

RC はりの衝撃特性と性能評価に関する実験的研究

Experimental study on impact characteristics and performance evaluation of reinforced concrete beams

橋 紗代子*, 榎谷浩**, 中村佐智夫***
Sayoko Tachibana, Hiroshi Masuya, Sachio Nakamura

* 博(工), 株式会社ホクコン技術本部 (〒918-8152 福井県福井市今市町 66-20-2)

** 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*** 日本サミコン(株), 技術部設計開発課 (〒950-0925 新潟県新潟市中央区弁天橋通 1-8-23)

This research has been done in order to get fundamental data for the establishment of the performance-based design of reinforced concrete beams under lateral impact. We achieved the series of impact experiments in reinforced concrete beams subjected to comparatively low speed collision. Characteristics of impact load and general impact properties of reinforced concrete beam were clarified in this paper. Various characteristics as like the collision energy, the momentum, response values of beams under impact and their mutual relationships were investigated. Evaluation method of the flexural performance of reinforced concrete beams under impact had been shown. Furthermore, the buffer capability of the sand layer as a shock absorbing material and the equation to evaluate maximum displacement of the reinforced concrete beam in that case had been shown.

Key Words: reinforced concrete beam, performance based design, flexural failure, sand cushion

キーワード: 鉄筋コンクリートはり, 性能照査型設計, 曲げ破壊, サンドクッション

1. はじめに

写真-1は2007年3月の能登半島地震で発生した岩盤崩落により大きな損傷を受けたRCロックシェッドを示したものである¹⁾。このように落石などによる衝撃を受ける構造物の力学的挙動は一般に複雑であり、構造物の破壊に至るまでの衝撃挙動は、構造物の種類、構造物を構成する部材種別や材料特性に密接に関連していることが知られている^{2,3,4)}。

我が国では、防護構造物に対する衝撃分野の研究は1980年代後半より本格的に行われるようになってきた^{5,6,7,8)}。衝撃に関する実験的研究や解析的研究も最近では多くの研究機関で行われており、低速度の衝撃に対する実験手法は標準化されつつあり、解析手法に関しても有用な情報が得られつつある^{9,10,11)}。対象とする構造部材としては、RCやPC構造物の研究が多く、しかも緩衝材がない場合の研究が多い。現在、ロックシェッド、落石防護柵などの防護構造物の多くに、衝撃力の緩和などを目的として敷砂などの緩衝材が設置されている^{12,13)}。落石

などによる衝撃を受けた場合、緩衝材と構造物は一体となって挙動する。よって、それらの構造物の耐衝撃特性は緩衝材を含む構造物全体で評価されるのが望ましいと考えられている。緩衝材がある場合は、当然その影響を考慮した耐衝撃性の検討が必要であり^{14,15)}、その重要



写真-1 能登半島地震で落石により大きく損傷を受けたロックシェッド (2007 年 3 月, 輪島市)

性については著者などにより指摘され、その影響の一部について明らかにされている¹⁶⁾。

一方、多くの構造物設計に関わる基準の見直しが盛んに検討されている^{17,18,19)}。この動きは、仕様規定設計から性能規定型設計への移行に対応している。性能規定型設計は、原則として規定した性能を満足することで、設計の自由度が大きく合理的な設計方法である。しかし、必要な性能をどのように規定するか、その性能をどのように保証し、その保証をどう担保するかが重要である。防護構造物も安全・安心を保証するものとして同じ状況にある。衝撃を受ける構造物の性能設計に関しては、大きな枠組みが提案されており、今後衝撃に対応する構造物部材の設計に利用可能な具体的な情報が必要とされている^{20,21,22)}。

このような背景により、本研究では、衝撃を受ける構造物の性能照査型設計を確立するための基礎的データを提示することを目的に一連の実験を行った。最も基本的な部材である各種 RC はりを用いて行った、鋼製の重錘の衝突実験結果より得られた衝撃荷重による力積、荷重継続時間など衝撃特性について検討した。さらに、直接衝撃を受けた場合について RC はりの最大変位の推

定式を示している。このような推定は構造物の性能評価の一つである安全空間確保の照査に利用できる。また、砂緩衝材がある場合についても、その衝撃緩衝効果を明らかにするとともに最大変位の推定式を示している。

2. 実験概要

2.1 鉄筋コンクリートはり試験体

図-1に実験に使用した試験体の寸法および配筋図を示す。(a)は断面図、(b)は側面図を示したものである。

表-1に試験体である鉄筋コンクリートはりの設計値一覧を示す。これらのはりはすべて複鉄筋矩形断面である。Type Aは断面の幅×高さが150mm×250mmであり、主鉄筋としてD13を用いた。本研究ではこの断面を基準とした。スパン長は1000mm(A1)、2000mm(A2)、4000mm(A4)の3種とした。Type CおよびType Dの断面の形状寸法はType Aと同じであるが、Type CはType Aにおける主鉄筋D13の代わりに径を大きくしたD16を、Type Dは径を小さくしたD10を用いている。結果としてType A2に比べ、静的曲げ耐力 P_u はType Cで大きく、Type Dで小さい。Type Bは断面の幅×高さが300mm×

