

(41) RC 門形落石防護工の衝撃破壊解析

大阪市立大学工学部 園田恵一郎
大阪市立大学工学部 鬼頭宏明
大阪市立大学大学院 ○松浦幹佳

1. まえがき

衝撃および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、落石防護工の破壊箇所および破壊形式の判定が容易な手法を提案することを目的とし、本論文では、門形RCラーメン構造の落石防護工を例にとりあげ、主に衝撃破壊機構について検討を行った。

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による陽解法¹⁾を用いた。

2. 構成関係

2.1 コンクリートおよび主鉄筋

本解析では、土木学会コンクリート標準示方書²⁾に従い(以下示方書)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、最大応力後の軟化特性³⁾を考慮したうえで、引張ひずみが $\alpha \epsilon_{ct}$ を越えた場合に完全に強度を失い、曲げ引張破壊(クラック)が発生するとした。

一方、鉄筋の応力-ひずみ関係は図2のように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の影響を考慮している。

2.2 せん断力

本解析において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こととする。コンクリートせん断破壊基準として、斜めひびわれ、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あり式(1)で与えられ、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り式(2)で与えられる(軸力 $N=0$ の時)。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、ここでは示方書に従い曲げせん断耐力 V_{cu} を図3から決定する(各記号は示方書によるものと同じ)。

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

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

$$N_{cu} = f'_{ck} b h + f_{sy}(A_s + A'_s) \quad N_{tu} = f_{sy}(A_s + A'_s) \quad N_0 = \frac{bh + E_s/E_c(A_s + A'_s)}{W_c} M_u$$

せん断補強鉄筋のせん断耐力は式(3)となる。

$$V_{su} = (A_w f_{sy} / S_s) z \dots\dots\dots (3)$$

以上のコンクリートせん断耐力およびせん断補強鉄筋耐力を用いてRC断面のせん断力-ひずみ関係を図4としてせん断補強鉄筋降伏後の除荷を含めてモデル化する。

2.3 断面力計算

RC断面の特性を表現するために図5に示すバンド状の要素に分割されたモデルを考える。ここでコンクリート要素と鉄筋要素はそれぞれ独立して扱い、ひずみ適合条件より軸力および曲げモーメントは連成する。

