

# 衝突作用を受ける RC はりのエネルギー吸収に基づく応答変位の推定

Estimation of response displacement based on energy absorption of RC beam subjected to impact action

栗橋祐介\*, 榎谷浩\*\*

Yusuke Kurihashi, Hiroshi Masuya

\* 博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*工博, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*Key Words: RC beam, impact action, energy absorption, response displacement*

キーワード: RC はり, 衝突作用, エネルギー吸収, 応答変位

## 1. はじめに

地球温暖化に伴う気象変動により全国各地で集中豪雨が発生し, 大規模な斜面災害が頻発するなど, 近年の自然災害は激甚化の一途を辿っている<sup>1)</sup>. 日本海側の沿岸部や山間部には, 斜面災害のうち落石に対する道路防災対策工として, ロックシェッドなどの防災構造物が多数供用されている.

これらの構造物の設計法は, 仕様規定型の許容応力度法から性能設計法に移行している<sup>2)</sup>. 鉄筋コンクリート製(RC)ロックシェッドの耐衝撃性の評価指標の1つとしては, 頂版のたわみ量が適切であるものと考えられ, この指標により各限界性能を設定できるものと考えられる. しかしながら, 単純な構造であるRC梁においても衝突作用時のたわみ量の算定法が確立されていないのが現状である. そのため, 国内外の各研究機関において, 衝突作用を受けるRCはりの応答変位の推定法の確立に向けた検討が行われている<sup>3)4)</sup>.

岸らは, 曲げ破壊型RCはりの重錘落下衝撃実験の結果を対象に, RCはりの応答変位推定法を提案している<sup>3)</sup>. これは, 重錘落下による入力エネルギーとRCはりの最大応答変位や残留変位が線形関係にあることに着目して提案したものである. この推定法は, 構造工学シリーズ22「防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計: 基準体系の指針」<sup>4)</sup>にもとりまとめられている. また, 橋らもこの種の実験研究を行い, RCはりの最大応答変位を提案するとともに, 緩衝材を設置した場合の検討も行っている<sup>5)</sup>. さらに, 藤掛らは, コンクリートと鉄筋のひずみ速度効果を考慮したRCはりの荷重-変位関係を算定し, 重錘衝突時の運動量保存則やエネルギー保存則に基づいた最大応答変位の推定を試み, 他機関の実験結果も安全側に評価で

きることを明らかにしている<sup>6)</sup>.

ただし, これらの実験研究は, いずれも純スパン1.5~3.0m程度のRCはりを対象としているため, 各応答変位推定法の防災構造物への適用性の明確化には至っていない. なお, 岸らは純スパン9.0m程度の大型RCはりを対象に応答変位推定法を提案している<sup>7)</sup>. この推定法では, 重錘とRCはりの質量比に基づく応答変位補正式を近似式として導入することを試みている.

また, 近年では, Hwangらが重錘落下による入力エネルギー, 衝突時のエネルギー損失, RCはりのたわみによる位置エネルギー変化, 梁の曲げ変形によるエネルギー吸収, およびはり上縁コンクリートの剥離によるエネルギー消失を考慮した, エネルギー保存則に基づく応答変位推定法を提案している<sup>8)</sup>. また, 実規模RCはりを含めた, 既往の実験研究によるRCはりの応答変位を概ね推定可能であることを示している.

しかしながら, 実務において既設防災構造物の維持管理や耐衝撃性評価を行う場合には, 上記の推定法はいずれも煩雑であり, また境界条件や構造形式が異なる場合には, その適用法や妥当性についての再検討が必要になる. 適用範囲が広く簡易な推定方法が構築されると, 各種構造物への適用性検討や性能設計におけるリスク評価を円滑に推進できるようになるものと考えられる.

このような背景より, 本研究では, 既往の研究成果に基づいて, 従来よりも適用範囲が広くかつ簡易なRCはりの応答変位推定法の提案を試みた. すなわち, 衝突作用を受けるRCはりの応答変位の主たる要因と考えられる, 入力エネルギー, 衝突時のエネルギー損失, および梁の曲げ変形によるエネルギー吸収を考慮した応答変位推定法を提案し, 過去の実験結果を対象にその妥当性を検証した. また, 提案の応答変位推定法による既設防災構造物のリスク評価の考え方を示した.