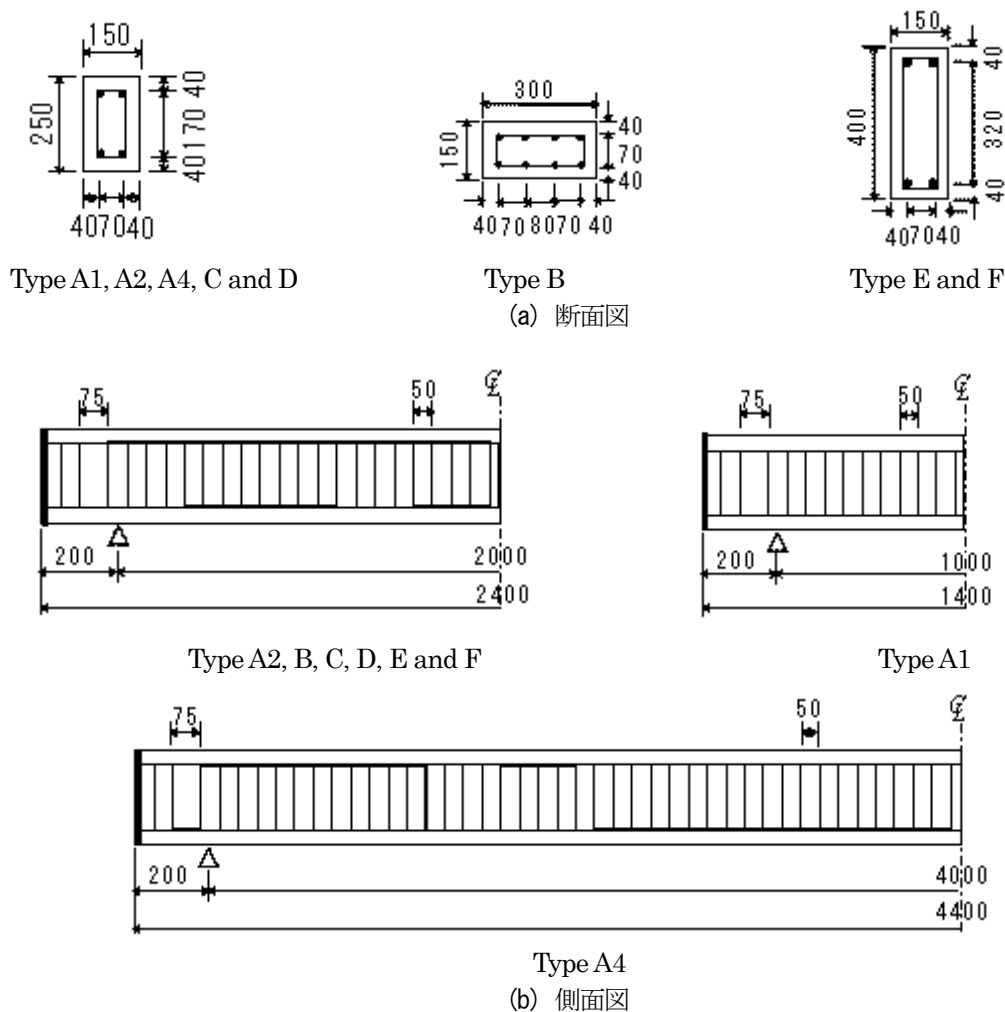


図-1 実験に用いた RC はり試験体の寸法および配筋図

表-1 RC はりの設計値

Type	主鉄筋	静的曲げ耐力 P_u (kN)	静的せん断耐力 V_u (kN)	せん断余裕度 $\alpha_s = (V_u / P_u)$	曲げ剛性 EI_u (kN m ²)	固有周期 T_0 (ms)
A1	D13	66.7	91.1	1.4	5728.7	2.5
A2	D13	33.3	91.1	2.7	5728.7	10.0
A4	D13	16.7	91.1	5.5	5728.7	40.1
B	D13	31.8	65.9	2.1	2411.7	16.9
C	D16	50.3	94.8	1.9	6087.5	9.7
D	D10	20.2	87.1	4.3	5341.9	10.4
E	D13	59.5	145.6	2.4	22900.2	6.3
F	D10	34.9	140.6	4.0	21593.3	6.5

150mmであり、Type Aより桁高を低くしたが、静的曲げ耐力 P_u がType A2と同程度となるようにした。Type EはType A2より桁高が高く、静的曲げ耐力 P_u は大きい値となる。Type FはType Eと同じく桁高はType A2より高いが、静的曲げ耐力はType A2と同程度である。すべての供試体のスターラップはD6を使用している。各耐力算定時の部材係数は $\gamma_b=1.0$ とした。静的せん断耐力 V_u に対する静的曲げ耐力 P_u の比 $\alpha_s = (V_u / P_u)$ であるせん断余

裕度はすべての試験体において1以上であるため、静的載荷時に曲げ破壊が先行する曲げ破壊型のはりである。なお、コンクリートの設計基準強度は24MPa、軸方向鉄筋の降伏強度は345MPa、せん断補強筋の降伏強度は295MPaとし、またコンクリートの材料係数 $\gamma_c=1.3$ 、鉄筋の材料係数 $\gamma_s=1.0$ として設計値を算定した²³⁾。

2.2 実験方法

本研究では、衝撃実験と共に静的載荷実験を行っている。静的実験では、油圧式実験装置(島津製作所, UH-C500A)を使用した。

衝撃実験には金沢大学構造工学研究室の重錘落下式の実験装置を使用した。図-2にその実験装置を示す。用いた重錘は、鋼製の重錘の下にロードセルと曲率半径が565mmで半径が75mmである先端部を取り付けたものを用いた。重錘は質量が150kg, 300kgそして450kgの3種を用いた。実験では重錘をクレーンで所定の高さまで吊り上げ、ロープで特殊な吊具を外し自由落下させた。自由落下中は2本のガイドレールにより、水平を保持できるようにになっている。支点部ではRCはり試験体の跳ね上がり防止のために、跳ね上がり防止治具で固定した。

表-2に実施した直接衝突実験の衝突条件を示す。直接衝突実験とは、重錘衝突点に緩衝材を用いず、重錘を直接RCはり試験体に衝突させる実験のことである。試

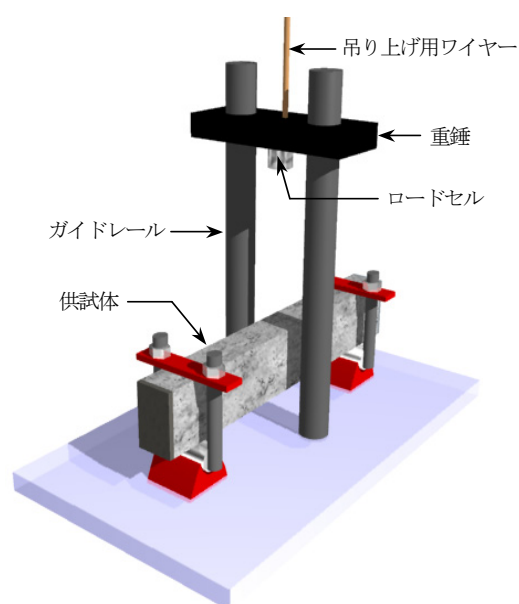


図-2 重錘落下式衝撃実験装置

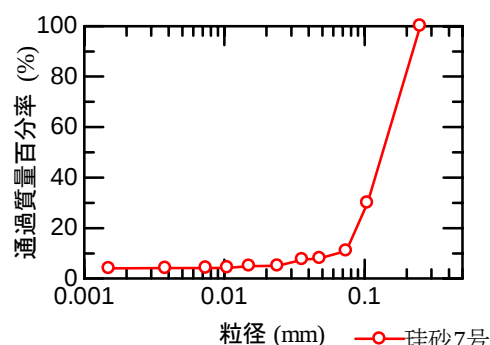


図-3 砂の粒径加積曲線

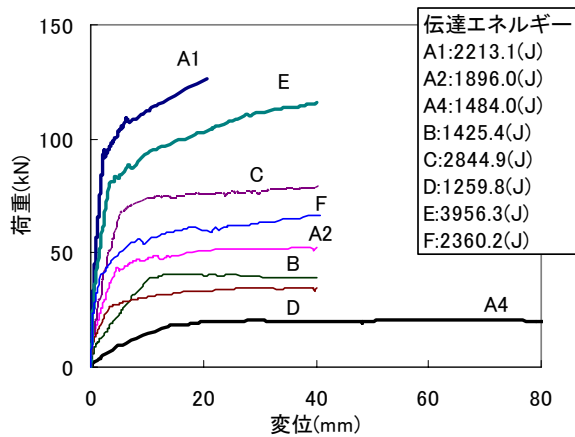
験体 Type A2 において重錘質量は 150kg, 300kg および 450kg を用い、衝突速度を 1.0m/s から 6.0m/s の間でパラメトリックに変化させて行った。これらを α シリーズとし、重錘質量 300kg, 衝突速度 5m/s で異なる試験体に衝突させたものを β シリーズとする。緩衝材として、