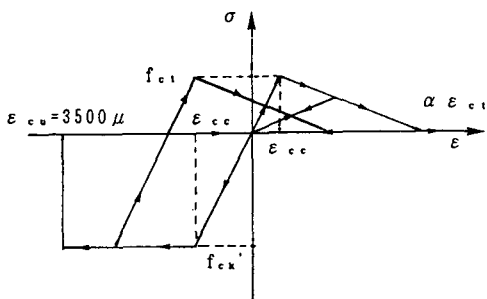


図 1 コンクリート応力-ひずみ関係

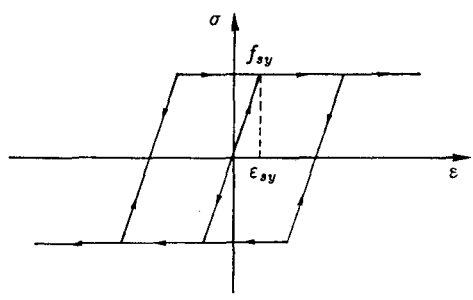


図 2 主鉄筋応力-ひずみ関係

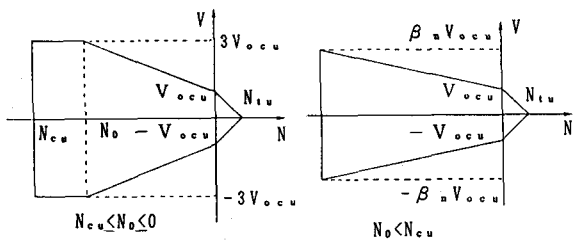


図 3 セン断耐力-軸力関係

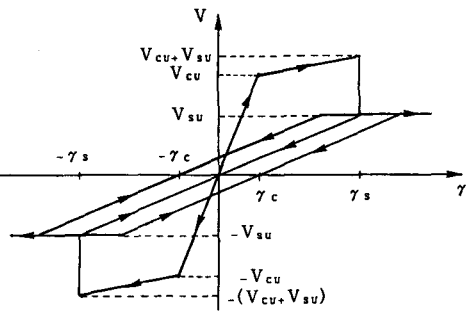


図 4 セン断力-ひずみ関係

そして、要素断面における任意位置での応力をコンクリートと主鉄筋を別々に積分する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。断面中央の軸ひずみを δ 、曲率を κ とすると平面保持の仮定の下では断面最外縁から z_i の位置でのコンクリートのひずみは式(4)となる。

$$\epsilon_{ci} = \delta + (z_i - h/2)\kappa \dots\dots\dots (4)$$

一方、鉄筋かぶりを両側外縁からの距離 d' とした場合鉄筋のひずみは、式(5)となる。

$$\epsilon'_s = \delta - (h/2 - d')\kappa \quad \epsilon_s = \delta + (h/2 - d')\kappa \dots\dots (5)$$

いま断面がはり高方向に n 等分されているときモーメント M 、軸力 N は任意点 z_i での応力を数値積分を行い式(6)より求められる。

$$N = \frac{bh}{n} \sum_{i=0}^n \alpha_i \sigma_{ci} + A_s \sigma_s + A'_s \sigma'_s \dots\dots\dots (6)$$

$$M = \frac{bh}{n} \sum_{i=0}^n \alpha_i (z_i - h/2) \sigma_{ci} - (d' - h/2) A_s \sigma_s + (d' - h/2) A'_s \sigma'_s \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\alpha_i = 0.5 (i = 0, n)$ $\alpha_i = 1.0 (i = 1, 2, \dots, n - 1)$

2.4 ひずみ制御による断面力-ひずみ履歴

図6および図7はある1断面で曲率 κ を徐々に大きくしながら静的に荷重および除荷を繰り返し行ったものである。ここで与えた曲率 κ を黒丸で示し、横軸の κ_{max} は与えた最大曲率である。コンクリート、鉄筋は個々には複数の線形関係を適用しているにもかかわらず部材全体としては既往の実験等で確認される繰返荷時の紡錘形の非線形関係を表現することができた。

3. RC はり衝撃実験との比較

本解析モデルを用いて金沢大RCはり衝撃破壊実験⁴⁾と比較検討を行った。衝撃荷重は実験から得られたものをモデル化して用いた。諸元、衝撃荷重および材料定数を図8および表1に示す。図9は実験後および

