

# (47) PC落石覆工の衝撃応答解析

防衛大学校 土木工学科 ○園田佳巨  
 防衛大学校 土木工学科 佐藤紘志  
 防衛大学校 土木工学科 石川信隆

## 1. 緒言

1989年7月に、大規模な岩石の崩落によるPC落石覆工の破壊事故が発生して以来、落石覆工の安全性に関する検討が様々な観点から行われてきた。本研究では、PC落石覆工を対象に、落石が衝突したときの衝撃応答解析を行い、落石覆工の安全性について解析的に判定を行うことを試みた。落石覆工は、一般にサンドクッションが使用されるので、落石覆工とサンドクッションの相互作用を考慮した衝撃応答解析が必要である。そのために、本研究は、まずPC落石覆工の各部材のM~φ関係を求めたうえで、それをBi-Line ar形に変換して、PCはり、柱部材を剛体ばねモデルに置換したときの曲げばねの特性を決定した。次に、サンドクッションを個別要素により、またPC落石覆工を剛体ばねによりモデル化することにより、落石覆工とサンドクッションとを一体化した衝撃応答解析を行った。

## 2. PC部材の曲げモーメント～曲率関係の計算方法

ここでは、PC落石覆工の衝撃応答解析を行う前の準備として、予めはりおよび柱部材のM~φ関係を断面分割法により計算する。すなわち、図-1に示すような、実物大のPC落石覆工破壊実験<sup>1)</sup>の試験体に用いられたT型断面はりおよび矩形断面柱のM~φ関係を求めた。なお、柱部材については、死荷重の影響を初期圧縮ひずみとして考慮したうえで計算を行った。

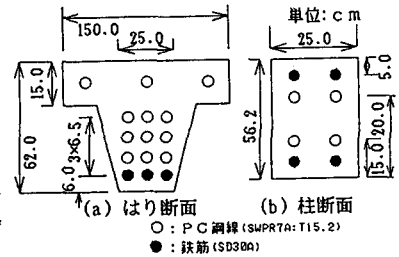


図-1 PC落石覆工の部材断面

## 3. PC落石覆工の衝撃応答解析手法

落石覆工には、通常サンドクッションが使用されるため、その衝撃応答特性を検討する場合にも、サンドクッションの応答状況も考慮した計算が必要である。そこで本研究では、サンドクッションの応答計算には個別要素法を用い、PC落石覆工の解析には剛体ばね (a) モデルを適用することにより、一体解析を行うことを試みた。

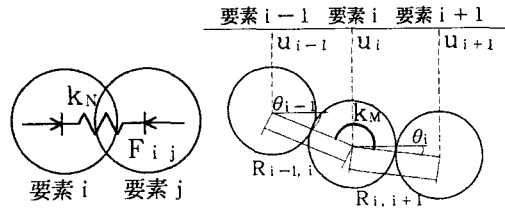


図-2 落石覆工の軸力ばねと曲げばね

### 3.1 PC落石覆工のモデル化

PC落石覆工を表わす要素として、図-2に示すように要素間に軸力ばね $K_N$ と曲げばね $K_M$ を有するようなモデルを用いることとした。ここで、軸力ばね $K_N$ は部材断面の諸元に基づき次式を用いて決定した。

$$K_N = \frac{EA}{R_{i0}} \quad (1)$$

ここに、EA: PC落石覆工のはりまたは柱部材の軸剛性、 $R_{i0}$ : 初期剛体要素間の距離

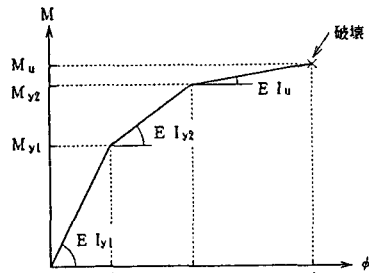


図-3 M~φ関係のモデル化

一方、曲げばね $K_M$ については、2. で示した手法により求めた $M \sim \phi$ 関係を用いることとし、図-3に示すようにモデル化したうえで、設定された降伏曲率 $\phi_y$ を応答曲率が上回ったときには部材の曲げ剛性の修正を行い、一方、終局曲率 $\phi_u$ を上回るときにはPC落石覆工が破壊したものとみなした。以上のモデル化のもとに、PC落石覆工要素間の軸剛性および曲げ剛性による抵抗力は次式により求められる。

$$N_i = K_N \cdot \Delta u_i \quad (2a)$$

$$M_i = K_M \cdot \Delta \tau_i \quad (2b)$$

ただし、 $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$ ：部材軸方向相対変位、 $\Delta \tau_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ ：曲げばね回転角

$$\theta_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{R_{i,i+1}}, \quad \theta_{i-1} = \frac{v_i - v_{i-1}}{R_{i-1,i}} \quad (2c)$$