表-2 直接衝突実験における衝突条件

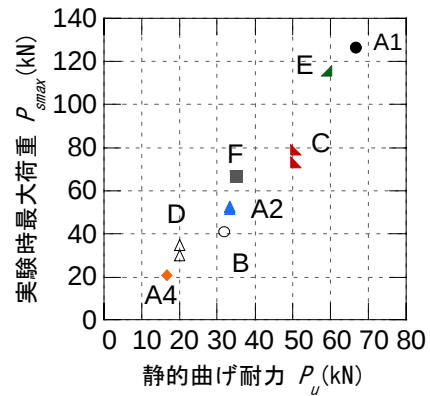
シリーズ	Type	重錘質量 $m(\text{kg})$	衝突速度 $V_{col}(\text{m/s})$	衝突時の運動量 $M_{col}(\text{N} \cdot \text{s})$	衝突時の運動エネルギー $E_{col}(\text{J})$	試験体数
α	A2	150	3.5	520	900	1
		300	2.4	735		1
		450	2.0	900		1
		150	4.9	735	1800	1
		300	3.5	1039		1
		450	2.8	1273		1
		150	6.0	900	2700	1
		300	4.2	1273		1
		450	3.5	1559		1
		300	1	300	150	1
			2	600	600	2
			3	900	1350	2
			4	1200	2400	2
α, β		300	5	1500	3750	3
β	A1					4
	A4					3
	B					2
	C					2
	D					2
	E					2
	F					2

表-3 砂緩衝材を用いた衝突実験における衝突条件

Type	重錘質量 $m(\text{kg})$	衝突速度 $V_{col}(\text{m/s})$	衝突時の運動量 $M_{col}(\text{N} \cdot \text{s})$	衝突時の運動エネルギー $E_{col}(\text{J})$	試験体数
A2	300	2	600	600	2
		3	900	1350	2
		4	1200	2400	2
		5	1500	3750	2
A1	300	5	1500	3750	2
A4	300	5	1500	3750	2
A2	450	4	1800	3600	2
A2	450	4.9	2205	5402	2
C	450	4.9	2205	5402	2
D	450	4.9	2205	5402	2
A2	300	6	1800	5400	3
A1					3
A4					3
B					2
C					2
D					2
E					2
F					2



(a) 荷重-変位関係



(b) 静的曲げ耐力と実験時最大荷重

図-4 静的実験結果

幅、奥行き、高さが $300 \times 400 \times 300\text{mm}$ で厚さが 5mm の底板を溝形鋼 $75 \times 40\text{mm}$ を用いてその周囲と中央部2方向に配置し補強した鋼製の箱に質量 200kg の落石径と同程度の厚さ 240mm になるよう砂を敷いた²⁰⁾。用いた砂は珪砂7号(太平洋セメント(株))である。砂は 2cm 毎に鋼棒で突き固め密実になるように敷き詰めた。図-3にその粒径加積曲線を示す。表-3に衝突条件を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 静的実験結果

図-4(a)に静的載荷実験での荷重-変位関係を示す。実験本数はtype A2で3体、type A1, A4, C, Dが2体、type B, E, Fは1体であるが、複数行った供試体に関しては、実験値最大荷重が最も大きいデータを示している。静的載荷実験では、変位量がスパン長の2%に達するまで実験を行っている。終局限界状態での最大変位あるいは残留変位をどのような値にするか明確な規定は無いが今までに行われた研究²⁰⁾を参考にRCはりで十分塑性変形が認められる2%を採用した。図-4(b)では、静的載荷実験で得られた荷重-変位関係において変位量がスパン長の2%に達するまでの荷重の最大値 P_{smax} と静的曲げ耐力 P_u を比較したものである。いずれの試験体も実験時の荷重の最大値 P_{smax} は静的曲げ耐力 P_u より大きな値であった。設計曲げ耐力は安全側に配慮されているため、実際の曲げ耐力は一般に設計値より大きい。しかも本研究では、あえて図-1に示したように各種断面を設定したため、特にならずんぐりとしたはりでこの傾向が大きく表れたと考えられる。

Type A2, BそしてFについては、前述したように静的曲げ耐力 P_u はほぼ同程度であるが、曲げ剛性 EF などの断面諸量が異なるため、鉄筋が塑性域に達するまでの荷重-変位関係においても大きな相違が認められる。作用荷重とスパン中央の変位により描かれる荷重-変位曲線を

積分して求められるエネルギーを本研究では、伝達エネルギーと呼ぶこととする。Type A2, BそしてFの変位がスパン長の2%に達するまでの伝達エネルギーはType A2の試験体では 1896 J であった。Type Bは 1425 J でType A2より25%小さく、Type Fは 2360 J でType A2より25%大きい値であった。同じ変位を発生させるのに必要な伝達エネルギー量が曲げ剛性 EI が小さい順に小さい値となっている。

図-5は、静的曲げ耐力とスパンの2%の変位までの伝達エネルギーの関係を示したものである。後述する衝撃実験における伝達エネルギーが本研究では重要であるため、ここではその比較として示した。なおType A2を基準とし耐力、エネルギー共に無次元化している。Type A1とA4を除くスパン長が 2m である試験体の伝達エネルギーは、静的曲げ耐力が大きいほど大きいことがわかる。最もずんぐりとしたA1では相関が少しよくないが、断面が同じで、スパン長が異なるType A1, A2そしてA4での伝達エネルギーは、静的曲げ耐力が大きいほどすなわちスパン長が短いほど大きいことがわかる。

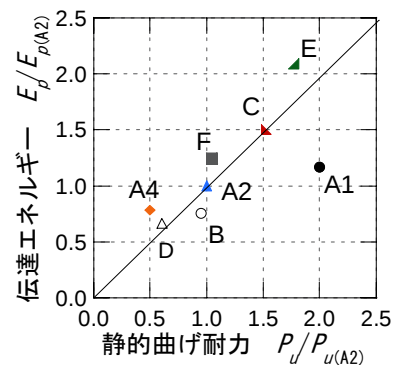


図-5 静的曲げ耐力と2%変位量までの伝達エネルギー

3.2 荷重波形および荷重-変位波形

図-6は試験体Type A2に対し、質量 300kg の重錘が衝

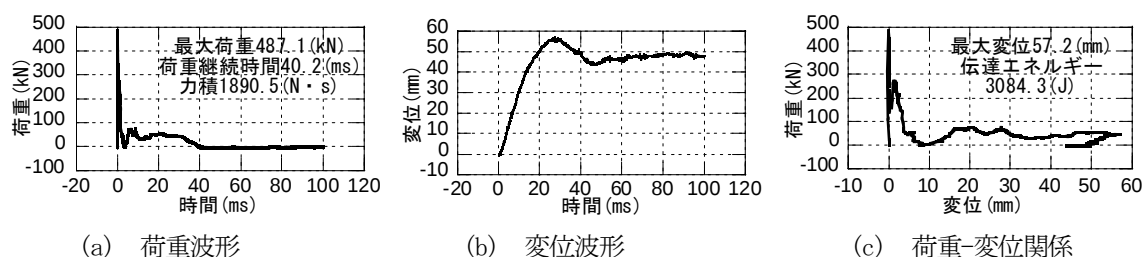


図-6 Type A2 の直接衝突の実験結果 (重錘質量 300kg 衝突速度 5m/s)