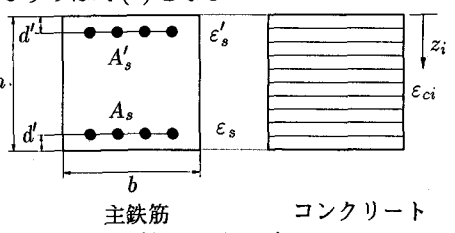


図 5 RC 断面の分割モデル

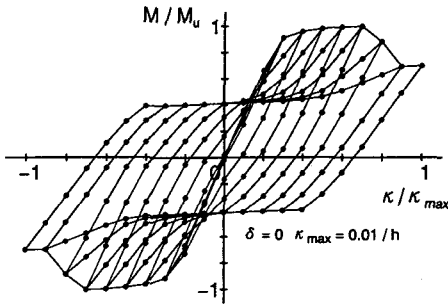


図 6 M-κ関係

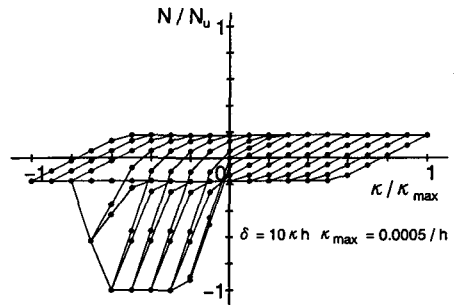


図 7 N-κ関係

解析状態図である。曲げ引張破壊の領域の広がりによく一致している。また、曲げせん断破壊も双方に確認することができる。

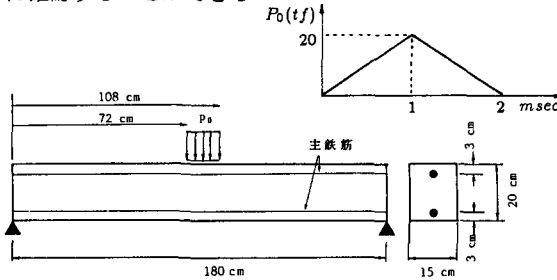


図 8 RCはり諸元と衝撃荷重

4. 落石による衝撃荷重

本解析では落石が敷砂に衝突する際の落石防護工に与える衝撃荷重を決定する方法として落石対策便覧に基づく式(8)を用いる。図10は本解析で使用した載荷・除荷曲線である。

$$P = \frac{32\lambda}{9} \left(\frac{3W}{10.4\pi} \right)^{1/6} D^{3/2} \quad (\text{ただし, } D \leq R) \quad \dots (8)$$

$D(m)$: 変形量 $\lambda(tf/m^2)$: ラメ定数(敷砂)

$W(tf)$: 落石重量 $R(m)$: 落石半径

表 1 材料定数

鉄筋						コンクリート				
E_s	f_{sy}	A_s	A'_s	A_w	S_s	E_c	f_{ct}	f_{cc}	ν_c	
kgf/cm ²		cm ²				kgf/cm ²				
2.1 × 10 ⁶		4354.1	1.986	1.986	1.986	10	2.7 × 10 ⁵	31.0	296.0	0.21



実験後



解析

..... コンクリート曲げ引張破壊
 - - - - - 曲げせん断破壊(曲げ引張破壊あり)
 - - - - - 斜めひび割れ(曲げ引張破壊なし)

図 9 RCはり実験後および解析状態図

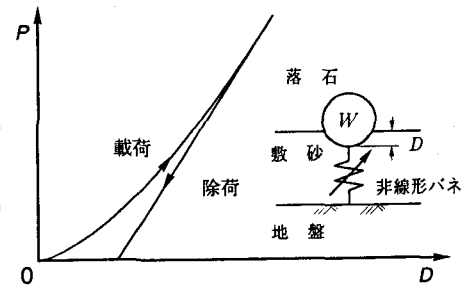


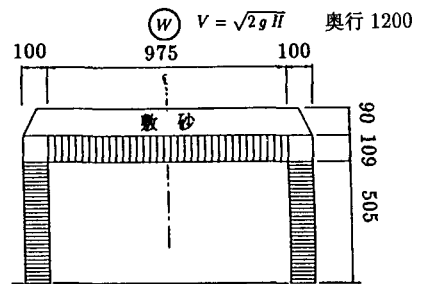
図 10 載荷・除荷曲線と敷砂モデル

5. 解析結果

落石防護工モデル諸元, 材料定数をそれぞれ図11, 表2に示す。本解析では落石重量, 落下高, 落石衝突角度をパラメータとして計算を行い, 衝突位置ははり部材中央点としている。また, 敷砂厚90cmの場合を想定し, 敷砂ラメ定数 $\lambda = 1000(tf/m^2)$ として⁵⁾式(8)に基づく非線形バネモデルを用いた。

5.1 落石衝突角度 90°

図12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。



単位 (cm)

図 11 ロックシェッド諸元

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 13 および図 14 は落石重量 $10tf$ 、落下高 $30m$ における

表 2 材料定数

鉄筋						コンクリート				数値
E_s	f_{sy}	p	p'	A_w/bS_s	S_s	E_c	f_{ct}	f_{cc}	ν_c	λ
kgf/cm^2			%		cm	kgf/cm^2				kgf/cm^2
2.1×10^6	2400	5	5	0.15	50	2.7×10^5	30.0	300.0	0.167	1000

