

断面分割法を用いたコンクリートはりの衝撃挙動解析に関する一考察

Study on the analysis of behavior of concrete beam under impact utilizing section partition method

山本満明*, 榎谷浩**, 堀江義徳***

Michiaki YAMAMOTO, Hiroshi MASUYA, Yoshinori HORIE

- * 工修 金沢大学大学院自然科学研究科 後期課程 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)
** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)
*** 工修 茨城県大宮土木事務所 (〒319-2215 那珂郡大宮町3083)

In this study, we apply the finite element method utilizing section partition method to the analysis of the behavior of the reinforced concrete beam under relatively low speed impact. At first, the method is concretely shown with some assumptions e.g., dynamic increase factors considering the strain rate effects both steel and concrete. Successively, we introduce impact tests under some kinds of conditions and their results, which had been done by authors. It is shown that this method is fairly reproducible for the failure in bending of concrete beam under impact is shown with notice after comparisons with experimental results and considerations. At last, we show the application example of this method in which a design verification of the reverse L-type rock-shed is done under some assumptions.

Key Words : impact , section partition method, finite element method, reinforced concrete beam

キーワード: 衝撃, 断面分割法, 有限要素法, 鉄筋コンクリート

1. まえがき

山岳地帯が国土の大半を占める我が国においては、自然条件が厳しいこともあり、落石災害をはじめとする自然災害発生の可能性は小さくない¹⁾。自然災害発生時、防護構造物に被害が生ずるが、多くの場合に動的荷重が作用する。岩盤崩落、落石、雪崩あるいは土石流を考えた場合、構造物との衝突で、発生する衝撃力によって構造物に損傷が生じ、構造物の崩壊に至ることも少なくない。地震時にも衝撃的な作用によると考えられる被害も報告されている^{2,3)}。

このような衝撃荷重下での構造部材の挙動は静的な場合と比べて一般に異なることが知られている。しかしながら同一条件下で行った実験結果(破壊性状や応答特性)の再現性が乏しいこと等の理由により、長い間これらを十分に解明することは困難と考えられてきた。一方、最近では構造部材や構造物の耐衝撃性を解明し、防護工などの耐衝撃設計法を確立をめざした研究が、多く行われている^{4,5,6,7)}。これは、実験研究に使用される各種測定機器の計測精度が飛躍的に向上し、従来測定困難とされていた現象も徐々に解明されるようになったことが背景にある。このような衝撃力を受ける構造物の力学的挙動は、構造物の種類、構造物を構成する材料特性に密接に関連している。特に土木構造物は鋼・コンクリートから成る複合構造であるため問題を一層複雑なものと

している⁸⁾。したがって、衝撃挙動特性について実験による研究のほか精度良く再現できる理論的研究あるいは数値解析の方法が望まれており、数値解析法に関する研究も各機関で盛んに行われている。しかしながら、汎用性のある衝撃応答解析法が十分に確立されているとは言い難いのが現状である。

本研究は、もっとも基本的な部材である RC はりの比較的低速度の重錘衝突による衝撃を対象とし、各種条件下で行った実験の合理的な解析法の基礎資料を得ることと衝撃挙動特性の解明を目的に行った実験とその弾塑性解析について報告する。最初に著者らが行った衝突点にゴムがある場合等の各種実験で得られた知見を示し、次に衝撃荷重下での材料のひずみ速度効果を考慮した断面分割法を用いた有限要素法による弾塑性解析を行い、実験結果との比較により本解析法の有効性と適用性についての検討結果を示す。また応用として本解析法のロックシェッドへの適用例も具体的に示す。

2. RC はりの衝撃解析

本章では最初に解析対象とした RC はりの衝撃実験について説明し、引き続き断面分割法を用いた有限要素法による解析法を説明する。最後に実験結果との比較検討により本解析法の有効性を示すとともに適用に注意を有する点についても明らかにする。

2.1 供試体および材料特性

実験に使用した供試体の諸元を図-1に示す。スパン長2400mm、純スパン長2000mmであり、左右両端には厚さ10mmの定着鋼板を用いている。

表-1には使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートは、普通セメントを使用し、粗骨材には最大寸法25mm、実積率65.0%、表乾状態における密度2.66g/cm³の砂利を用いた。細骨材は粒径5mm、粗粒率2.60、表乾状態における密度2.58g/cm³の砂である。また、表-2にコンクリート(材齢28日時)の材料試験結果および鉄筋の材料特性値を示す。なお、主鉄筋は圧縮側、引張側ともにD13を、せん断補強筋にはD6を使用した。なお、試験体の設計曲げ耐力は19.1kN・m、せん断耐力は137.2kNである。

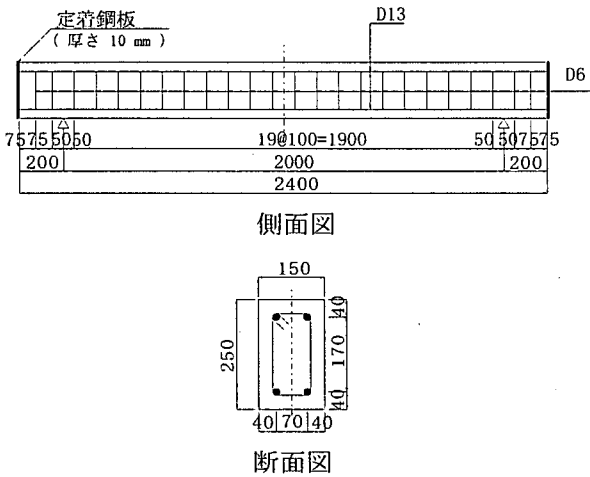


図-1 供試体諸元

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)		25
スランプ (cm)		8
水セメント比 (%)		52.5
細骨材率 (%)		38.4
単位量 (kg/m ³)	水	144
	セメント	275
	細骨材	717
	粗骨材	1186
	混和材	0.859

表-2 材料特性

コンクリート	
圧縮強度 (N/mm ²)	27.4
引張強度 (N/mm ²)	2.5
弾性係数 (N/mm ²)	2.97 × 10 ⁴
鉄筋	
降伏強度 (N/mm ²)	380
弾性係数 (N/mm ²)	2.09 × 10 ⁵