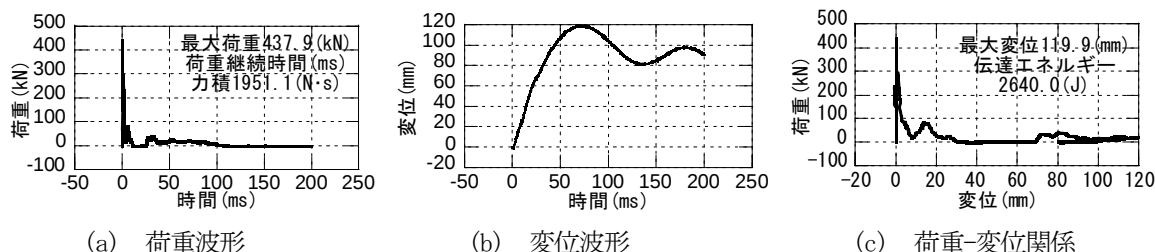


図-7 Type A4 の直接衝突の実験結果 (重錘質量 300kg 衝突速度 5m/s)

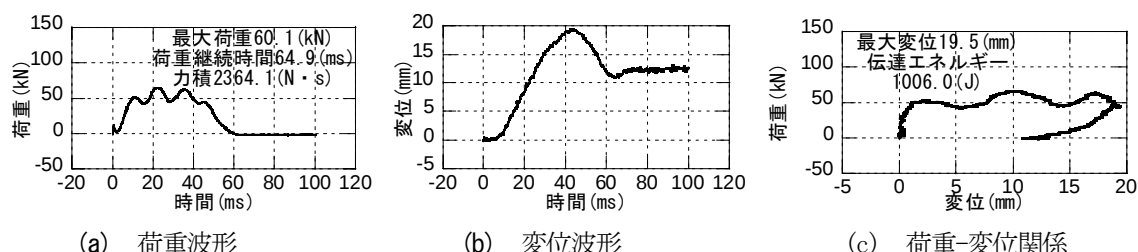


図-8 Type A2 の砂層上衝突実験結果 (重錘質量 300kg 衝突速度 6m/s 砂厚 24cm)

突速度5m/sで衝突した場合の実験結果を示したものである。(a)は衝撃荷重波形を、(b)はスパン中央の変位波形、そして(c)は荷重-変位波形を示したものである。

また、図-7は試験体Type A4に質量300kgの重錘を衝突速度5m/sで衝突した場合の実験結果を示したものである。(a)は衝撃荷重波形を、(b)はスパン中央の変位波形、そして、(c)は荷重-変位波形を示したものである。Type A2とA4のいずれの実験においても衝撃荷重は瞬時に立ち上がるが、すぐ減少している。この減少の後再度立ち上がり、数回のピークを示した後緩やかに減少している。荷重-変位波形においては、いずれも最初の変位に伴わない大きな荷重発生後、荷重が増減を伴いながら変位が単調増加する領域が認められる。また、一部荷重が消失している間も変位の増加が見られる。衝突後の重錘が載った状態でのType A2のの残留変位は最大変位の83%程度、Type A4の残留変位は最大変位の76%程度であった。

図-8は試験体Type A2に対して、実験方法で記述したように衝撃緩衝用の砂を24cm敷き詰めた砂箱に質量300kgの重錘を衝突速度6m/sで落下させた場合の実験結果である。(a)は衝撃荷重波形を(b)はスパン中央の変位波形、そして、(c)は荷重-変位波形を示したものである。衝撃力は緩やかに立ち上がり、10ms程度で最初のピークに達し緩やかな増減を示した後、60ms程度でゼロとなる比較的単調な波形である。この場合、図-6に示した直接衝突の場合と比較して、衝突速度が6m/sと1m/sだけ

大きいため、衝突エネルギーも44%大きい、荷重の最大値は1/8と小さくなっており、砂の衝撃緩衝効果が確認できる。変位は衝突後10ms程度から生じ始め緩やかに増加し45ms程度で最大値に達している。やはり、直接衝突の場合に比べ、スパン中央の最大変位で20mmと1/3程度の小さな値である。荷重-変位関係も直接衝突の場合と異なり、台形状の比較的単調な関係である。図-6に示した直接衝突の場合に比べ、伝達エネルギーは、1/3程度と小さく、衝突時の運動エネルギーの3割程度であることがわかる。このように、砂緩衝材のため、衝撃荷重の大きさの増減のみならず、試験体へ伝達されるエネルギー量の低下も認められた。他のケースでも同様な傾向が認められた。衝撃時の慣性力に関与するはりの耐力有効質量が結果として伝達エネルギーに影響を与えることが推測されるが、詳細については現時点では不明であることを付記する。

3.3 衝撃荷重の特性値

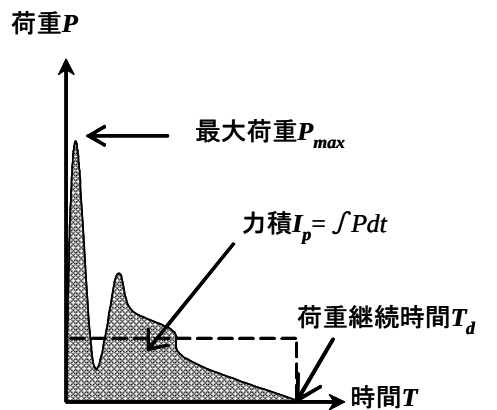
図-9は衝撃を受けた鉄筋コンクリートはりの荷重波形と荷重-変位関係を模式的に示したものである。図中に、衝撃荷重や荷重-変位関係より得られる特性値を示してある。力積 I_p は荷重-時間曲線を積分したもの、エネルギー量 E_p は前述したように荷重-変位関係を積分したもので衝撃力のなす仕事量であり、はりの変形に費やされたエネルギーと考えることができる。以後、本論文では伝

達エネルギーと呼ぶこととする．平均衝撃荷重 P_m は力積 I_p を荷重継続時間 T_d で除したものである．

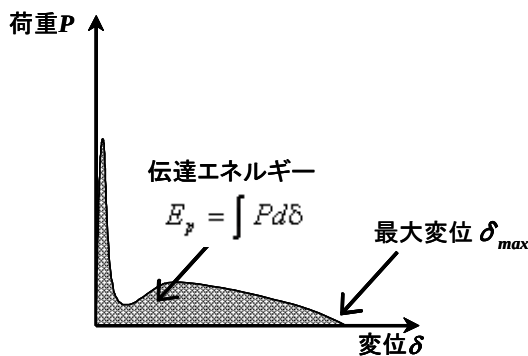
構造の挙動や設計を考える上で，一般に，作用荷重の最大値が最も重要である．しかし，衝撃問題では，荷重の最大値のみならず，ここで示した特性値は構造物の挙動に与える影響を表す重要な指標であると考えられる．著者らの過去の研究においてもその重要性が確認されている^{9,10}．本研究においてもこれらの特性値についてまとめ，各種検討を行った．