ここに、 $u_i$ ： $i$ 要素の水平変位、 $v_i$ ： $i$ 要素の鉛直変位、 $R_{i,i+1}$ ： $i$ 要素と $i+1$ 要素間の距離

ところで、実際のPC落石覆工は図-4に示すように、一般に複数の主桁(通常5本程度)をPC鋼線により横締めして一体化することで、荷重を直接受け

ない隣接桁も抵抗しようとするような構造形式になっている。したがって、ここでは主桁1本当たりの剛性による計算を行っているが、簡易的に横締め効果

を考慮できるように、次式のような横締めパラメータ $\beta$ を用いて主桁の剛性を割増することとした。

$$K_N = \beta K_{N0} \quad (3a)$$

$$K_M = \beta K_{M0} \quad (3b)$$

ただし、 $\beta$ は横締めパラメータで、 $\beta \geq 1$ とする。

### 3.2 サンドクッションのモデル化

サンドクッションの応答計算には、個別要素法を適用する。

したがって、図-5に示すように要素間のモデル化を行ったう

えで、次式によりばね係数等を与えた。

$$K_n = \frac{E \cdot \Delta D \cdot \Delta L}{R_{i,j0}}, \quad C_n = 2h\sqrt{mK_n}, \quad K_s = sK_n,$$

$$C_s = 2h\sqrt{mK_s}, \quad \mu = \tan \phi \quad (4)$$

ただし、 $E$ ：砂要素の仮想弾性係数、

$\Delta D$ ：要素の投影長、 $\Delta L$ ：要素の有効奥行き、

$R_{i,j0}$ ：要素間距離、 $h$ ：減衰定数、

$m$ ：要素質量、 $s$ ：低減率、 $\phi$ ：内部摩擦角

ここで、 $K_n$ は図-6(a)に示すように、

要素寸法が決まれば、砂の単位面積当たりの剛性(仮想弾性係数 $E$ )が基準パラメータと

なる。また、接線方向には、砂特有の滑り破壊を考慮するために、図-6(b)に示すモール・クーロンの破壊基準に基づくスライダ $\mu (= \tan \phi)$ を各要素間に配置した。なお、図-6(b)中の $F_s$ は接線方向ばね力、 $F_n$ は法線方向ばね力を示す。以上のモデル化のもとに、個々の要素について水平および鉛直方向の並進と回転の3自由度を考慮し、通常の個別要素法の解析手順に従い数値的に解くこととした。

### 3.3 PC落石覆工の衝撃応答解析

サンドクッションとPC落石覆工の一体解析の手順は、以下のようになる。

(1) まず現時点における、砂要素間および落石覆工要素と砂要素間の接触判定を、通常の個別要素法のアルゴリズムに従って行う。

(2) 次に、接触している要素間の力を全て計算し、各要素に作用している合力を計算する。

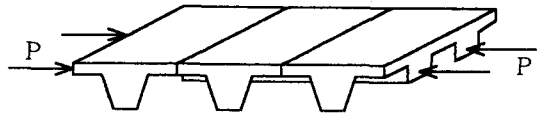


図-4 PC鋼線による横締めの効果

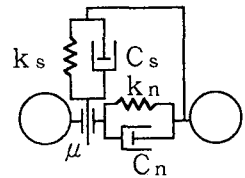
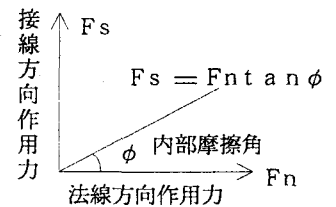
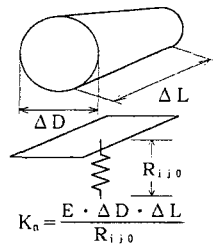