ける曲げモーメントおよびせん断力応答である。曲げモーメントは中央部、隅角部および支持部の順に立上り静的曲げ耐力に近づくとその上昇が止まっていることがわかる。また、せん断力には曲げ振動に一致する周期の他に高周波成分を含んだものになっている。図 15 は落下高 $30m$ における変形図・状態図であり、落石重量の増大に伴う曲げ引張破壊と曲げせん断破壊の広がりを確認することができる。

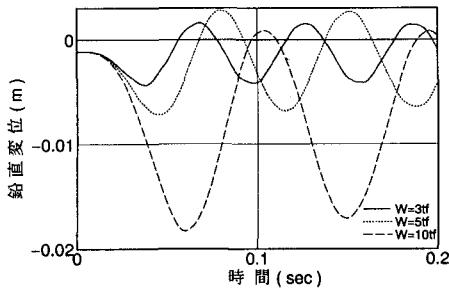


図 12 中央点での変位応答 ($H = 30m$)

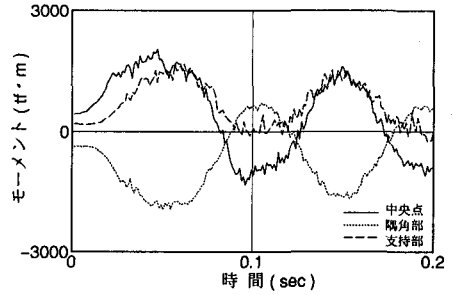


図 13 曲げモーメント応答 ($W = 10tf, H = 30m$)

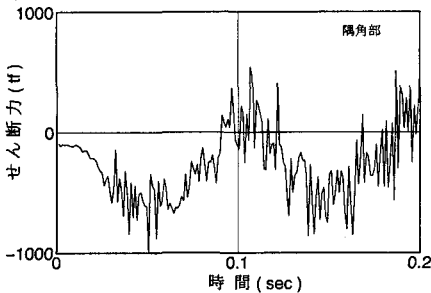


図 14 せん断力応答 ($W = 10tf, H = 30m$)

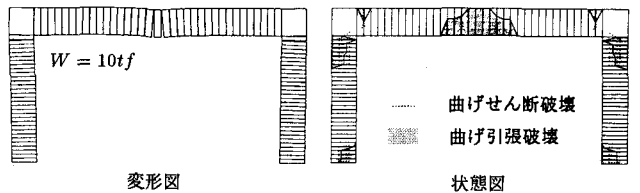
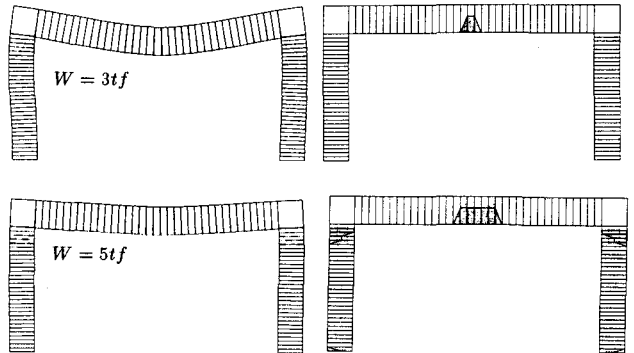


図 15 変形図・状態図 ($H = 30m, T = 0.096sec$)

5.2 落石衝突角度 45°

図 16 は落下高 $50m$ の時、落石が速度 $\sqrt{2gH}$ 、衝突角度 45° で衝突する場合はり部材中央点および左側隅角部の変位応答である。鉛直成分と同様水平成分についても剛性が低下していることがわかる。図 17

および図 18 は落石重量 $10tf$ 、落下高 $50m$ における曲げモーメントおよびせん断力応答である。隅角部では鉛直成分と水平成分の振動が合成されたものになり、落石衝突角度 90° の場合とは異なる応答を示している。図 19 は落下高 $50m$ の時の変形図・状態図であり、左側隅角部に大きな回転残留変形が発生している。

6. 変位応答倍率 (落石衝突角度 90°)