3.4 力積

直接衝突の場合の衝撃荷重の最大値は，衝突物の衝突速度 V_{col} に比例することが，著者らの過去の研究により明らかになっており¹⁰，本研究でもその傾向は確認されている．ここでは，一般に構造物の動的挙動を支配する重要な影響因子の一つである衝撃荷重による力積について検討する．



(a) 荷重波形

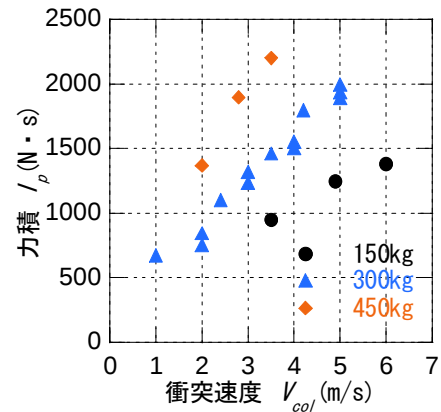


(b) 荷重-変位関係

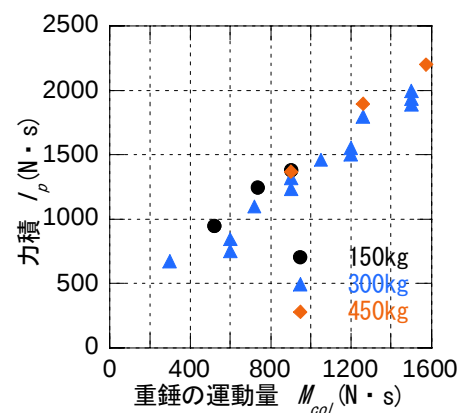
V_{col} : 衝突速度 M_{col} : 重錘の運動量 E_{col} : 衝突エネルギー

図-9 衝撃荷重特性値

図-10は， α シリーズについて衝突速度 V_{col} と衝撃荷重による力積 I_p の関係および衝突時の重錘の運動量 M_{col} と力積 I_p の関係を重錘質量別に示したものである．図-10(a)より衝突速度が増加するほど力積が線形的に増加していることがわかる．ただし，重錘質量により勾配は異なり，質量が大きいほど勾配は大きい．図-10(b)よ



(a) 衝突速度と力積



(b) 重錘の運動量と力積

図-10 α シリーズにおける力積

り，いずれの重錘質量においても力積 I_p は運動量 M_{col} の増加に伴い単調に増加しており，両者に比例関係があることがわかる．

断面やスパン長の違いによる静的曲げ耐力の違いが力積に与える影響を調べ整理するために，衝突時の運動量がすべて $1500\text{kN}\cdot\text{ms}$ と一定である β シリーズについて検討した．図-11は，この β シリーズの静的曲げ耐力 P_u と力積 I_p との関係を試験体別に示したものである．力積はいずれも $1500\text{kN}\cdot\text{ms}$ から $2000\text{kN}\cdot\text{ms}$ 程度の値であり，試験体および静的曲げ耐力の違いによる有意な差は認められなかった．ただし，多少認められる力積 I_p のばらつきには，曲げ挙動時のはり剛性や有効質量がある程度影響していると推測される．

以上により，衝撃による力積は重錘の運動量と比例関係にあることがわかる．両者に線形関係を仮定した場合，力積は重錘の運動量を用いて次式のように表される．図-12に実験結果と共に示す．

$$I_p = 1.31 M_{col} \quad (1)$$

3.5 荷重継続時間

荷重の継続時間 T_d は構造物の応答に与える影響を考
える上で重要である。たとえ大きな衝撃荷重であっても、
荷重継続時間 T_d が短ければ、一般に構造物全体に与える

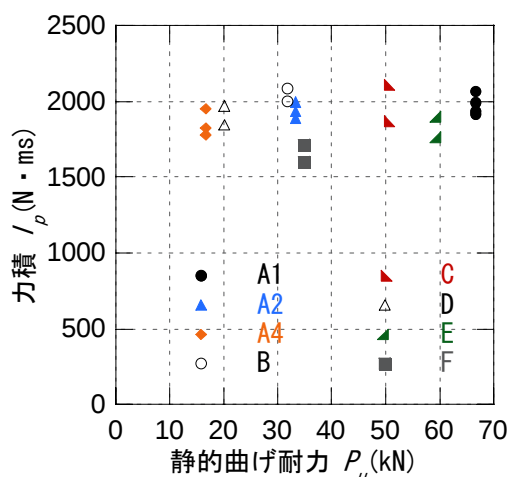


図-11 β シリーズにおける力積

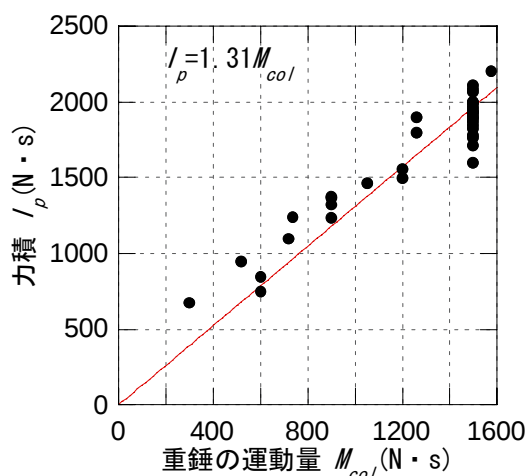


図-12 重錘の運動量と力積

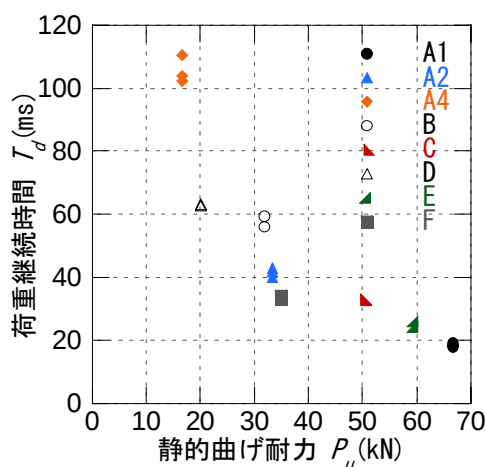


図-13 β シリーズにおける荷重継続時間

影響は静的な荷重に比べ非常に小さい。しかし、大きな
衝撃荷重であれば、全体挙動に与える影響は小さいが、
破壊を含む局所的な応答には少なからず影響を与える
可能性がある。逆に、それほど大きな衝撃荷重でなくて
も荷重継続時間 T_d が長い場合には、構造全体に大きく影
響を及ぼす場合もあると考えられる。