2.2 RC はりの衝撃実験の概要

RC はりの衝撃実験で使用した実験装置を図-2に示す。これは所定の質量に調整した重錘の下部にロードセルを

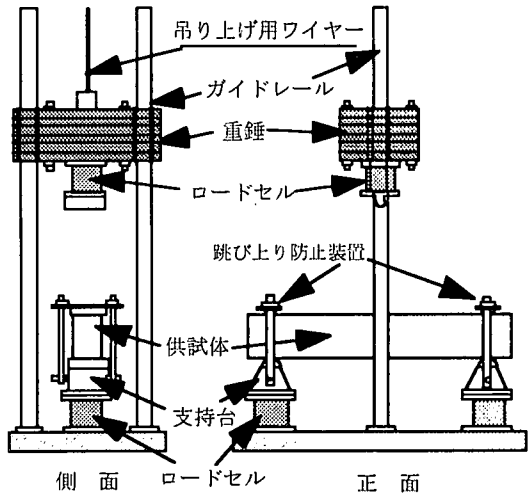
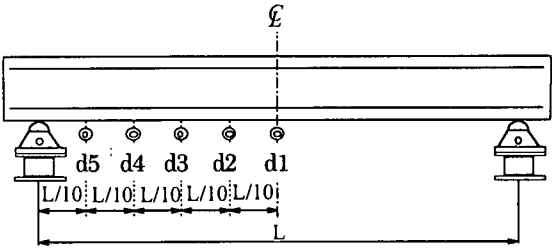


図-2 重錘落下式衝撃実験装置



◎ 変位計
図-3 計測位置

表-3 計測器の性能・諸元

計測項目	計測器名称	性能・諸元
荷重	ロードセル (PCB 207B)	ピエゾ式 容量: 45tf 固有振動数: 15kHz
支点反力	ロードセル (東京測器 KC-20A)	ひずみゲージ式 容量: 20tf 感度: 1.070mV/V
変位	可視光レーザー変位計 (KEYENCE LB-300)	測定範囲: 最大200mm 応答性: 915Hz

設置し、クレーンで所定の高さに吊り上げ、供試体にガイドレールに沿って自由落下させるものである。載荷点における作用荷重は重錘部に取り付けたロードセルで、支点反力は支点部に設置したロードセルで測定を行っている。供試体の変位の計測には可視光レーザー変位計を用い図-3に示す位置で、はり下面の変位を測定している。これら計測器の性能・諸元を表-3に示す。

2.3 有限要素法による弾塑性解析法

衝撃荷重下での材料のひずみ速度効果による影響について考慮し、断面分割法を用いた有限要素法による弾塑性解析について説明する。

断面分割法は、平面保持が成り立つという仮定の下で、曲率を逐次増加させることにより、断面内の力の釣り合いから曲げモーメントを求めていく方法である。

この解析法は、任意形状の非線型な応力-ひずみ関係を用いることができる、コンクリートの最大圧縮応力以降の

軟化域の挙動も追跡できるので、軟化領域にいたる弾塑性挙動を解析的に算定できる等の特徴がある。以下に断面分割法の概要を説明する。なお、後述するPC部材への応用のためここではPC鋼材の取り扱いも含めて説明する。

(1) 解析理論

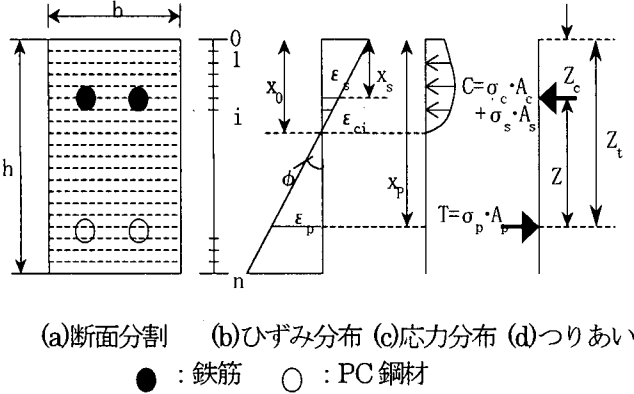


図-4 断面内のひずみおよび応力分布

図-4は、断面内の応力とひずみ分布を表したものである。まず、与えられた断面に対して中立軸を仮定し、コンクリート断面を n 個の水平な要素に分割する。はりの高さを h とすれば一個の要素の高さは、 h/n となる。平面保持を仮定し、断面の曲率を ϕ とすると、はり上縁部から i 番目のコンクリート各要素の平均ひずみは次式によって与えられる。

$$\varepsilon_{ci} = ((i-0.5) \frac{h}{n} - x_0) \cdot \phi \quad (1)$$

この要素の圧縮応力 σ_{ci} は、任意の非線型なコンクリートの応力-ひずみ関係のモデルに対応し、

$$\sigma_{ci} = f_c(\varepsilon_{ci}) \quad (2)$$

と表現できる。 i 番目のコンクリート要素の圧縮力 C_{ci} は、要素の中心に作用すると仮定すれば、

$$C_{ci} = b_i \cdot (h/n) \cdot \sigma_{ci} = A_{ci} \cdot \sigma_{ci} \quad (3)$$

となる。ここに、 A_{ci} は要素 i のコンクリートの断面積である。

また、 j 番目のコンクリート要素の引張力 T_{cj} も同様にし、次式で与えられる。

$$T_{cj} = b_j \cdot (h/n) \cdot \sigma_{cj} = A_{cj} \cdot \sigma_{cj} \quad (4)$$

ここに、 A_{cj} は要素 j のコンクリートの断面積である。

圧縮鉄筋各要素の平均ひずみは、

$$\varepsilon_{si} = (x_s - x_0) \cdot \phi \quad (5)$$

与えられ圧縮鉄筋要素に生じる応力 σ_{si} は、弾塑性型の応力-ひずみ関係のモデルに対応し、

$$\sigma_{si} = f_s(\varepsilon_{si}) \quad (6)$$

と表現でき、 i 番目要素の圧縮鉄筋要素の圧縮力 C_{si} は、

$$C_{si} = A_{si} \cdot \sigma_{si} \quad (7)$$

となる。ここに、 A_{si} は要素 i の鉄筋の断面積である。

また、 j 番目要素の引張鉄筋要素の引張力 T_{sj} も同様にし、

$$T_{sj} = A_{sj} \cdot \sigma_{sj} \quad (8)$$

与えられる。ここに、 A_{sj} は要素 j の鉄筋の断面積である。

断面全体の圧縮合力は、各コンクリート要素の圧縮力 C_{ci} と、圧縮鉄筋要素の圧縮力 C_{si} の総和として次式で求められる。

$$C = \sum C_{ci} + \sum C_{si} \quad (9)$$

一方、PC鋼線各要素の平均ひずみは、

$$\varepsilon_{pi} = (x_p - x_0) \cdot \phi \quad (10)$$

与えられ i 番目要素のPC鋼線の引張力 σ_{pi} は、

$$\sigma_{pi} = f_p(\varepsilon_{pi}) \quad (11)$$

となる。断面全体の引張合力は、次式で表現される。

$$T = \sum T_{pi} + \sum T_{cj} + \sum T_{sj} \quad (12)$$

以上の計算により圧縮合力と引張合力が釣り合うように、中立軸の位置を求めたうえで、合力図心間距離 Z を用いて、曲げモーメント M は、次式で与えられる。

$$M = C \times Z = T \times Z \quad (13)$$

(2) 材料の応力-ひずみ関係

図-5に本研究で使ったコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。構成式は、道路橋示方書⁹⁾の通りとした。