図-5 砂要素のモデル化



(a) 法線方向のばね係数 (b) スライダの滑動条件

図-6 砂要素のばね係数のモデル化

(3) P C 落石覆工要素については、同一時刻の変形状況により軸力および曲げモーメントを計算し、(2)で得られた力と加算することにより作用合力を計算する。なお、このときに応答曲率の値を用いて、要素の剛性の修正およびP C 落石覆工の破壊の判定を行う。

(4) 以上の手順で得られた合力をもとに、オイラー法を用いて次の時刻の加速度、速度、変位を全要素について求め、次の時刻の計算に進む。以上の解析手順を図-7に示す。

#### 4. 数値計算例および考察

ここでは、平成3年8月に日本サミコン(株)が実施した実物大のP C 落石覆工破壊実験<sup>1)</sup>を対象に衝撃応答解析を行った。本試験体は、現実にはスノーシェッド程度の断面を有するもので、設計荷重は落石重量 $W = 1.0 \text{ t f}$ 、落下高さ $H = 5.0 \text{ m}$ となっている。構造寸法は図-8に示すとおりである。

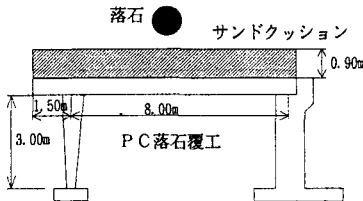


図-8 P C 落石覆工の構造寸法

##### 4.1 P C はりおよび柱部材の $M \sim \phi$ 関係

図-9は、図-8に示した実物大P C 落石覆工のはりおよび柱部材について、2. の手法を用いて計算した $M \sim \phi$  関係である。本計算による破壊形態をP C はりのケースを例に図-10に示すと、まず曲率 $\phi_a$  のとき最下段の引張鉄筋が降伏し、次に曲率 $\phi_b$  ときに最下段のP C 鋼線が降伏し、最後に曲率 $\phi_c$  達したときに上縁のコンクリートが圧壊する結果が得られた。なお、この $M \sim \phi$  関係を以後の衝撃応答解析に使用するために、図-4に示すようなモデル化を行った。モデル化における各値は表-1に示すとおりである。