図-13は重錘の運動量 M_{col} と運動エネルギー E_{col} が同
じである β シリーズでの静的曲げ耐力 P_u と荷重継続時間 T_d
の関係を試験体別に示したものである。荷重継続時間 T_d
は静的曲げ耐力 P_u が増加するほど減少している傾向にあり、
その関係はほぼ逆比例関係にあるといえる。重錘の
運動エネルギーが同じである場合、静的曲げ耐力 P_u が大
きい程、荷重継続時間 P_u が短い傾向にあり結果として衝
撃が試験体に与える影響が相対的に小さくなることが
推察される。以上の考察より、荷重継続時間 T_d が重錘の
運動量 M_{col} に比例し静的曲げ耐力 P_u に反比例すると仮定
すると、次式のように表される。

$$T_d = 1.06 \frac{M_{col}}{P_u} \quad (2)$$

図-14は実験結果での重錘の運動量と静的曲げ耐
力 M_{col}/P_u と荷重継続時間 T_d の関係を示したものであ
る。上式より、両者の関係がよく表現されているこ
とがわかる。

3.6 最大変位

衝撃を受ける構造物あるいは部材において、荷重を
受けた場合の具体的な変位量は、構造物の性能評価をす
る上での重要な一つの指標である。図-15は α シリーズ
における RC はりスパン中央の最大変位 δ_{max} と衝突エネ
ルギー E_{col} の関係を重錘質量別に示したものである。こ
れより衝突エネルギーが増加するほど、最大変位 δ_{max}
が増加しており、その関係はほぼ比例関係にあることがわ
かる。なお、これは著者らの解析的研究⁴⁾により、明ら
かにされた傾向と一致している。

図-16は最大変位 δ_{max} と平均衝撃荷重 P_m の関係を衝
突エネルギー別に示したものである。なお、平均衝撃荷
重 P_m は前述したように、力積 I_m と荷重継続時間 T_d を用
いて次式で表される。

$$P_m = \frac{I_p}{T_d} \quad (3)$$

衝突エネルギー $E_{col}=3750\text{J}$ の場合では、平均衝撃荷重
 P_m の増加に伴い最大変位 δ_{max} が減少しており、その関係
はほぼ逆比例の関係にあることがわかる。この場合、平
均衝撃荷重 P_m は、

$$P_m = \alpha \frac{1}{\delta_{max}} \quad (4)$$

と表され、図中にその近似曲線も示した。なお、著者ら

の研究⁹⁾において、衝突点にゴムや砂緩衝材がある場合についても同様な傾向が認められている。一方他の衝突エネルギーの場合、実験結果は少ないが逆比例の関係があると仮定し、図中に衝突エネルギー $E_{col}=1800\text{J}$ での近似曲線を示すと比例定数 α は衝突エネルギー E_{col} が小さくなるほど小さくなっている。ここで、

$$\alpha = \beta_0 E_{col} \quad (5)$$

と置くと平均衝撃荷重 P_m は

$$P_m = \beta_0 \frac{E_{col}}{\delta_{max}} \quad (6)$$

で表される。これにより、最大変位 δ_{max} は

$$\delta_{max} = \beta_0 \frac{E_{col}}{P_m} \quad (7)$$

と表される。

図-17は、衝突エネルギー E_{col} と平均衝撃荷重 P_m の比 E_{col}/P_m と最大変位 δ_{max} との関係を試験体別に示したものである。Type A4 でやや変位が小さいものの両者の間には非常に明確な比例関係が確認できる。

図-18は、図-6と図-7で示したType A4とA2に対して質量300kgの重錘が衝突速度5m/sで衝突させた場合の荷重波形を40msまで示したものである。Type A4、