また、鉄筋の応力-ひずみ関係は図-6に示すような完全弾塑性モデルとし、PC鋼材の応力-ひずみ関係は図-7に示すものを用いた。

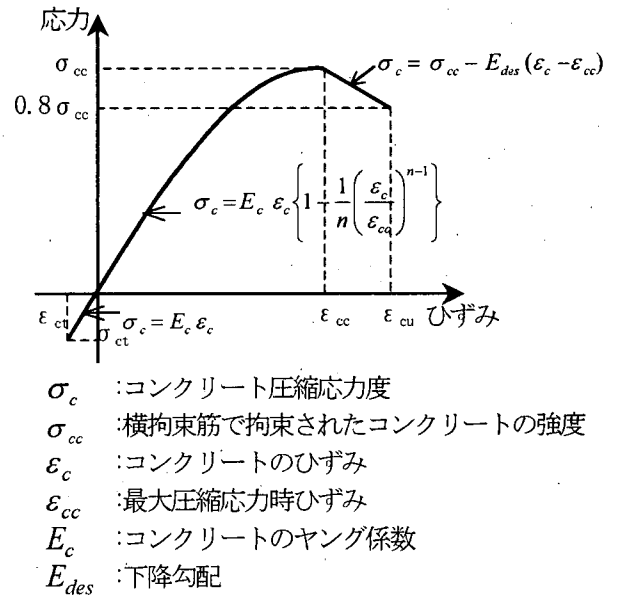


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

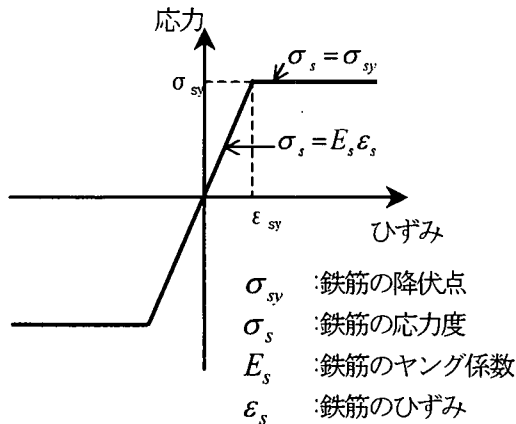


図-6 鉄筋の応力-ひずみ関係

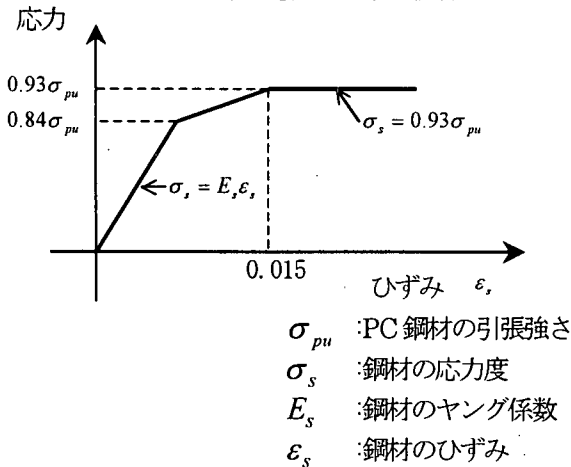


図-7 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

(3) ひずみ速度効果

衝撃などの载荷速度が大きい荷重を受ける場合の挙動特性は材料に生じるひずみ速度の影響により静的な荷重を受ける場合に比べ大きく異なると言われている。材料のひずみ速度効果はかなり明らかにされてきているが実験条件の設定や測定上の問題点また寸法効果の影響などにより、広く解析や設計に用いられるレベルまで十分には明らかにされていないのが現状である。

本研究では、鉄筋に関しては高橋ら¹⁰⁾の提案式に基づく強度増加率 $DIF_s = 1.2$ を用いた。また、コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果は、鋼材に比べ増加率は一般に大きいとされている。しかし、各強度の増加率の詳細については現在もなお不明な点も多い。本研究では、ひずみ速度効果として強度の増加率だけを考慮し、試行錯誤に試みた結果、コンクリートの圧縮強度増加率 DIF_c を 1.7、引張強度増加率 DIF_t を 1.0 とし、鉄筋に関しては、 DIF_s を 1.2 とした場合に実験結果をよく再現することが確認された。

図-8 に材料試験より得られた値にひずみ速度効果を考慮した RC はり断面のモーメント-曲率関係を示した。正の曲げに対する終局時の最大抵抗曲げモーメントは $28 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、曲率は $0.072/\text{m}$ となった。これより、設計荷重による抵抗モーメントの約 1.46 倍の耐力を有していることがわかる。このモーメント-曲率関係をバイリニア型に

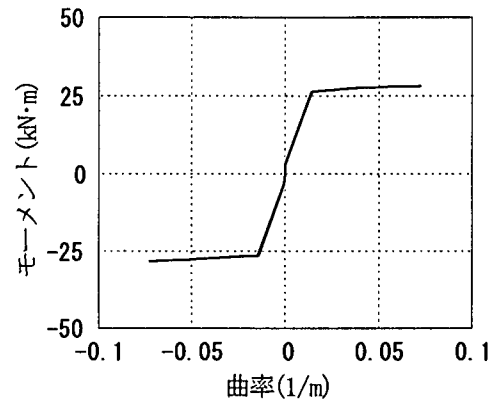


図-8 モーメント-曲率関係

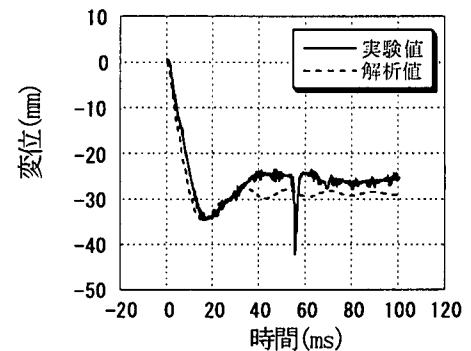


図-9 変位応答の比較

(重錘質量 200kg, 衝突速度 5.0m/s, ゴム無し)

