

大阪市立大学工学部 正 員 園田恵一郎  
大阪市立大学工学部 正 員 鬼 頭 宏 明  
大阪市立大学大学院 学生員 ○松 浦 幹 佳

1. まえがき

衝撃または動的問題の破壊解析は既成ソフトに頼られることが多いが多大な計算時間、費用および高性能計算機を必要とする。そこで落石設計に携わる実務者が想定した落石衝突現象を比較的簡単にシュミレートでき、破壊箇所および破壊形式の判定が容易で落石防護工の設計に役立つ手法を提案する。本解析では門形RCラーメン構造の落石防護工をとりあげ、主に衝撃破壊機構について検討を行い、設計に対する基礎資料を作成することを目的とする。

具体的には、鉄筋コンクリート構造物等の非線形特性を取り扱うのに比較的簡便な剛体バネモデル<sup>1)</sup>を用い、軸力、回転およびせん断バネによって部材の変形特性を評価した。せん断構成関係については土木学会コンクリート標準示方書を基本としてモデル化を行った。時間積分法として衝撃問題に対して適用性の高い中心差分法<sup>2)</sup>による陽解法を用いた。

2. 構成関係

(1) 軸力と曲げモーメント

本解析では、土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に従い図1のような応力-ひずみ関係で適用した。また、コンクリートは引張強度を有するものとし、引張状態における軟化特性を考慮したうえで、引張ひずみが $\alpha \epsilon_{ct}$ を越えた場合に引張強度を失い、曲げ引張破壊(クラック)が発生するとした。一方、主鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性モデルを用いて表現した。コンクリートおよび主鉄筋いずれにおいても除荷を考慮している。この応力-ひずみ関係を図2のように分割された断面内の任意位置でのひずみに対して適用する。そして、平面保持の仮定の下にコンクリートと主鉄筋それぞれに積分を行うことにより軸力および曲げモーメントと伸びおよび曲率の関係を決定する。

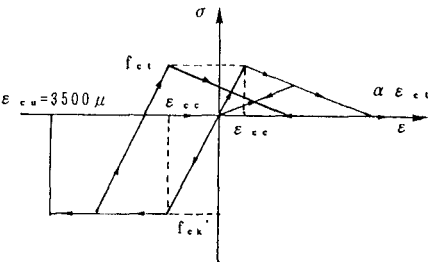


図 1 コンクリート応力-ひずみ関係

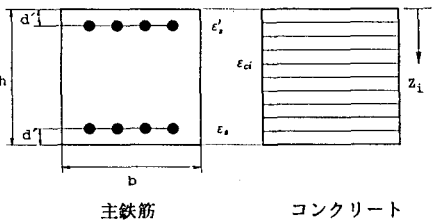


図 2 RC 断面の分割モデル

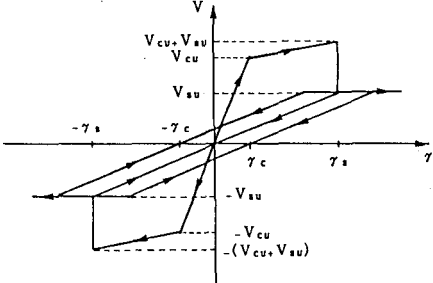


図 3 せん断力-ひずみ関係

(2) せん断力

示方書に従いせん断耐力はコンクリートとせん断補強鉄筋を分けて考える。コンクリートせん断破壊基準として、式(1)の斜めひびわれ、式(2)の曲げせん断破壊をせん断耐力として適用する。前者はコンクリートに曲げ引張破壊(クラック)が発生していないときの破壊基準で、後者はコンクリートに曲げ引張破壊が発生した後の破壊基準である。また、コンクリート曲げせん断耐力は軸力の変化にともない変化することを考慮している。以上のコンクリートせん断耐力とせん断補強鉄筋耐力用いてRC断面のせん断力-ひずみ関係を図3としてせん断補強鉄筋降伏後の除荷を含めて定義する。

$$V_{cu} = \tau_m b (h - d') = 0.93 \sqrt{f'_{ck}} b (h - d') \quad \text{斜めひび割れ} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{ocu} = f_{vcd} b (h - d') \quad \text{曲げせん断破壊 (軸力 } N = 0 \text{ 時)} \dots\dots\dots (2)$$

### 3. 解析結果

落石防護工モデル諸元, 材料定数をそれぞれ図 4, 表 1 に示す. 本解析では落石がは

り部材中央点に  $90^\circ$  の入射角度で衝突すると仮定し落石重量, 落下高をパラメータとして計算を行った. また, 本解析では数砂厚 90cm の場合を想定し, 数砂ラメ定数  $\lambda = 1000(tf/m^2)$  として落石対策便覧式<sup>4) 5)</sup>に相当する非線形バネモデルを用いた.

