちはりの衝撃応答解析法を開発し、実験を概ねシュミレートすることができた。
- (2) 数値計算においても鉄筋で補強することにより、はりの耐力および変形性能はC、B、Aの順に大きく、衝撃吸収エネルギーも大きいということが認められた。
- (3) 載荷速度が増加するにしたがい、載荷点への局部的な応力が増大し、固定端部よりも先に衝撃載荷点において降伏、破壊が発生することがわかった。
- (4) 速度が速い場合 ($V=7\text{m/sec}$) の破壊状況については、計算で実験をうまくシュミレートしきれない部分があった。

5. 結論

以上より本研究の成果をまとめると以下になる。

- (1) 無筋および鉄筋補強コンクリート製片持ちはりの衝撃応答解析法を開発し、実験を概ねシュミレートすることができた。
- (2) 数値計算においても鉄筋で補強することにより、はりの耐力および変形性能はC、B、Aの順に大きく、衝撃吸収エネルギーも大きいということが認められた。
- (3) 載荷速度が増加するにしたがい、載荷点への局部的な応力が増大し、固定端部よりも先に衝撃載荷点において降伏、破壊が発生することがわかった。
- (4) 速度が速い場合 ($V=7\text{m/sec}$) の破壊状況については、計算で実験をうまくシュミレートしきれない部分があった。

参考文献

- 1) 折出誠、山崎義浩、石川信隆、石川芳治:鉄筋コンクリート製砂防ダムの衝撃実験について、土木学会第20回 関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.36~37、平成5年3月

表-4 固定端および載荷点の降伏、破壊順序

速度 (m/s)	タイプ	状況	固定端 (msec)	載荷点 (msec)
V = 3	A	破壊	0.5	0.1
	B	降伏	1.3	1.5
	C	降伏	3.3	
V = 5	A	破壊	0.2	0.05
	B	降伏 破壊	1.4 11.0	0.8
	C	降伏	3.2	
V = 7	A	破壊	0.2	0.05
	B	降伏 破壊	1.15 7.9	0.55
	C	降伏 破壊	3.0 17.0	2.6