モデル化し、塑性後の除荷と再载荷は初期勾配として有限要素法を用い弾塑性解析を行った。また解析では節点数 13 のはり要素として計算している。重錘質量 200kg、衝突速度 5.0m/s のケース (F2) をモデルとし、载荷点における変位応答について比較した結果の一例を図-9 に示す。

2. 4 実験結果との比較

ここでは各種条件下で行った衝撃実験にこれまで述べた本解析法を適用した。実験との比較は表-4 に示すように重錘質量の相違、载荷点のゴム設置の有無、重錘先端形状の相違の各ケース比較を行った。

(1) 载荷点における衝撃荷重の応答特性

表-4 に示す実験の荷重応答特性を図-10~15 に示す。载荷点にゴムが無い場合は大きな荷重が短時間に発生しその後多少の増減はあるものの緩やかに減少するのに対し、有る場合は荷重は小さく波形は滑らかな波形となっている。解析ではこれらの荷重波形を入力し解析を行った。

表-4 実験名一覧

実験名	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	载荷点の状況
F1	102	6.68	ゴム無し
F2	200	4.00	ゴム無し
F3	299	4.00	ゴム無し
F1(R)	102	6.68	ゴム有り
F3(R)	299	4.00	ゴム有り
F3(C)	298	4.00	重錘先端の曲率大

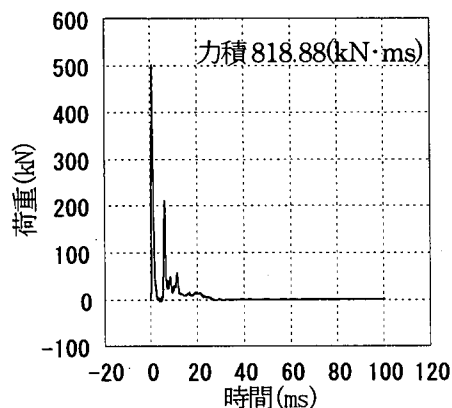


図-10 重錘質量102kg, 衝突速度6.68m/s, ゴム無し(F1)

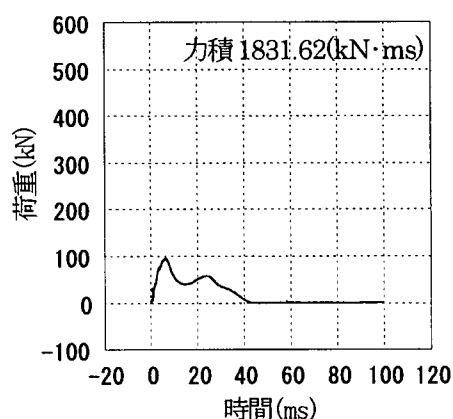


図-14 重錘質量299kg, 衝突速度4.0m/s, ゴム有 (F3(R))

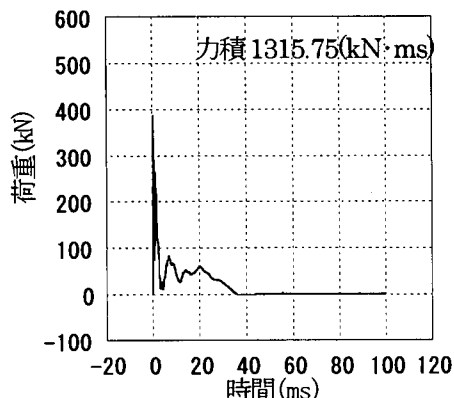


図-11 重錘質量200kg, 衝突速度5.0m/s, ゴム無し(F2)

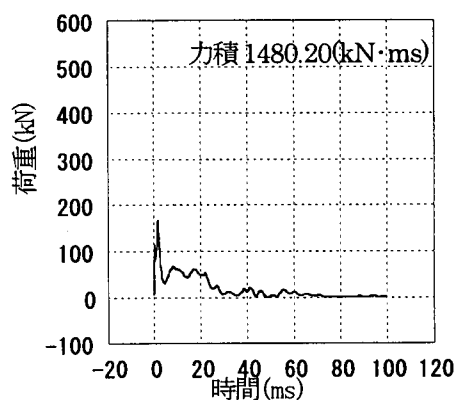


図-15 重錘質量298kg, 衝突速度4.0m/s, ゴム無 (F3(C))

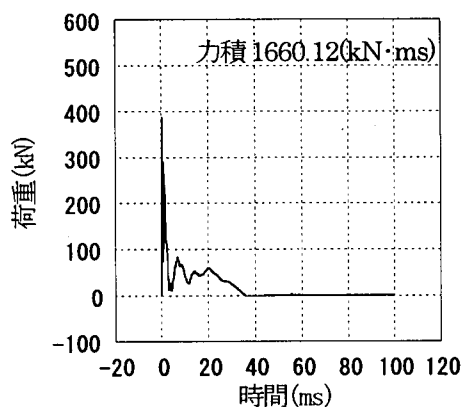


図-12 重錘質量299kg, 衝突速度4.0m/s, ゴム無し(F3)

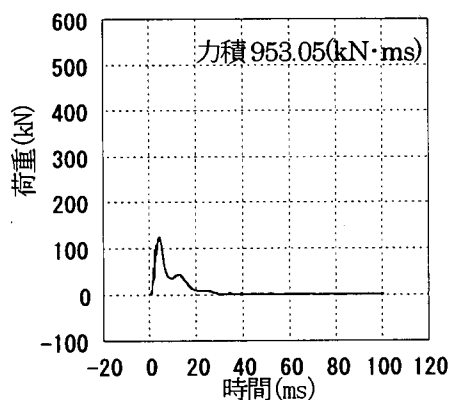


図-13 重錘質量102kg, 衝突速度6.68m/s, ゴム有 (F1(R))

(2) 載荷点でのゴムの有無による影響

載荷点でのゴムの有無がRCはりの衝撃挙動に及ぼす影響について考察する。図-16には静的試験より得られた載荷点に設置したゴムの特性を示す。荷重の下側の曲線は除荷時の荷重-変位関係である。ゴムはシバタ工業株式会社のFV-65であり、寸法は150×150×50(mm)である。

図-17には重錘質量102kg, 衝突速度6.68m/sにおける載荷点でのゴム設置の有無による破壊状況を示す。これより、載荷点でのゴム設置の有無により、ひび割れの発生する領域に大きな違いは確認されなかった。ひび割れの進展する様子に関しては、ゴムを設置した場合は数本の曲げひ