落石による最大衝撃荷重が作用する場合の中央点鉛直変位を静的弾性骨組理論計算値に対して無次元化を行った。この無次元数 (応答倍率) と落石の位置エネルギーの関係を図 20 に示す。ここで、弾性的場合もしくは破壊の程度が少ない場合は、応答倍率はほぼ 2 程度となるが、ひび割れ等破壊が発生すると落石重量に

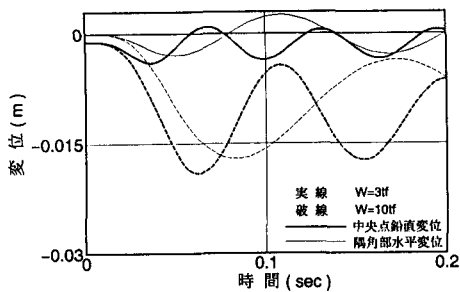


図 16 変位応答 ($H = 50m$)

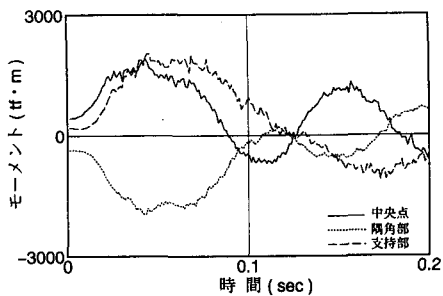


図 17 曲げモーメント応答 ($W = 10tf$ $H = 50m$)

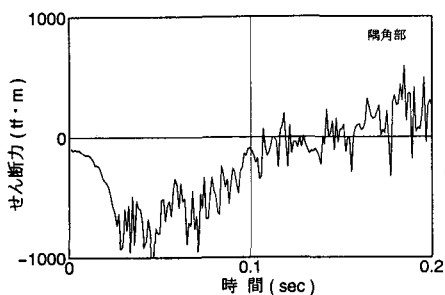


図 18 せん断力応答 ($W = 10tf$ $H = 50m$)

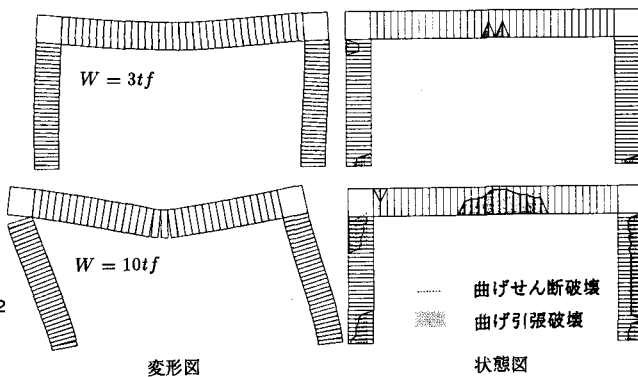


図 19 変形図・状態図 ($H = 50m$ $T = 0.096sec$)

応じた勾配で応答倍率が上昇していることがわかる。

7. 断面力応答倍率 (衝突角度 90°)

図 21 から図 25 は落石防護工の中央点、隅角部 (柱上部端)、支持部での最大曲げモーメントおよび最大せん断力の応答倍率と落石位置エネルギーの関係を示したものである。ここで、static は最大衝撃荷重を静的に作用させた時の弾性骨組理論値である。曲げモーメント、せん断力ともに中央点、隅角部 (柱上部端)、支持部の順に大きな値を示している。また、応答倍率は曲げモーメントで最大 3 程度、せん断力は最大 6 程度となっていることがわかる。支持部の曲げモーメント応答倍率がばらつくのはせん断力応答に見られる高周波成分の影響と考えられる。また、ばらつきを無視するとせん断力応答倍率はいずれもある一定の落石エネルギーで最大値が存在し、そのときには曲げ引張破壊および曲げせん断破壊が発生していることがわかった。

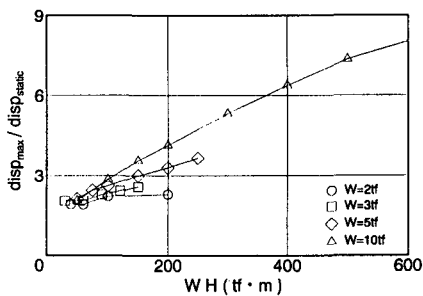


図 20 応答倍率-エネルギー関係 (中央点最大変位)