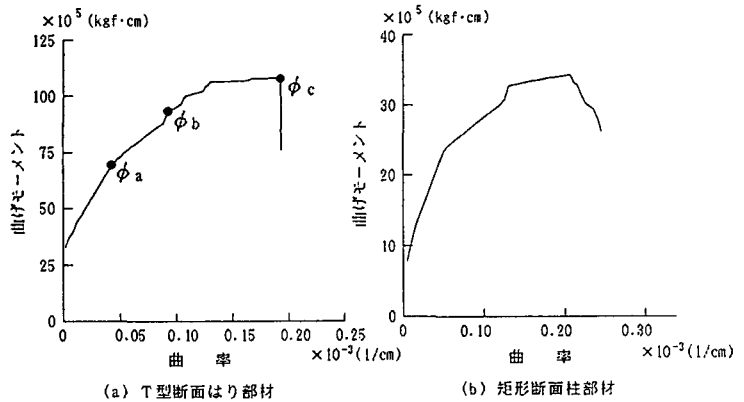


図-9 P C 部材の $M \sim \phi$  関係

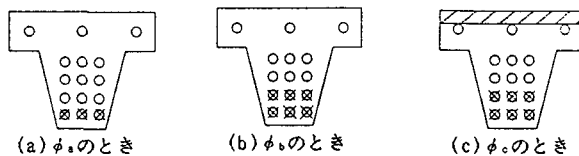


図-10 P C はり断面の破壊形態

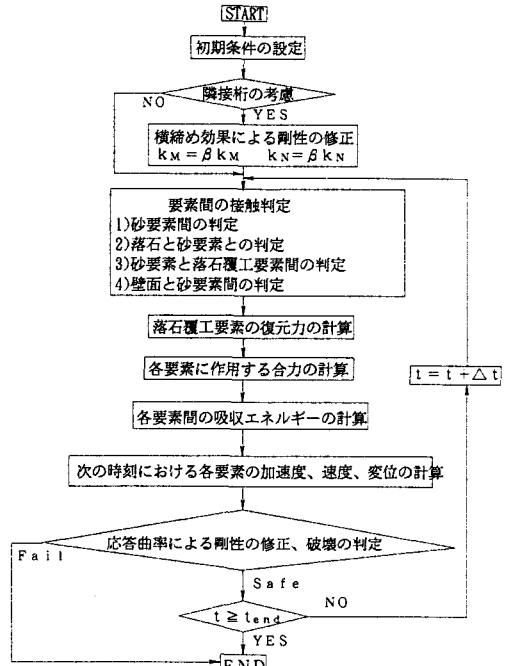


図-7 衝撃応答解析フローチャート

表-1 PC部材のM~φ関係

	$M_{v1}(tf \cdot m)$	$M_{v2}(tf \cdot m)$	$M_u(tf \cdot m)$	$\phi_{v1}(l/cm)$	$\phi_{v2}(l/cm)$	$\phi_u(l/cm)$
はり部材	71.21	106.19	108.00	$0.046 \times 10^{-3}$	$0.130 \times 10^{-3}$	$0.192 \times 10^{-3}$
柱部材	23.44	32.77	34.36	$0.050 \times 10^{-3}$	$0.130 \times 10^{-3}$	$0.205 \times 10^{-3}$

4.2 使用レベルの落石に対するPC落石覆工の応答状況

ここでは、設計条件内の落石( $W=1.0tf$ ,  $H=5.0m$ )に対して、PC落石覆工の応答解析を行い、計算結果と実験結果との比較を行った。解析モデルは図-11に示すとおりである。なお、砂の仮想弾性係数については、過去の著者らが行ったサンドクッションに関する室内モデル実験から $E=20.0 \sim 100.0kgf/cm^2$ 程度が妥当な値であることを確認しているため、本研究では $E=50.0kgf/cm^2$ を採用することとした。

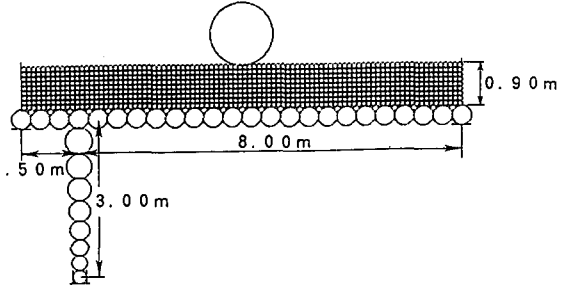


図-11 解析モデル

また、PC落石覆工の破壊実験の結果より、松葉ら<sup>1)</sup>は隣接桁の荷重分担率として少なくとも60%程度は見込めることを報告している。したがって、ここでは隣接桁の荷重分担効果を考慮するために主桁の剛性の割増しを行うこととし、横締め効果として $\beta=2.0, 3.0$ の2通りを用いたときの計算を行った。

図-12は、落石の落下位置の主桁の応答変位について、計算値と実験結果との比較を行ったものである。この図より、横締め効果として $\beta=3.0$ 程度を考慮すれば、応答変位は概ね実験値と一致することが確認された。

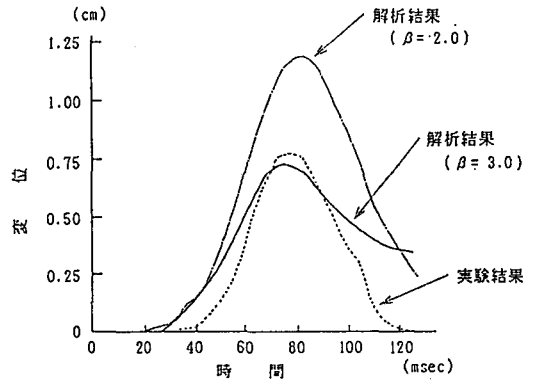


図-12 使用レベルの落石に対する主桁の変位応答 ( $W=1.0tf, H=5.0m$ )