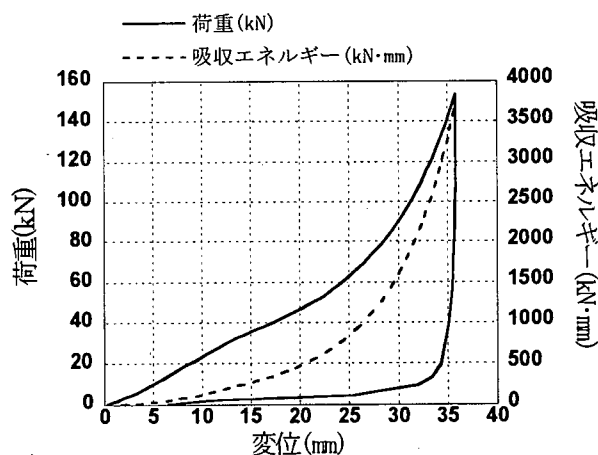
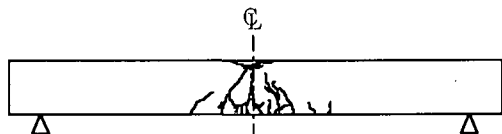
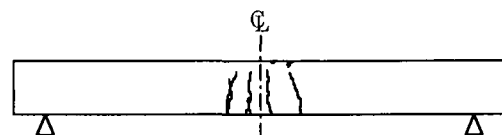


図-16 ゴム特性

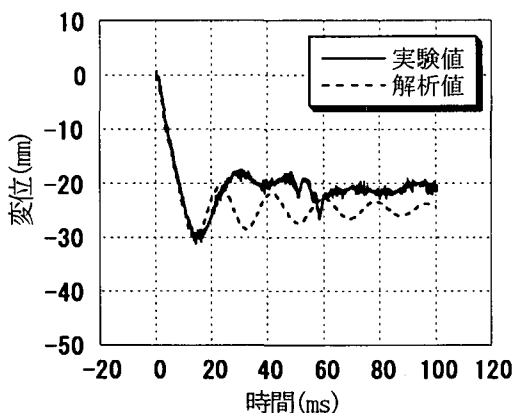


(a) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム無(F1)

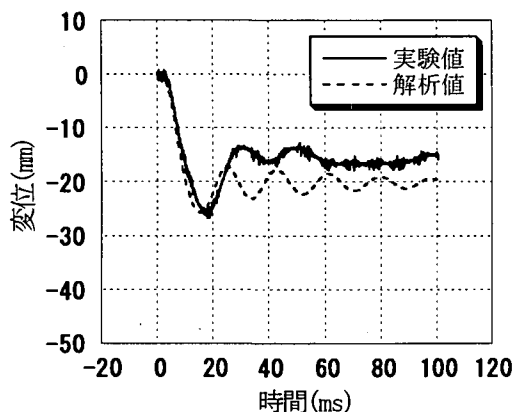


(b) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム有(F1(R))

図-17 破壊状況



(a) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム無(F1)

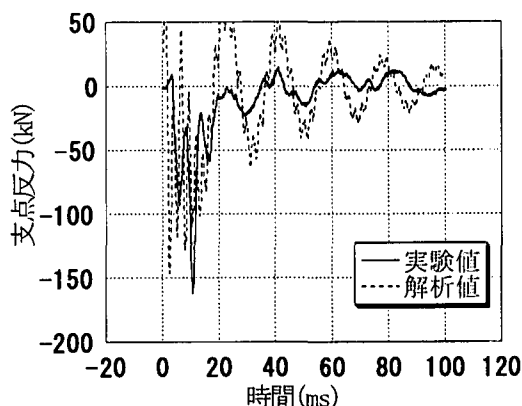


(b) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム有(F1(R))

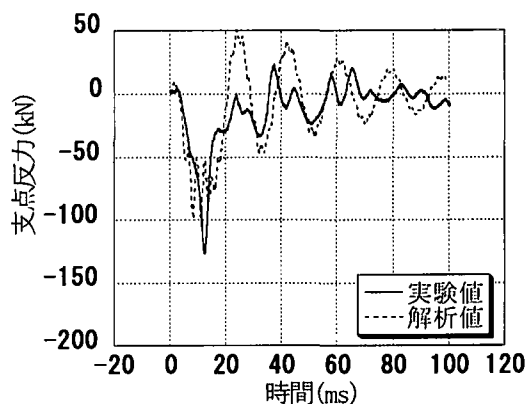
図-18 変位応答

ひび割れのみ生じているが、直接载荷した場合には、はり下面で様々な方向に向かうひび割れが生じ、はり上面に向かうひび割れは载荷点に向かって進展していくのがわかる。したがって、ゴムがある場合、局部的破壊よりも全体的破壊が卓越していると考えられる。

図-18、図-19には载荷点でのゴムの有無による载荷点変位応答と支点反力応答の実験値と解析値の比較をそれぞれ示す。なお、支点反力は左右の合力値である。変位応答は、全体的には、実験値とほぼ同じ値をとっている。なかでも変位最大値に関しては実験値をよく捉えている。



(a) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム無(F1)



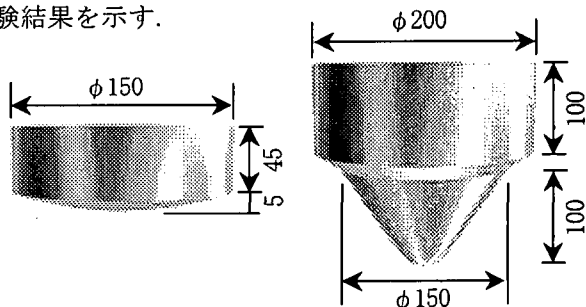
(b) 重錘質量 102kg, 衝突速度 6.68m/s ゴム有(F1(R))

図-19 支点反力応答

また、変位の立ち上がり部分の勾配がほぼ同じであることから、はりの変位速度が実験、解析ともに同じであるということがわかる。しかし、残留変位については実験値とのわずかな相違が確認された。また、実験ではゴムを設置することにより変位の立ち上がりが少々遅れるという傾向が見られたが、解析による変位応答でもその様子が確認できた。また支点反力については第一波の最大値は実験値と大体合っておりそれ以降の反力の値は多少異なるものの全体的には実験値を良く捉えていると思われる。

(3) 重錘先端形状の相違による影響

図-20 に示すような重錘先端形状の異なる、すなわち曲率小、曲率大の2種類の重錘先端を用いた実験結果を示す。



(a) 曲率小($r=568\text{mm}$) (b) 曲率大($r=30\text{mm}$)