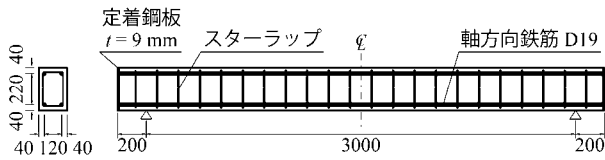


図-1 RC はりの一例 (G5 はり)<sup>4)</sup>

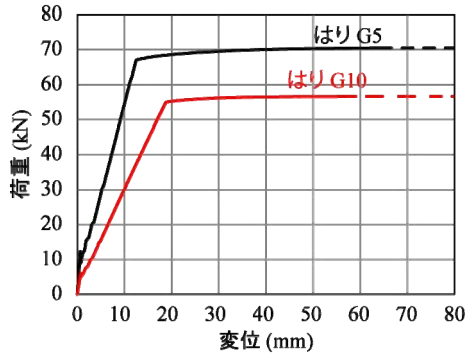


図-2 荷重-変位曲線の一つ例

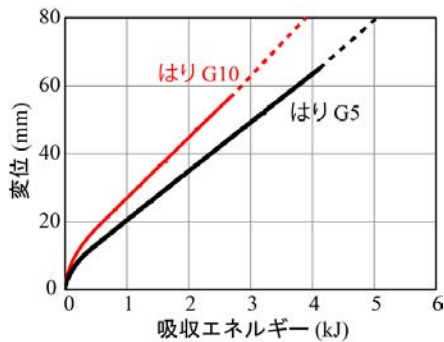


図-3 変位-吸収エネルギー関係の一つ例

## 2. RC はりの応答変位の推定法

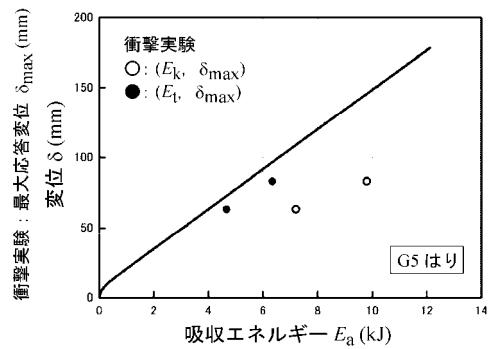
ここでは、提案の応答変位推定法の概要を示すとともに、既往の実験結果を用いてその妥当性を検証する。

### 2.1 検討対象

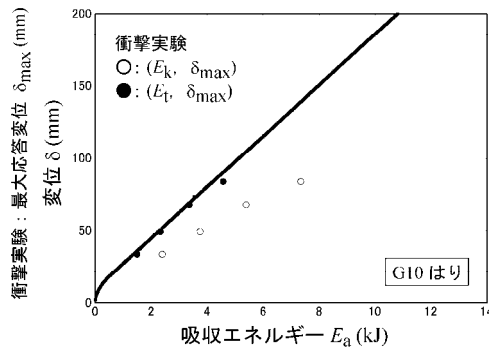
提案の応答変位推定法の妥当性検討は、文献<sup>4)</sup>の実験結果を用いて実施した。実験は、鋼製重錘を所定の落下高さから RC はり中央部に一度だけ落下させることにより行われた全 36 ケースである。RC はりは、浮き上がり防止治具付きの支点上に設置されており、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっている。これらのはりは、全て複鉄筋矩形 RC 梁であり、終局の定義を残留変位が純スパン長の 2% に至った時点としている。試験体の断面幅は 150~250 mm、断面高さは 200~400 mm、スパン長は 2~3 m、主鉄筋比は 0.8~3.17%、重錘質量は 300~500 kg、衝突速度は 4~7.67 m/s である。図-1 には、RC はりの概要図<sup>4)</sup>を示している。

### 2.2 荷重-変位曲線の算定方法

RC はりの荷重 ( $P$ )-変位 ( $\delta$ ) 曲線は、土木学会コン



衝撃実験：入力エネルギー  $E_k$ 、伝達エネルギー  $E_t$  (kJ)



衝撃実験：入力エネルギー  $E_k$ 、伝達エネルギー  $E_t$  (kJ)