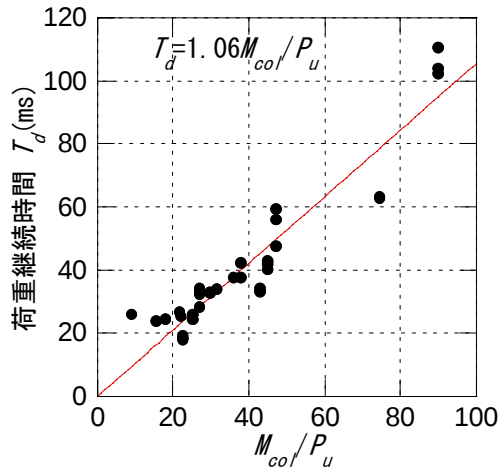


図-14 重錘の運動量と荷重継続時間

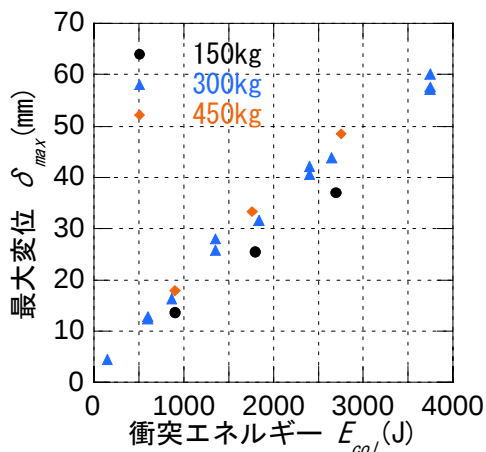


図-15 α シリーズにおける最大変位

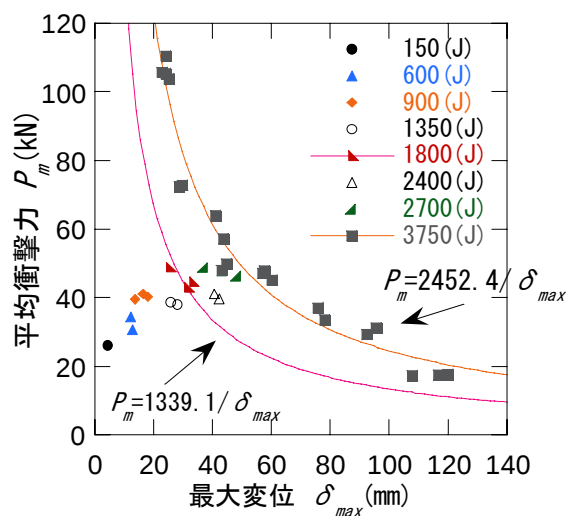


図-16 最大変位と平均衝撃荷重

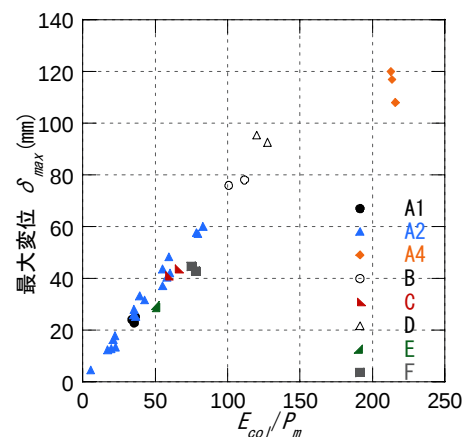


図-17 重錘の運動量と最大変位

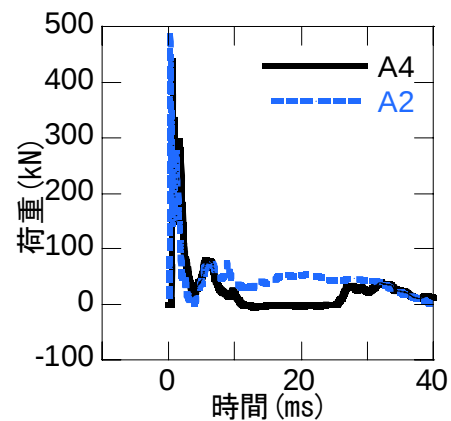


図-18 Type A2 と A4 における荷重波形

A2 両者とも荷重が立ち上った後 10ms 程度までは類似した波形を示しているが、10ms～25ms の間は A2 では荷重が作用しているのに対し、A4 では荷重が零となっている。すなわち、この間は重錘のリバウンドのために、A4 試験体と重錘は接触していないことがわかる。表-1 に示したように試験体 A4 の弾性固有周期 T_0 は他のはりに比べて大きく 40ms 程度であり、最初の接触時間 $T_c=10\text{ms}$ との比 T_c/T_0 が 0.25 と小さく、衝撃力がはりに与える影響が小さくなり、結果として動倍率としてのたわみがやや小さくなったと考えられる。A4 を除いた場合、式 (7) の定数 β_0 として $\beta_0=0.710$ が得られる。最小二乗法で近似式を仮定している。

3.7 平均衝撃荷重

平均衝撃荷重 P_m とは、図-9 に示したように衝撃応答において重要なパラメータである力積を荷重継続時間で除した値である。3.4 で検討したように力積は、本研究の範囲では重錘の運動量に依存している。一方、荷重継続時間は、3.5 で示したように重錘の運動量によって変化し、また試験体によっても異なる値を示す。図-19 に Type A4 以外での平均衝撃荷重 P_m と静的曲げ耐力 P_u の関係を示したものである。これより、ばらつきはある程度あるものの平均衝撃荷重は静的曲げ耐力にほぼ比例することがわかる。両者の関係を最小二乗法で近似すると、

$$P_m = 1.36 P_u \quad (8)$$

が得られる。また、ばらつきとして 2 倍の標準偏差を考慮すると、

$$P_m = 0.964 P_u \quad (9)$$

となる。図-19 に示すように、上式は平均衝撃荷重 P_m の下限値を与えている。

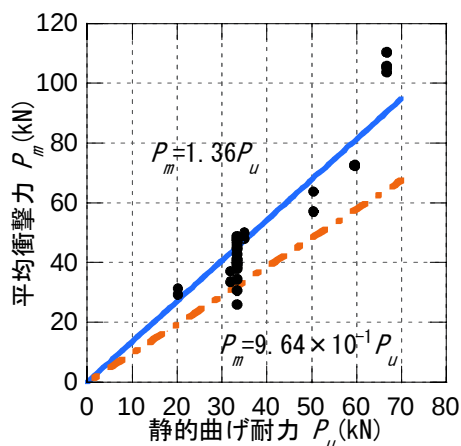


図-19 静的曲げ耐力と平均衝撃荷重

4. 衝撃を受けるRCはりの性能評価

4.1 直接衝突に対するRCはりの変位の推定

衝撃を受ける構造物では、たとえ損傷が生じる場合でも、安全上必要な最小限の空間確保が重要な要求事項の一つである。衝撃作用を受けた場合の構造物の変形の推定が設計上重要と考えられる。ここでは、直接衝突に対する曲げ破壊に関する鉄筋コンクリートはりの性能照査型の性能評価のひとつの方法として、はりの残留変位に比べ安全側の指標である最大変位の推定について検討する。最大変位を推定することで構造物に要求される空間確保について照査することができる。

式(6)と式(7)より衝撃を受ける鉄筋コンクリートはりの最大変位の推定式は最小二乗法で近似すると

$$\delta_{\max} = 0.522 \frac{E_{col}}{P_u} \quad (10)$$

で与えられる。ばらつきとして 2 倍の標準偏差を考慮すると、

$$\delta_{\max} = 0.737 \frac{E_{col}}{P_u} \quad (11)$$

で与えられる。図-20 はこれらの推定式と実験値を示したものである。最大変位の推定値に比べ、Type B ではやや大きく、Type F ではやや小さくなっている。これは、表-1 や図-4 (a) で示したように、静的曲げ耐力 P_u が Type A2, E そして F の 3 者ではほぼ同じであるが、曲げ剛性 EI は B で小さく F で大きいため、はりに伝わる伝達エネルギーに影響を与え、結果として最大変位にこの程度の相違が表れたと考えられる。しかし、式(10)は概ね良好に最大変位を推定しており、式(11)では最大変位の上限を評価できることがわかる。

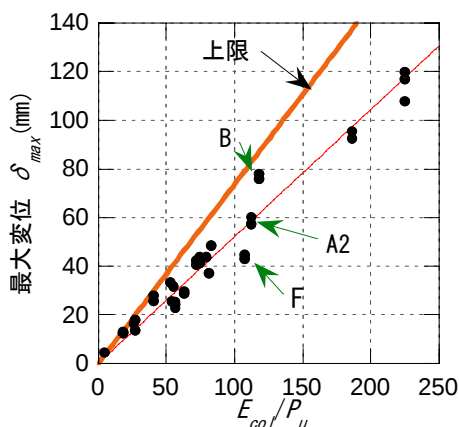


図-20 最大変位の推定（直接衝突）

4.2 砂緩衝材がある場合のRCはりの変位の推定

ここでは、衝突点に砂緩衝材がある場合についての衝撃を受けた場合のはりの最大変位の推定について示す。

図-21は E_{col}/P_u と最大変位の関係を試験体別に示したものである。 E_{col}/P_u が100程度までは最大変位はすべてが5mm以下で一定であり、100を超えたあたりから増加し始めている。 E_{col}/P_u が100より小さい範囲では、衝突エネルギーがほとんど砂に吸収され、はりに作用する荷重も小さく弾性状態であることがわかる。 E_{col}/P_u が100より大きい範囲において、 E_{col}/P_u の増加に伴い作用荷重が大きくなり弾性限界を超える荷重がRCはりに作用する。これにより塑性変位が生じ最大変位が増加していると考えられる。

以上のことにより、 E_{col}/P_u が100の時の変位を0とし、 $E_{col}/P_u > 100$ での最大変位を最小二乗法で直接近似すると次式が示される。

$$\delta_{max} = 0.387 \frac{E_{col}}{P_u} - 38.7 \quad (12)$$

図-22に実験結果と近似式を合わせて示した。比例定数0.387は直接衝突の時の比例定数0.522より74%程度と小さい値であった。直接衝突では、すべてはりにエネルギーが伝達されるに対し、砂がある場合での、 E_{col}/P_u が100より小さい範囲では、ほとんど砂に吸収されるといった緩衝材としての特性が明確に確認できる。また、塑性変形が生じる E_{col}/P_u が100より大きな領域においても比例定数が小さいことにより、塑性変形が生じる領域においても直接衝突に比べ同じエネルギー増加に対する変位増加量が小さく、砂の緩衝効果が発揮されていることが確認できる。

実際に衝撃を受ける防護構造に対して本論文で示したような変形の推定は、性能設計を行う上で重要な情報の一つと考えられる。今後、衝撃に対する各種緩衝構造の衝撃吸収能力が明示されれば性能設計を行う上極め