図-20 重錘先端形状

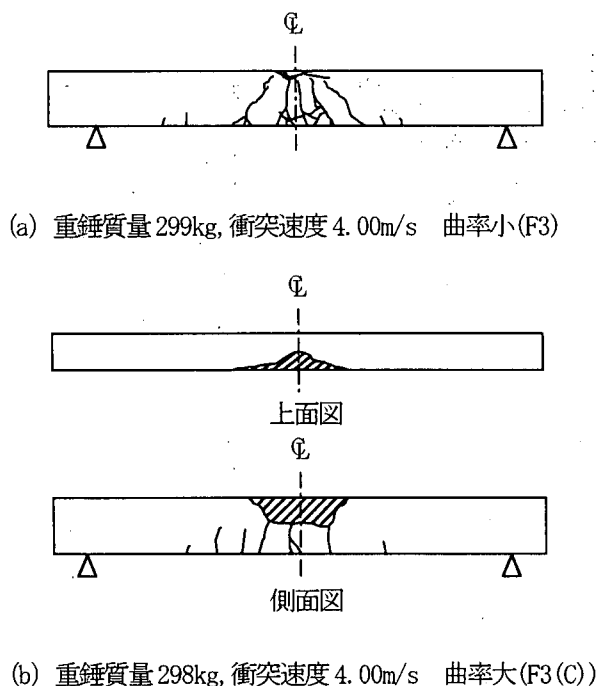


図-21 破壊状況

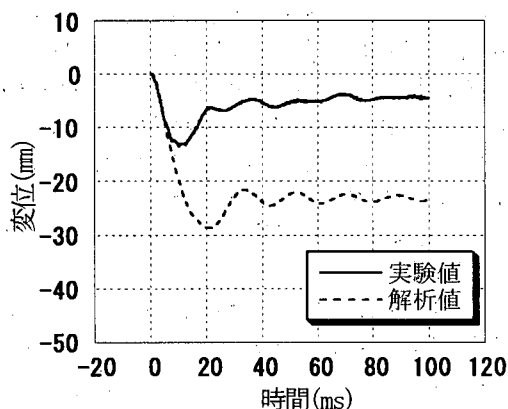
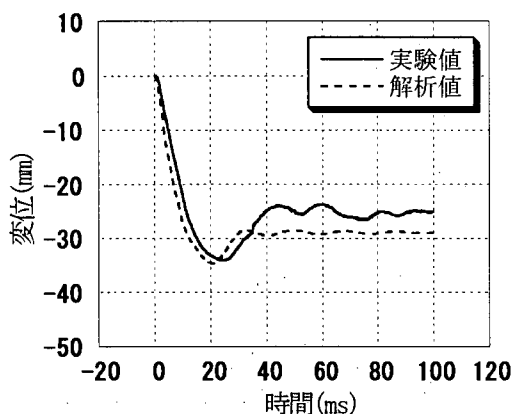


図-22 変位応答

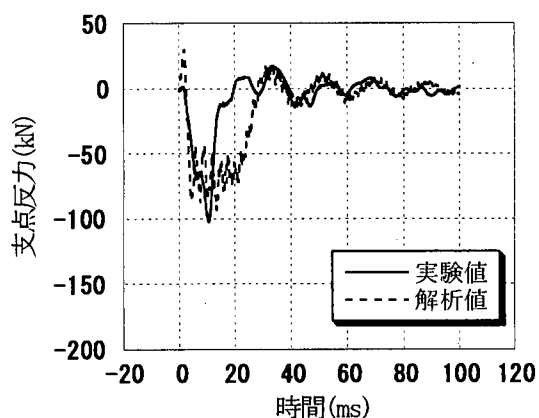
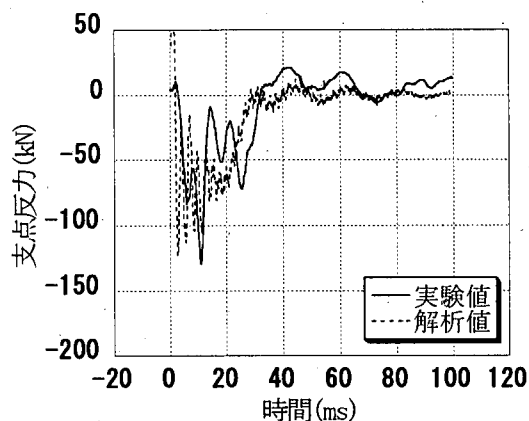


図-23 支点反力応答

図-21 は重錘質量 300kg, 衝突速度 4.0m/s における重錘先端形状の相違による破壊状況を比較したものである。曲率大については上面図についても示した。斜線の部分はコンクリートが剥離した部分である。曲率大の場合は側面が大きく剥離しているのがわかる。このことから、構造物に衝突する物体の曲率が大きくなると局所的な破壊が先行され3次元的な破壊になることがわかった。

図-22, 図-23 は、重錘先端形状の相違による載荷点変位応答と支点反力応答の実験値と解析値を示したものである。曲率大については大きく変位応答が実験値と異なっている。これは前述したように破壊形状に起因するものと思われる。実験時において重錘衝突時に供試体側面部が大きく剥離し、重錘のエネルギーが剥離とその飛散によって費やされ、供試体に完全に伝わらなかったためと思われる。支点反力についても最大値はほぼ近似するものの波形形状が異なっている。曲率大については収束時間が短くなっていることから前述の通り全エネルギーが伝わらなかったためと思われる。

以上のように、曲げ破壊型の破壊性状を示す衝撃を受けるRC はりの挙動は、重錘先端形状が極端に小さい場合を除いてここで示した断面分割法による有限要素法解析に

よってほぼ再現可能なことが明らかになった。3. では本手法のロックシェッドへの適用例を示す。

3. ロックシェッドの衝撃解析

これまでロックシェッドは RC, PC, 鋼製を問わず, 昭和 58 年度版「落石対策便覧」(初版)に基づいて許容応力度法で設計されてきた。その後平成 12 年 6 月に同便覧は改定され, それによると, 落石衝撃力は緩衝材による荷重分散効果を考慮し, その部分分布荷重の道路軸方向載荷幅を有効幅として二次元骨組構造にモデル化したロックシェッドト頂版上に作用させて静的解析を行うとしている。

しかし, 実際のロックシェッドに作用する外力は静的ではなく衝撃的であること, また PC ロックシェッドの場合には頂版部が横締めされていることから荷重分担効果が期待できるものと考えられる。したがってロックシェッドのより合理的な設計を行うためにはロックシェッドに作用する衝撃力を適切に評価すること, ロックシェッドの衝撃応答を正確に評価する弾塑性衝撃応答解析手法を確立することが求められている。これらが十分可能になれば偶発的な落石荷重が主荷重であるロックシェッドの限界状態に基づく設計が可能であると思われる。ここでは逆 L 型ロックシェッドを対象に行った本手法を用いた適用について説明する。