図-4 変位-吸収エネルギー関係と最大応答変位

クリート標準示方書 設計編<sup>9)</sup>に準拠し、コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を用いて、断面分割法により算定した。鉄筋とコンクリートについては完全付着を仮定している。なお、梁上縁のコンクリートひずみが終局圧縮ひずみ  $3,500 \mu$  に到達後には、耐荷力を保持した状態で変形が増大するものと仮定している。図-2 には、得られた  $P-\delta$  曲線の一つ例を示している。

### 2.3 変位-吸収エネルギー関係と実測最大応答変位

はりの変位 ( $\delta$ )-吸収エネルギー ( $E_a$ ) 関係は、上述の  $P-\delta$  曲線を用いて求めた。すなわち、 $P-\delta$  曲線において任意の変位量  $\delta$  まで積分して吸収エネルギー  $E_{ai}$  を求め、その吸収エネルギー  $E_{ai}$  と変位量  $\delta$  との関係を探求している。図-3 には、得られた  $\delta-E_a$  関係の一つ例を示している。

図-4 には、前節で求めた G5 および G10 はりに関する  $\delta-E_a$  関係に衝撃载荷実験による最大応答変位をプロットして示している。実験結果については、実測最大応答変位が入力エネルギー  $E_k$  に対応するとしてプロットした場合を白塗り印で示し、伝達エネルギー  $E_t$  に対応するとしてプロットした場合を黒塗り印で示した。