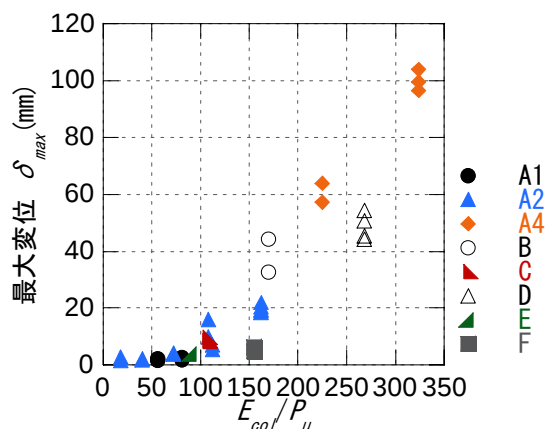


図-21 砂緩衝材がある場合の最大変位

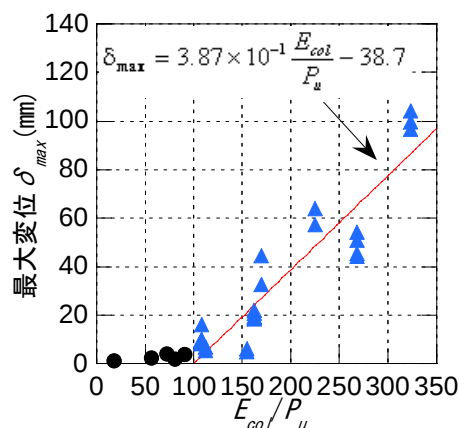


図-22 最大変位の推定式（砂緩衝材）

て有用と考えられ、各種部材、構造に対する研究をさらに進めていきたいと考えている。

5. 結論

本論文は、性能照査型耐衝撃設計法の確立を目的として曲げ破壊型の鉄筋コンクリートはりに対して行った衝撃実験結果について荷重特性、挙動特性などについて各種検討を行った。実験では、鉄筋径、断面寸法やスパン長を変化させ静的曲げ耐力は16.7～66.7kNの範囲であり、重錘質量や衝突速度の組み合わせにより衝突エネルギーは150～5400Jの範囲で行った。また、重錘の衝突点に砂緩衝材を設置した衝突実験結果についても検討している。本研究の遂行により得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 試験体である鉄筋コンクリートはりの断面とスパン長が異なり、衝突条件の重錘の質量そして衝突速度も異なる α シリーズにおいて、衝撃による力積 I_p は重錘の運動量 M_{col} と比例関係にあること、また、荷重作用時間 T_d は重錘の運動量 M_{col} を静的曲げ耐力 P_u で除した M_{col}/P_u と比例関係にあることを明らかにした。
- 2) 衝撃による力積 I_p を荷重作用時間 T_d で除した平均衝撃荷重 P_m が衝撃挙動を考える上で重要であり、有用であると示すとともに、はりの最大変位 δ_{max} と平均衝撃荷重 P_m が衝突エネルギーごとに逆比例関係にあることを明らかにした。
- 3) 衝突エネルギー M_{col} を平均衝撃荷重 P_m で除した値である M_{col}/P_m は最大変位と比例関係にあることを明らかにした。また、静的曲げ耐力 P_u と平均衝撃荷重 P_m の関係がほぼ比例関係にあることを示した。
- 4) 直接衝突を受ける鉄筋コンクリートはりの衝突エネルギーを静的曲げ耐力で除した値である M_{col}/P_u と最大変位 δ_{max} が比例関係にあることを明らかにし、衝

撃を受ける構造部材の性能照査型設計を行う際に有用である最大変位 δ_{max} の推定式を示した。

- 5) 緩衝材として砂を使用したはりの M_{col}/P_u と最大変位 δ_{max} の関係を示し推定式を示した。加えて直接衝突の場合との比較により緩衝材のエネルギー吸収能力について明らかにした。

衝撃を受ける防護構造に対して構造物の挙動を合理的に評価することは性能設計を行う上で重要な事項の一つと考えられる。今後、衝撃に対する各種緩衝構造の具体的な衝撃吸収能力が明示されれば性能設計を行う上で極めて有用と考えられ、早急な解明が望まれる。各種部材や構造物の衝撃挙動に関する特性の解明とともに研究を進めていきたいと考えている

参考文献

- 1) 石川敏充, 畑賢朗, 廣田直之, 嵯峨山航, 本手博頭, 若林修: 八世乃洞門復旧工事の概要, 防災土木, 北陸PC防雪技術協会, Vol.15, pp.4-15, 2008.
- 2) 藤井学, 宮本文穂, 森川英典: 衝撃を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.51-68, 1985.
- 3) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.125-134, 2001.
- 4) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の動的応答解析, 構造工学論文集, 建築学会, Vol.33B, pp.189-199, 1986.
- 5) 松尾修, 佐々木哲也, 堤達也: 落石防護工の被害に関する実態調査, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.69-74, 2000.
- 6) 吉田博, 榎谷浩, 岡衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集, No.362, pp.461-470, 1985.
- 7) 衝撃問題研究小委員会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ6, 1994.
- 8) 佐藤弘史, 間瀬利明, 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆, 若林修: 漸増繰り返し衝突荷重を受ける逆L型PRC製ロックセツト® 模型の終局限界挙動, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.73-85, 2001.
- 9) 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.
- 10) 山本満明, 榎谷浩, 中村佳彦: RCはりの衝撃挙動特性に関するDEMによるパラメトリック解析, 構造工学論文集Vol.51A, pp.1635-1644, 2005.
- 11) 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 土木学会, 構造工学シリーズ15, pp.63-77, 2004.
- 12) 日本道路協会: 落石対策便覧, 日本道路協会, 2000.
- 13) 松尾修: 落石対策 1. 講座を始めるにあたって, 土と基礎, Vol.50, No.1, pp. 39-40, 2002.
- 14) 園田恵一郎: 落石覆工の設計法についての一提案, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1563-1572, 1993.
- 15) 園田佳巨, 石川信隆, 園田恵一郎, 太田俊昭: PC 落石覆工の耐荷力評価と安全性照査法に関する研究, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.83-92, 1994.
- 16) 榎谷浩, 中田吉彦: DEM と FEM の結合解析手法の開発と落石覆工解析への適用について, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.113-128, 2002.
- 17) SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.
- 18) 土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会: 性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語, PLATFORM ver.1, 2001.3.
- 19) 土木構造物荷重指針連合小委員会: 性能設計における土木構造物に対する作用の指針, 構造工学シリーズ18, 2008.
- 20) 橘紗代子, 中村佐智夫, 榎谷浩: 各種緩衝材を設置したRCはりの衝撃応答と性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1189-1199, 2006.
- 21) 榎谷浩: 衝撃を受ける構造物の性能照査型包括設計コードについて. 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, pp.273-282, 2006.
- 22) 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会: 性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法, 土木学会, 2007.
- 23) コンクリート標準示方書改訂小委員会: コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2008.

(2008年9月18日受付)