図 5 は落石落下高 30m におけるはり部材中央点の変位応答である. 落石重量 5tf から 10tf で急激に変位が大きくなり, 破壊による残留変形を確認できる. また, 剛性低下のため最大変位までの時間が長くなっている. 図 6 は落下高 30m における変形図・状態図であり, 落石重量が大きくなるにつれて破壊領域が広がっている. 図 7 は中央点最大変位と落石落下高の関係を示したもので, 落石重量に応じてほぼ線形的にすることが分かる.

表 1 材料定数

| 鉄筋                |          |     |      |            |       | コンクリート            |          |          |         | 数砂         |
|-------------------|----------|-----|------|------------|-------|-------------------|----------|----------|---------|------------|
| $E_s$             | $f_{sy}$ | $p$ | $p'$ | $A_w/bS_s$ | $S_s$ | $E_c$             | $f_{ct}$ | $f_{cc}$ | $\nu_c$ | $\lambda$  |
| $kgf/cm^2$        |          |     | %    |            | cm    | $kgf/cm^2$        |          |          |         | $kgf/cm^2$ |
| $2.1 \times 10^6$ | 2400     | 5   | 5    | 0.15       | 50    | $2.7 \times 10^5$ | 30.0     | 300.0    | 0.167   | 1000       |

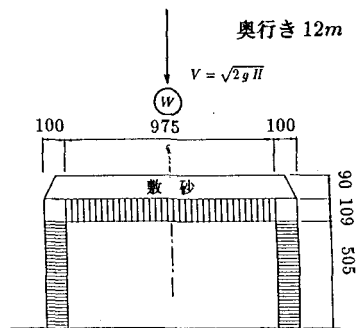


図 4 ロックシェッド諸元 単位 (cm)

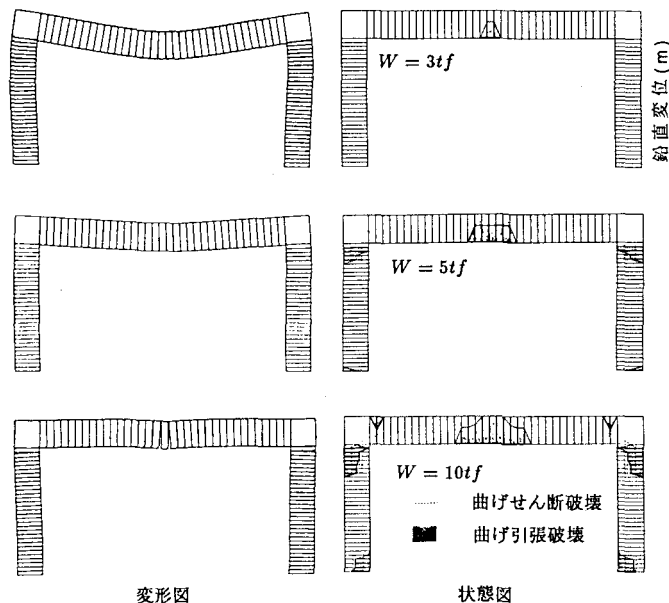


図 6 変形図・状態図 ( $H = 30m$   $T = 0.096sec$ )

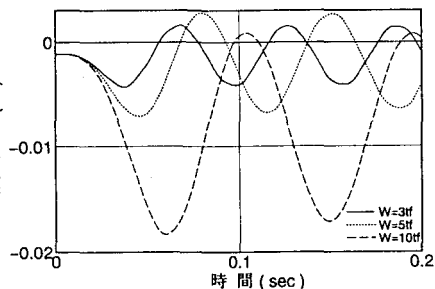


図 5 中央点での変位応答 ( $H = 30m$ )

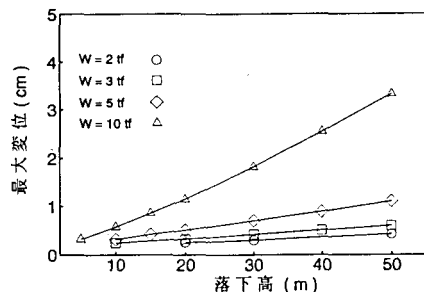


図 7 最大変位-落下高

### 4. まとめ

1. 落石衝突位置での最大変位発生時間は塑性変形が増大するにつれて遅くなる. これは, 本研究では曲げ引張破壊等で定義した塑性領域の広がりによる剛性低下に起因する.
2. 最大変位は落石落下高に対してほぼ線形の関係になることが分かった.

### 参考文献

- 1) 川井忠彦: 離散化極限解析法概論, 培風館, 1991.
- 2) 園田恵一郎, 上林厚志: 土木学会論文集, No. 441/I-18, pp147-156, 1992.
- 3) コンクリート標準示方書・設計編 (平成 3 年度制定): 土木学会, 1991.
- 4) 落石対策便覧: 日本道路協会, 1983.
- 5) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による数砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol. 39A, 1993.