なお、伝達エネルギー  $E_t$  は、重錘と RC はりの完全非弾性衝突を仮定して、文献 6), 8) と同様に下式により求めた。

$$E_t = m_2 / (m_1 + m_2) \cdot E_k \quad (1)$$

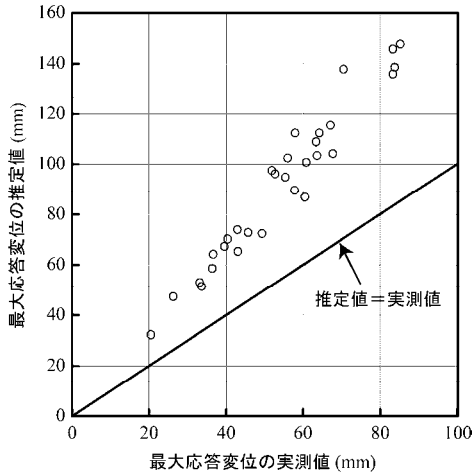


図-5  $E_k$  に対応する変位を推定値とした場合

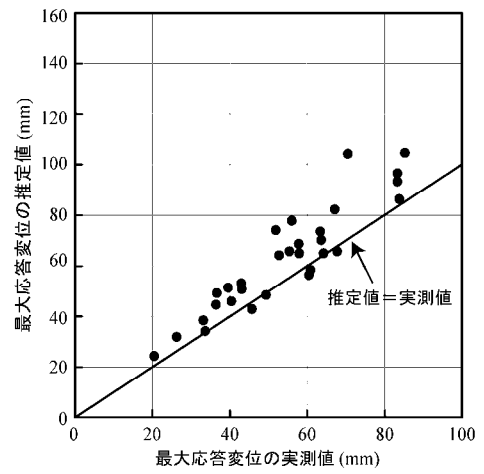


図-6  $E_t$  に対応する変位を推定値とした場合

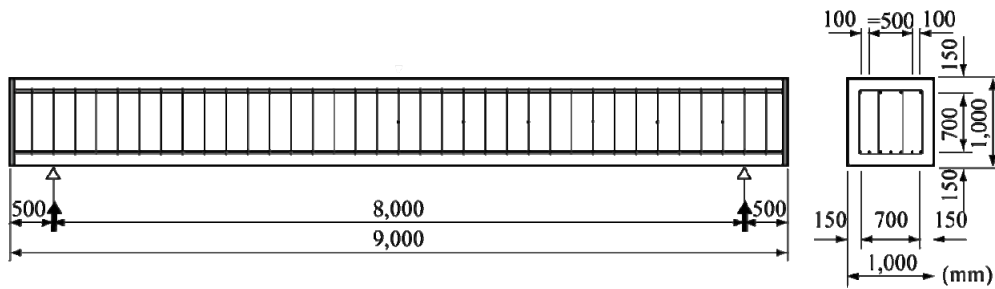


図-7 検討に用いた大型 RC はり<sup>7),10)</sup>

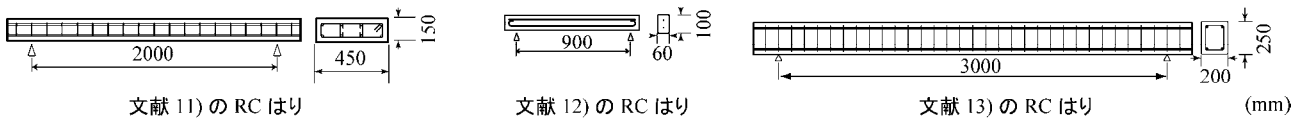


図-8 検討に用いた RC はり<sup>11),12),13)</sup>

ここに、 $m_1$ : はりの等価質量、 $m_2$ : 重錘の質量である。 $m_1$  は、はりの振動モードが曲げ一次モードと等価であるものと仮定して、純スパンにおけるはりの質量を 17/35 倍して求めた。

図より、入力エネルギー  $E_k$  を考慮する場合 (白塗り印) よりも、伝達エネルギー  $E_t$  を考慮する場合 (黒塗り印) の方が計算結果によく対応していることが分かる。このことから、伝達エネルギー  $E_t$  が RC はりの最大応答変位時の吸収エネルギー  $E_a$  と等価であるものと考え、比較的精度良く安全側の推定値を得られるものと考えられる。

## 2.4 最大応答変位と推定値と実測値の比較

図-5, 図-6 には、それぞれはりの変位 ( $\delta$ ) - 吸収エネルギー ( $E_a$ ) 関係に基づき入力エネルギー  $E_k$  に対応する変位を推定値とする場合と、伝達エネルギー  $E_t$  に対応する変位を推定値とする場合について示している。これらの図より伝達エネルギー  $E_t$  に対応する変位を推定値とすることにより、RC はりの最大応答変位を比較的

精度良く安全側で推定できることがわかる。今後は、さらなる精度向上のため  $P-\delta$  曲線の算定法について検討する必要があるものと考えている。

## 3. 形状寸法の大きく異なる RC はりへの適用性

### 3.1 検討対象

ここでは、形状寸法の大きく異なる RC はりの実験結果について提案の応答変位評価手法の妥当性を検討する。図-7, 図-8 には検討対象の RC はりの形状寸法を示し、表-1 には各 RC はりの諸元を一覧にして示している。

### 3.2 最大応答変位の推定

図-9 には、推定値と実測値の比較図を示している。ここで、図には、各 RC はりの変位-吸収エネルギー曲線に基づき入力エネルギー  $E_k$  に対応する変位を採用する場合を白抜き印で、伝達エネルギー  $E_t$  に対応する変位を採用する場合を黒塗り印で示している。

表-1 検討に用いた試験体の一覧

試験体名	試験体断面 (mm)	主鉄筋		純スパン長 (m)	主鉄筋比 (%)	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	文献
		呼び径	本数					
W2H10	1000 x 1000	D25	7	8.0	0.42	2	10	7)
W5H4						5	4	
W10H2						10	2	
W2H5						2	5	
W10H1						10	1	
N-I0.1	450 x 150	D13	4	2.0	.075	0.3	0.1	11)
N-I0.25							0.25	
N-I0.5							0.5	
N-II.0							1.0	
N-II.5							1.5	
N-I-H1.0	200 x 250	D19	2	3.0	1.15	0.3	1.0	12)
N-I-H1.5							1.5	
N-I-H2.0							2.0	
N-I-H2.5							2.5	
N-H300	60 x 100	D6	1	0.9	0.53	0.02	0.27	13)
N-H600							0.54	
N-H900							0.81	
PB800-H5	1000 x 1000	D32	7	8.0	0.65	2	5	10)
PB800-H10							10	
PB800-H15							15	
PB800-H20							20	
PC620-H5	1000 x 850	D29	7	8.0	0.64	2	5	10)
PC620-H10							10	