4.3 大規模な落石に対するPC落石覆工の応答状況

ここでは、設計条件を上回る大規模な落石に対する応答の計算を行った。図-13は、落石条件として重量 $W=3.0tf$ , 落下高さ $H=20.0m$ のときの主桁の変位応答について計算した結果を示したものである。この図より、隣接桁の影響を考慮しない場合には、約60ms後に変位が9.0cm程度生じて破壊する結果となるが、主桁の剛性の割増し係数として $\beta=3.0$ を採用すると変位が約7.0cmに低減して破壊しない結果が得られた。表-2は、数種類の落石条件についてPC落石覆工の破壊判定を本手法により行った結果を示したものである。この表より、 $\beta=3.0$ のときには落石重量 $W=5.0tf$ , 落下高さ $H=15.0m$ まで耐えられる結果が得られた。実際の実験結果では、繰り返し衝撃を受けた主桁が、落石重量 $W=5.0tf$ , 落下高さ $H=20.0m$ で破壊していることから、

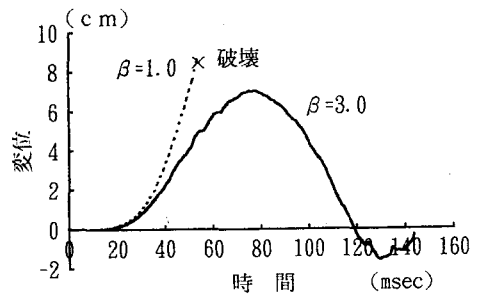


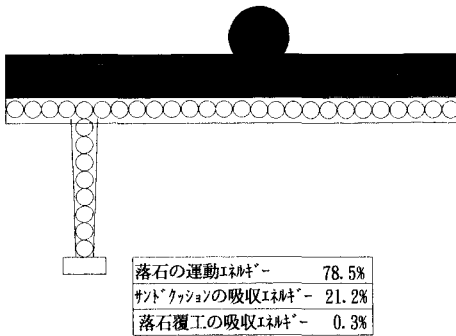
図-13 大規模な落石に対する主桁の変位応答 ( $W=3.0tf, H=20.0m$ )

繰り返し衝撃を受けた主桁が、落石重量 $W=5.0tf$ , 落下高さ $H=20.0m$ で破壊していることから、

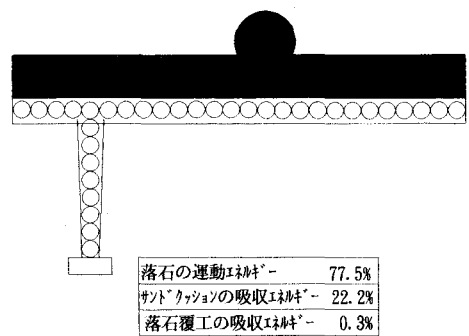
本解析はやや安全側の評価を与えるが、PC落石覆工の安全性の概略な評価には適用可能であるものと考えられる。また図-14および図-15は、それぞれ落石重量が $W=5.0\text{ tf}$ で、落下高さが $H=20.0\text{ m}$ のときと $H=30.0\text{ m}$ のときのPC落石覆工の破壊シミュレーションを行ったものである。この図より、最終的には、衝突位置直下でPCはり部材が破壊する様子が認められる。なお、図-14中のサンドクッションの吸収エネルギーとは、サンドクッションの個別要素によって費やされた吸収エネルギーのことで、また落石覆工の吸収エネルギーとは、落石覆工の剛体ばね要素によって費やされた吸収エネルギー

表-2 PC落石覆工の破壊判定

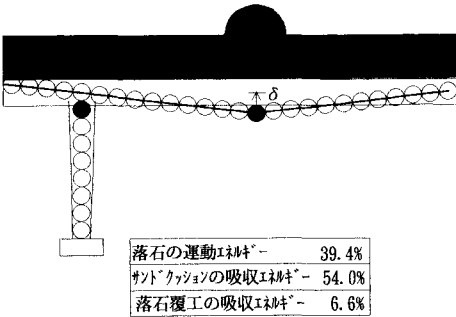
落石重量 (tf)	落下高さ (m)	横締めパラメータ $\beta$	
		$\beta=1.0$	$\beta=3.0$
1.0	10.0	○	○
	20.0	×	○
3.0	10.0	×	○
	20.0	×	○
5.0	10.0	×	○
	15.0	×	○
	20.0	×	×



