

(I-38) 個別要素法と剛体ばねモデルを用いたPC落石覆工の衝撃応答解析

防衛大学校 正員 ○園田佳巨 正員 佐藤紘志 正員 石川信隆

1. 緒言 落石覆工の耐衝撃性について検討を行うには、緩衝材として使用されるサンドクッションの効果を考慮することが不可欠であるが、落石の衝突によるサンドクッションの効果自体が落石覆工の剛性の影響等を受けるものと考えられる。そこで、本研究は落石の衝突を受けたときのPC落石覆工の衝撃応答を調べるために、落石・サンドクッション・落石覆工の3者関係を、個別要素法(DEM)と剛体ばねモデル法(RBSM)を併用した一体解析を行い検討した。

2. 解析手法の概要

(1) サンドクッションの個別要素によるモデル化 サンドクッションの応答計算には通常のDEMをそのまま適用する。よって、図-1に示すように要素間のモデル化を行い、次式によりばね係数等を与えた。

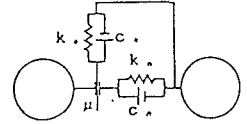


図-1 砂要素のモデル化

$$k_n = \frac{E \cdot \Delta D \cdot \Delta L}{R_{ij0}}, \quad c_n = 2h\sqrt{mk_n}, \quad k_s = sk_n, \quad c_s = 2h\sqrt{mk_s}, \quad \mu = \tan \phi \quad (1)$$

ただし、E:砂要素の仮想弾性係数、 ΔD :要素の投影長、 ΔL :要素の有効奥行き、 R_{ij0} :要素間距離、 h :減衰定数、 m :要素質量、 s :低減率、 ϕ :内部摩擦角、 μ :摩擦係数

ここで、最も基本となる法線方向のばね係数 k_n については、砂の単位面積当たりの剛性E(仮想弾性係数)を基準パラメータとした。

(2) サンドクッションの衝撃吸収エネルギー 本研究では、サンドクッションの衝撃吸収エネルギーを解析的に求めることを試みた。そのために、図-2に示すように、要素mと他の接触要素間で吸収されるエネルギー量 $U_{mk}(t)$ を、要素間のばねとダッシュポットに作用する力 $F_{mk}(t)$ と相対変形量 $\Delta S_{mk}(t)$ との積として、法線方向と接線方向とに別々に時刻歴に加算することにより次式を用いて求めた。

$$U_{mk}(t) = \sum_{i=0}^t \sum_{k=1}^l (F_{nmk}(t) \cdot \Delta S_{nmk}(t) + F_{smk}(t) \cdot \Delta S_{smk}(t)) \quad (2)$$

ここに $F_{nmk}(t)$:時刻tに要素kから要素mへ法線方向に作用する力、 $\Delta S_{nmk}(t)$:要素mと要素kとの法線方向相対変位増分、 $F_{smk}(t)$:要素kから要素mへ接線方向に作用する力、 $\Delta S_{smk}(t)$:要素mと要素kとの接線方向相対変位増分、 l :要素mへ作用する全要素数。

よって、式(2)で得られた要素間の衝撃吸収エネルギーを全要素について加算したうえで、各要素の運動エネルギーを加えることにより、サンドクッション全体の衝撃吸収エネルギー $U(t)$ が次式により得られる。

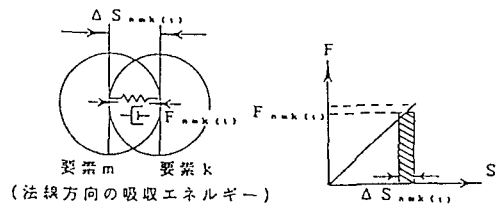


図-2 各要素の吸収エネルギーの計算方法

$$U(t) = \sum_{m=1}^n U_{mk}(t) + \sum_{m=1}^n \frac{1}{2} M_m V_m(t)^2 \quad (3)$$

ここに、 n :全要素数、 M_m :要素mの質量、 $V_m(t)$:要素mの時刻tにおける速度

(3) PC落石覆工の剛体ばねによるモデル化 落石覆工は、固体であり要素間の接触判定は不要であるので、剛体ばねモデルを適用することとした。すなわち、図-3に示すように曲げばね k_M と軸力ばね k_N を挿入してモデル化する。なお、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。

$$k_N = \frac{EA}{R_{ij0}}, \quad k_M = \frac{EI}{R_{ij0}} \quad (4)$$

ここに、EA:H形鋼はりの軸剛性、EI:H形鋼はりの曲げ剛性、 R_{ij0} :初期剛体要素間の距離

一方、曲げばね k_M については、予め各部材に対して、断面分割法により図-4に示すような $M \sim \phi$ 関係を求めることにより、曲げ剛性をBi-Linear形に仮定した。その上で終局曲率 ϕ_u を設定し、落石覆工の破壊を応答曲率が ϕ_u を上回ったときと定義した。