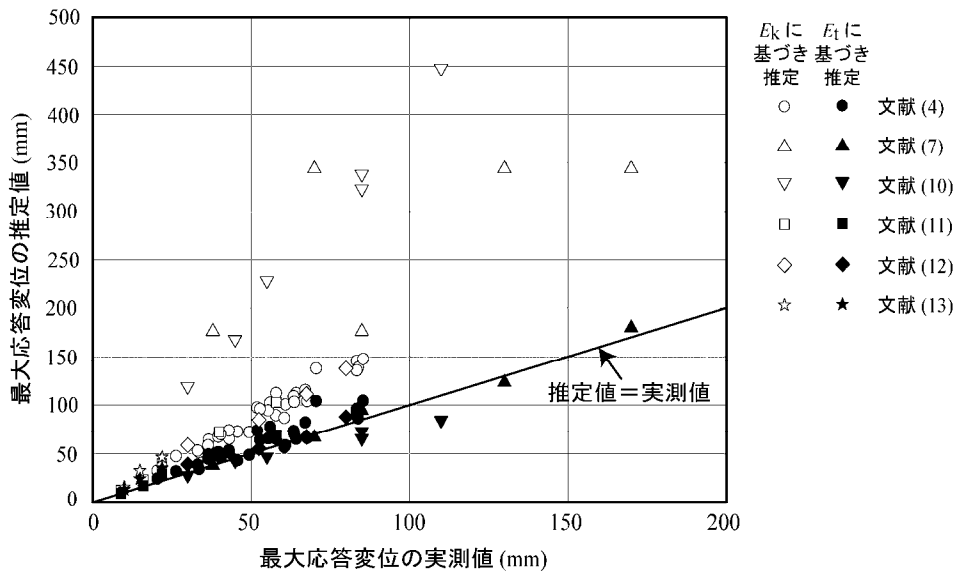


図-9 最大応答変位に関する推定値と実測値の比較

図より、伝達エネルギー  $E_t$  に対応する変位を適用することによって、実測最大応答変位を比較的精度よく推定できていることが分かる。今後は、推定精度を高めるために RC はりの荷重-変位曲線の算定方法を検討するとともに、荷重-変位曲線が単純なバイリニア型にならない場合についても検討を進める予定である。

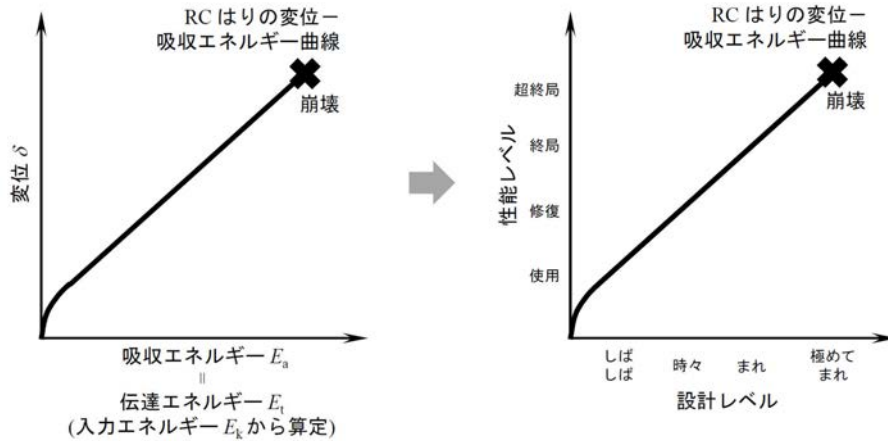
#### 4. 既設防災構造物のリスク評価の考え方

ここでは、提案した応答変位推定法の既設防災構造物のリスク評価への活用方法を一案として示す。

表-2 には、防災構造物の性能マトリックスの一例を示している。これは、米国の Vision2000<sup>14)</sup> と呼ばれる建築耐震性に関する要求性能マトリックスを参考に、衝撃作