3.1 全体構造

本研究では, RC はりでの衝撃実験および解析で得られた知見をもとに標準型逆 L 型 PC ロックシェッドの終局曲げ限界状態解析を行った。逆 L 型 PC ロックシェッドについては図-24 に示す通りスパン長 8m, ひさし長 1.8m, 屋根勾配は 5%とした。また図-25 および表-5 に示す通り主梁については基本 3 タイプあり, 柱 3 タイプと対で使用することが基本とされている。主梁の床版厚については 0.15 m を最小厚としているが, 標準値も 0.15m であることから 0.15mとした。

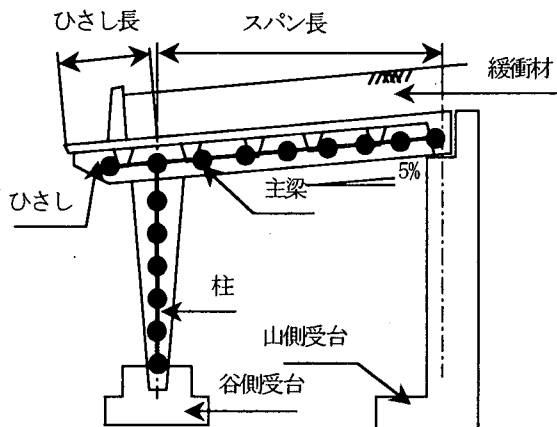


図-24 標準逆 L 型 PC ロックシェッド横断面図

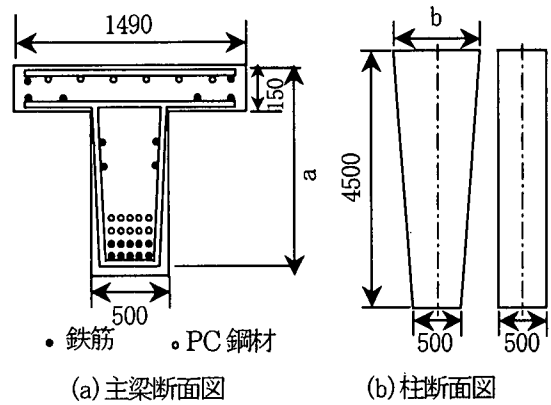


図-25 部材断面図

表-5 解析例一覧

	主梁タイプ	a(mm)	柱タイプ	b(mm)
TYPE1	BR90	900	CR90	900
TYPE2	BR110	1100	CR110	1100
TYPE3	BR130	1300	CR130	1300

表-6 材料諸定数

コンクリート	
圧縮強度 (N/mm ²)	60
引張強度 (N/mm ²)	6
弾性係数 (N/mm ²)	3.5 × 10 ⁴
鉄筋	
降伏強度 (N/mm ²)	295
弾性係数 (N/mm ²)	2.0 × 10 ⁵
PC 鋼材	
降伏強度 (N/mm ²)	1862
初期引張時 (N/mm ²)	1395
弾性係数 (N/mm ²)	2.0 × 10 ⁵

3.2 断面耐力

解析に用いたコンクリート, 鉄筋, PC 鋼材の材料定数を表-6 に示す。コンクリートの設計基準強度, 鉄筋および PC 鋼材は「道路橋示方書 I・共通編」に準拠している。さらに緩衝材としては単位堆積重量 18kN/m³ の標準砂を敷厚 0.9m で用い, 緩衝材の重量は, 梁の自重に上増しして考慮している。また, 本研究でははりの解析で得られた結果を参考にして, コンクリートの圧縮強度を材料諸定数の 1.7 倍, 引張強度は 1.0 倍, 鉄筋および PC 鋼材の降伏強度を 1.2 倍として計算した。

与えられた条件をもとに計算された各主梁断面の設計基準強度および終局時の抵抗モーメントを表-7 に示す。表中の () は負の曲げモーメントのそれぞれの値である。これよりひずみ速度効果による割増を考慮した正の曲げに対する終局時の最大抵抗曲げモーメント Mu は設計基準強度の約 1.4 倍の耐力を持つことになる。得られたモーメント-曲率関係をバイリニア型にモデル化し, 2 次元骨組構造解析に用いた。

表－7 終局時の抵抗モーメントと設計強度

	終局時曲げ モーメント M_u (kN・m)	静的抵抗曲げ モーメント (kN・m)	静的せん断 耐力 (kN)
BR90	1402 (392)	940 (294)	2263
BR110	1734 (480)	1195 (362)	2910
BR130	2067 (568)	1450 (431)	3587

3.3 落石の衝撃力

(1) 衝撃力の算出式

緩衝材として砂を用いた際の落石による衝撃力は「落石対策便覧」より次式によって求められる。

$$P = 2.108(m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha \quad (14)$$

P : 落石の衝撃力 (kN)

m : 落石の質量 (t)

λ : ラーメの定数 (kN/m²)

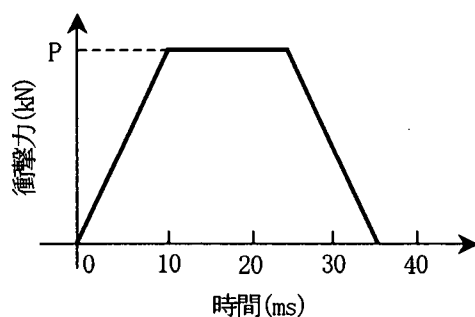
H : 落石の落下高さ (m)

α : 砂層厚と落石直径の比から決定される割増係数

ラーメの定数については、使用する砂の粒度分布、含水比、締め固め度等によって変化してくるが、「落石対策便覧」の落石に関する実験例より、1000kN/m²とした。また、割増係数 α は落石直径によって変化するが、砂層厚を落石直径より厚くしてもそれほど緩衝効果は大きくならないことから $\alpha=1$ とした。

(2) 衝撃力の時間方向分布

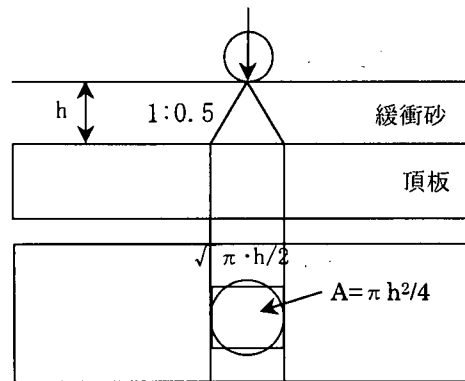
衝撃力の時間方向分布については、著者らが行った実験結果をもとにして図－26 に示すような全載荷時間が35msec になるような台形分布波形を用いた。最大衝撃力 P は式(14)より得られる値を使用した。