(4) サンドクッションとPC落石覆工の一体解析

解析手順は、まず通常の個別要素法のアルゴリズムに従い、砂要素間、および落石覆工要素と砂要素間の接触判定を行ったうえで、サンドクッションを介して落石覆工へ伝達される衝撃力の計算を行う。次に、このときのPC落石覆工が変形により吸収するエネルギー量を、各ばねが蓄えるひずみエネルギーを計算することにより求めた。以上の手順により求めた各要素に作用する合力をもとに、オイラー法により次の時刻における加速度、速度、変位を求め計算を進めることとした。

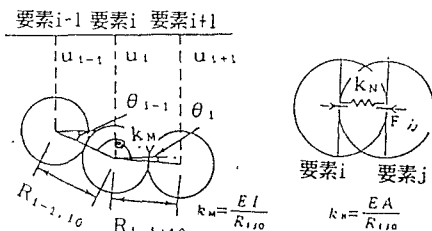


図-3 落石覆工の曲げばねと軸力ばね

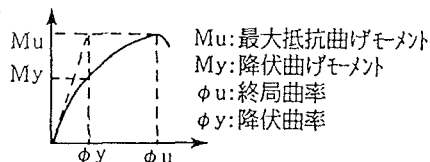


図-4 PC部材の $M \sim \phi$ 関係

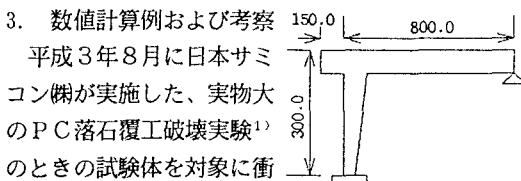


表-1 PC部材の $M \sim \phi$ 関係

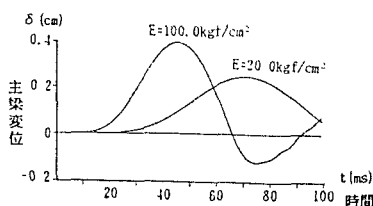
	M_y (tf·m)	M_u (tf·m)	ϕ_y (1/cm)	ϕ_u (1/cm)
梁	65.22	95.03	2.3×10^{-5}	2.0×10^{-4}
柱	27.40	35.00	6.6×10^{-5}	3.0×10^{-4}

撃応答解析を試みた。本試 図-5 PC落石覆工の構造寸法

験体の構造寸法および各部材の $M \sim \phi$ 関係は図-5および表-1に示すとおりであり、設計荷重は落石重量

$W=1.0$ tf、落下高さ $H=5.0$ mとなっている。そこで、ここでは通常規模の落石($W=1.0$ tf, $H=5.0$ m)と、大規模な落石($W=5.0$ tf, $H=20.0$ m)の2ケースについて計算を行った。

(1) 通常規模の落石に対する応答 ここでは、サンドクッションの種類がPC落石覆工の応答に及ぼす影響について検討した。図-6は使用する砂の仮想弾性係数が $E=20.0$ kgf/cm²(山砂)のときと 100.0 kgf/cm²(砕砂)のときのPC落石覆工の載荷点における変位応答を示したものである。この図より、砕砂の場合には応答変位が大きくなるだけでなく、その周期も短い。図-6 通常規模の落石に対する変位応答



(2) 大規模な落石に対する応答 ここでは、設計条件をはるかに上回る落石条件($W=5.0$ tf, $H=20.0$ m)に対するPC落石覆工の応答について計算を試みた。なお砂は砕砂($E=100.0$ kgf/cm²)を用いた。図-7は、PC落石覆工の全体変位の時間的な推移について示したものである。この図より、本計算例では落石の衝撃エネルギーを吸収することは全く不可能であり、33(ms)経過後に、落石のエネルギーの37%程度がサンドクッションおよび落石覆工に吸収され、PC落石覆工は約2.0cm変形して破壊に至ることが確認された。

(20ms経過後:主梁変位 $\delta=0.18$ cm) (30ms経過後: $\delta=1.18$ cm) (33ms経過後: $\delta=2.08$ cm, 破壊時) δ

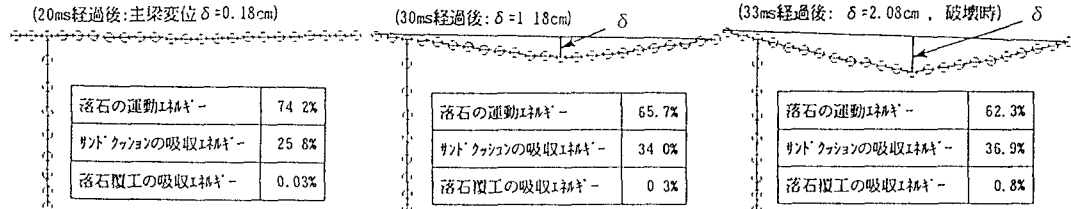


図-7 大規模な落石($W=5.0$ tf, $H=20.0$ m)に対する変位応答状況(×30倍)

参考文献

- 1) 松葉美晴他: 実物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, 1992年11月