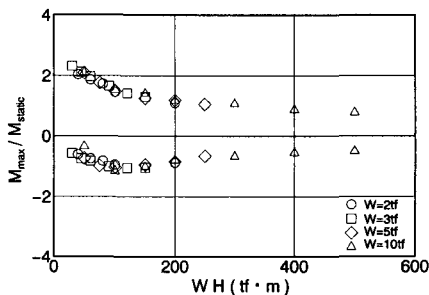


図 21 応答倍率-エネルギー関係 (中央点)

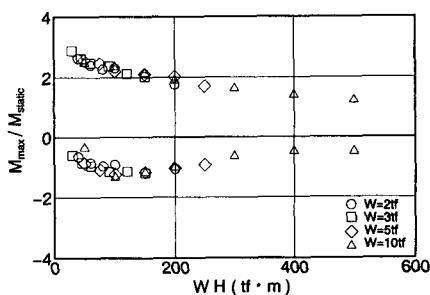


図 22 応答倍率-エネルギー関係 (隅角部)

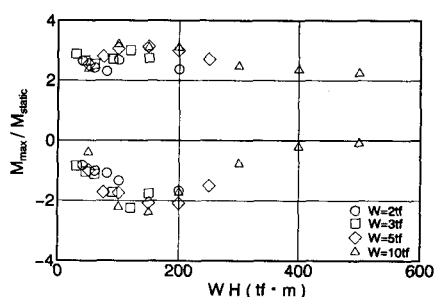


図 23 応答倍率-エネルギー関係 (支持部)

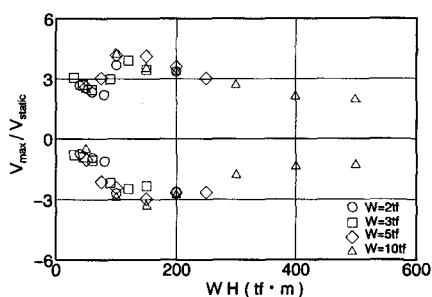


図 24 応答倍率-エネルギー関係 (隅角部)

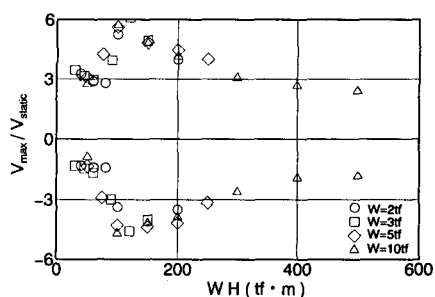


図 25 応答倍率-エネルギー関係 (支持部)

8. まとめ

1. 平面保持の仮定を用いて RC 部材の複雑な非線形構成関係をモデル化し、剛体要素に連結されている集中バネに取り入れることは断面力履歴、実験比較等から妥当性があった。
2. 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。
3. はり中央点の最大変位を静的弾性骨組理論を用いて無次元化すると、弾性状態もしくはそれに近い状態では応答倍率はほぼ 2 程度であるが、塑性変形が生じると落石重量に応じた勾配でほぼ線形的に応答倍率が上昇する。
4. 静的骨組解析によって最大曲げモーメント、最大せん断力を無次元化した場合、落石の位置エネルギーを用いてまとめると落石重量に関係なく応答倍率は衝撃荷重作用点、隅角部、支持部の順に大きくなっていることがわかった。

参考文献

- 1) 園田恵一郎, 上林厚志: 土木学会論文集, No. 441/I-18, pp147-156, 1992.
- 2) 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.
- 3) Bathe, K, J. Sundberg, J. A.: Computational Modelling of Reinforced Concrete Structures (Ed by Hinton, E and Owen, R), Pineridge Press pp101 - 121, 1986.
- 4) 柴田豊: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの挙動に関する研究, 金沢大学修士論文, 1991.
- 5) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol. 39A, 1993.