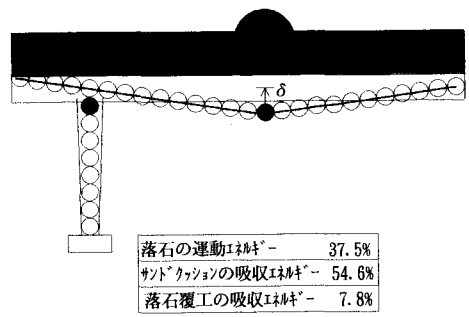
(a) 20ms 経過後: 主桁変位  $\delta=0.16\text{ cm}$



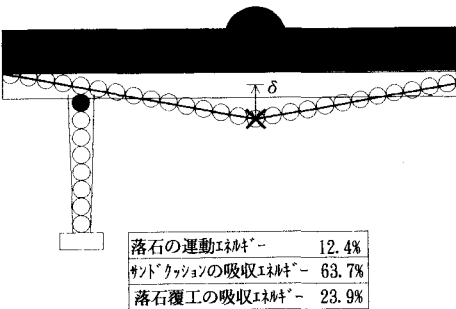
(a) 20ms 経過後: 主桁変位  $\delta=0.19\text{ cm}$



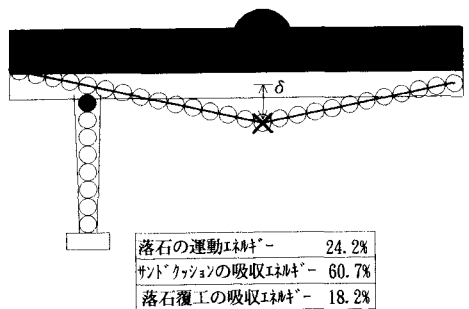
(b) 50ms 経過後: 主桁変位  $\delta=5.13\text{ cm}$



(b) 50ms 経過後: 主桁変位  $\delta=6.25\text{ cm}$



(c) 73ms 経過後: 主桁変位  $\delta=8.15\text{ cm}$



(c) 62ms 経過後: 主桁変位  $\delta=8.86\text{ cm}$

図-14 PC落石覆工の破壊状況

( $W=5.0\text{ tf}$ ,  $H=20.0\text{ m}$ ) ●降伏 ×破壊

図-15 PC落石覆工の破壊状況

( $W=5.0\text{ tf}$ ,  $H=30.0\text{ m}$ ) ●降伏 ×破壊

ギーのことであり、それぞれの値を落石が衝突した瞬間に有していた運動エネルギーに対する割合で示している。図-14と図-15の比較から、落石の衝突速度が速くなると、落石覆工の破壊する時刻が約10ms早くなっているが、逆に終局変位量および限界吸収エネルギー量は10%程度大きくなっていることが認められる。

## 5. 結 論

本研究は、PC落石覆工を対象にサンドクッションとの一体解析により、衝撃応答シミュレーション解析を行い、破壊判定を解析的に行うことを試みたものである。ここで得られた成果を要約すると以下のようになる。

- (1) PC鋼線の横締めによる効果を、PC部材の剛性の割増し係数として考慮することにより、実際のPC落石覆工の応答をほぼシミュレートすることができた。
- (2) 使用レベルの落石に対する主桁の変位応答を、実験結果と計算結果で比較すると、横締めパラメータとして $\beta = 3.0$ を与えたときに実験結果と良く一致することが確認された。
- (3) 大規模な落石に対する破壊判定を行った結果、隣接桁の荷重分担を考慮しないと、落石重量 $W = 1.0 \text{ t f}$ 、落下高さ $H = 20.0 \text{ m}$ で破壊する結果が得られた。一方、横締めパラメータとして $\beta = 3.0$ を与えると、落石重量 $W = 5.0 \text{ t f}$ 、落下高さ $H = 15.0 \text{ m}$ までは耐えられる結果が得られた。

なお、今後、隣接桁の荷重分担効果について、より定量的な評価が可能となれば、実際のPC落石覆工の破壊判定に本法が適用できるものと思われる。

## 参考文献

- 1) 松葉美晴、後藤吉晴、佐藤彰、音田奨、岡畑博子、井上理恵: 実物大PC製シェッドの落石による破壊実験について、第10回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 14-25, 1992年11月