図－26 衝撃力の時間方向分布

(3) 衝撃力の作用面積

緩衝材として砂を用いた場合の衝撃力の分散は図－27 に示す通り、「落石対策便覧」の落石に関する実験例より、緩衝砂層厚に対して1:0.5の範囲を考えそこに等分布荷重が作用するものとした。



図－27 衝撃力の作用面積

(4) 落石衝撃力の分担率

PC ロックシェッドでは、横締めにより主桁が数セットで一体化されており、支間中央に載荷する場合は分担率を考慮しても良いことになっている。よって支間中央部の載荷については、分担率を0.6として計算を行った。

3.4 終局曲げ限界状態解析

これまでの仮定のもとで、表－5に示す3タイプの逆L型ロックシェッドの解析を行った。検討対象として落石質量は10t、15tの2種類について、落下高さは10m～60mとした。本解析では落石による衝撃荷重を支間中央に載荷した際の終局曲げ限界として載荷点の塑性たわみがスパン長の1%に達したときまでの計算を行なった。阪神・淡路大震災で被害を受けた橋脚においては残留相対変形角が1.7%以上のものは水平保有耐力があっても上部工との取り付けが困難であることから定められたが、ロックシェッドの場合はこのような機能面の条件がないことから1.7%以上許容できると報告されている。このことから、許容塑性たわみをスパンの1%と仮定した。ここでは、ロックシェッドを骨組構造とし落石荷重を具体的に仮定し弾塑性解析による照査例を示した。

各種条件下の計算結果を表－8に示す。これによると、TYPE1については落石質量10t、落下高さ30mにおいて終局変位を上回る結果が得られた。さらに落石質量が15tの場合は落下高さ20mにおいて既に終局変位を上回ることがわかる。またTYPE2は落石質量10tにおいて落下高さ40m、TYPE3は落石質量10t、落下高さ50mにおいて終局変位を上回ることからTYPE1に比べてより大きな落石衝撃力に耐えられることが確認できる。

ここでは、ロックシェッドを2次元骨組構造とし、落石荷重波形の仮定をして本解析法の適用例を示した。実際のロックシェッドは立体構造であり、落石時に塑性状態となった場合の荷重波形の他、限界状態の設定など明らかでない点も多いが、本手法を手始めとして衝撃荷重を受ける構造の解析手法をより発展させて役立てたいと考えている。

表一 8 終局状態の照査結果

(a) TYPE1

落石質量(tf)	落下高さ(m)	応答変位 (cm)	照査結果
10	10	3.08	safe
10	20	5.64	safe
10	30	8.31	fail
10	40	10.80	fail
10	50	13.13	fail
10	60	15.37	fail
15	10	4.54	safe
15	20	8.64	fail
15	30	12.44	fail
15	40	15.99	fail
15	50	19.40	fail
15	60	22.71	fail

(b) TYPE2

落石質量(tf)	落下高さ(m)	応答変位 (cm)	照査結果
10	10	2.30	safe
10	20	4.28	safe
10	30	6.25	safe
10	40	8.24	fail
10	50	10.12	fail
10	60	12.01	fail
15	10	3.46	safe
15	20	6.50	safe
15	30	9.60	fail
15	40	12.52	fail
15	50	15.27	fail
15	60	17.93	fail

(c) TYPE3

落石質量(tf)	落下高さ(m)	応答変位 (cm)	照査結果
10	10	1.89	safe
10	20	3.53	safe
10	30	5.10	safe
10	40	6.73	safe
10	50	8.37	fail
10	60	9.94	fail
15	10	2.83	safe
15	20	5.31	safe
15	30	7.88	safe
15	40	10.37	fail
15	50	12.72	fail
15	60	15.00	fail

4. まとめ

本研究では、RC はりの比較的低速度の重錘衝突による衝撃を対象とし、各種条件下での実験結果との比較により本解析法の有効性と適用性について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 本研究で示した比較的低速度の衝撃実験範囲ではコンクリートのひずみ速度効果で圧縮強度増加率 DIF_c を 1.7, 引張強度増加率 DIF_t を 1.0 とし、鉄筋に関しては、 DIF_s を 1.2 とした場合に実験結果をよく再現することが確認された。
- 2) 曲げ破壊型の破壊性状を示す衝撃を受ける RC はりの挙動は、断面分割法による有限要素法解

析によってほぼ再現可能なことが明らかになった。

- 3) 衝突体の先端形状によっては 3 次元的に破壊性状を示すため、2 次元解析手法での適用には注意を要することを明らかにした。
- 4) RC はりでの衝撃実験および解析で得られた知見をもとに PC ロックシェッドへ適用し、2 次元骨組解析にて、終局曲げ限界状態解析例を示した。

衝撃応答解析法の改善と汎用性の向上には解析手法に反映できる基礎的な実験データの更なる蓄積と衝撃荷重下の部材レベルでの破壊機構に関する研究が必要と考えており研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，2000 年 6 月。
- 2) 松浦幹佳，島田功，小林治俊，園田恵一郎：衝撃的地震動による RC ラーメン橋脚の破壊解析，第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 183-188，1998 年 6 月。
- 3) 原田耕司，日野伸一，石川信隆，香月智：衝撃的地震動を受ける RC 橋脚模型における繊維補強効果について，第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 195-200，1998 年 6 月。
- 4) 土木学会：第 II 編，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会経過報告，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp. 1-81，2000 年 6 月。
- 5) 松尾修，佐々木哲也，小村辰彦：模型実験に基づく落石防護擁壁の設計法の提案，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp. 217-222，2000 年 6 月。
- 6) 中田吉彦，榎谷浩，梶川康男，熊谷貴秀：重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 1831-1842，2000 年 3 月。
- 7) 土木学会：構造工学シリーズ 8，ロックシェッドの耐衝撃設計，1998 年 12 月。
- 8) 大野友則，藤掛一典，井元勝慶，別府万寿博：衝撃現象の計測におけるいくつかの問題点，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 183-188，2000 年 6 月。
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，丸善，1996 年 12 月。
- 10) 高橋芳彦，大野友則，内田孝，太田俊昭，日野伸一：高速変形する高強度コンクリートの動力学特性，第 3 回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集，1989 年

(2001 年 4 月 20 日 受付)