表-2 衝撃作用を受ける落石対策構造物の性能マトリックスの概念例

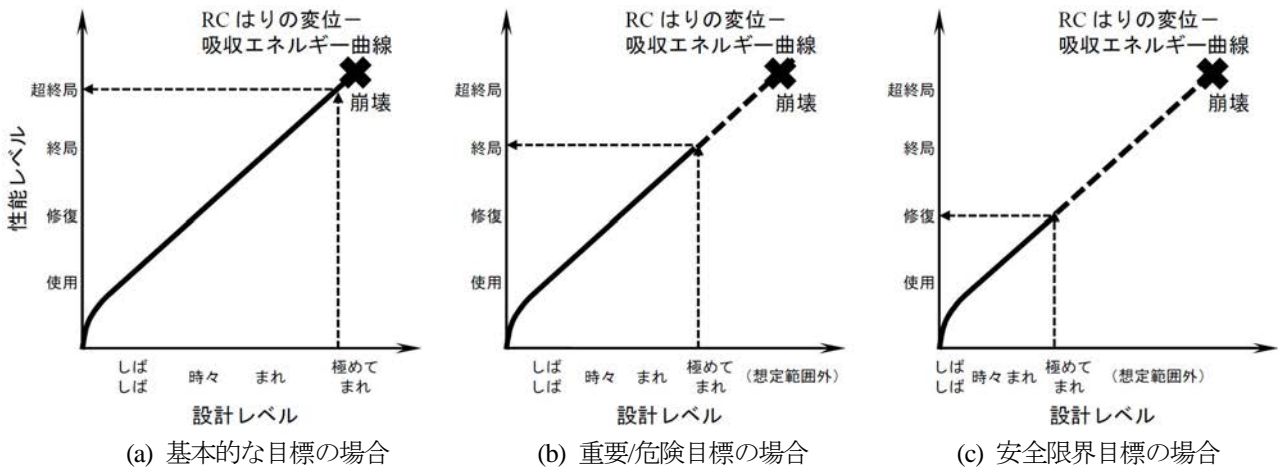
設計レベル (衝撃作用の大きさ)	性能レベル			
	使用限界状態 完全使用可能	修復限界状態 使用可能	終局限界状態 人命の安全確保	超終局限界状態 崩壊に近い
しばしば (小)	基本的な目標	許容できない性能	許容できない性能	許容できない性能
時々 (中)	重要/危険目標	基本的な目標	許容できない性能	許容できない性能
まれ (大)	安全限界目標	重要/危険目標	基本的な目標	許容できない性能
極めてまれ (非常に大)	—	安全限界目標	重要/危険目標	基本的な目標



(a) RC はりの変位-吸収エネルギー曲線

(b) 性能レベル-設計レベル関係

図-10 「変位-吸収エネルギー曲線」の「性能レベル-設計レベル関係」への変換



(a) 基本的な目標の場合

(b) 重要/危険目標の場合

(c) 安全限界目標の場合

図-11 極めてまれな事象に対する性能マトリックスの適用例

用の大きさを設計レベルとし、構造物の使用限界、修復限界、終局限界、および超終局限界を性能レベルとして表した例である。表中の「基本的な目標」は通常レベルのリスクを含む目標である。「重要/危険目標」は、重要構造物などを想定しており、リスクを低減させた場合の目標である。「安全限界目標」は最もリスクが小さい。ただし、具体的な設計レベルと各限界状態に対する要求性能（目標）は、通常、構造物の種類と目的そして想定する衝撃作用の種類により異なる。ここでは一事例とし

て示している。

図-10 には、RC はりの変位を性能レベルの指標とした場合における、上記の性能マトリックスの適用法について示している。図-10(a) は、RC はりの応答変位 ( $\delta$ ) - 吸収エネルギー ( $E_a$ ) 関係のモデル図を示している。提案の推定法では吸収エネルギー  $E_a$  は、伝達エネルギー  $E_t$  と等しいと仮定していることから、図中の横軸は伝達エネルギー  $E_t$  に置き換えることが可能である。また、伝達エネルギー  $E_t$  は、重錘落下による入力エネ

ルギー  $E_k$  から求められる。

上述のように、変位  $\delta$  を性能レベルの指標、伝達エネルギー  $E_t$  (もしくは入力エネルギー  $E_k$ ) を設計レベルの指標であるものと仮定すると、 $\delta$ - $E_a$  関係は「性能レベル-設計レベル関係」として考えることができる(図-10(b) 参照)。

図-11 には、極めてまれな事象に対する性能マトリクスの適用例を上述の性能レベル-設計レベル関係を用いて示している。図-11(a) には、「基本的な目標」(標準リスク) を目指した構造物の場合の性能レベルを示している。図より、極めてまれな作用に対して、超終局限界状態(崩壊に近い)が対応していることが分かる。

これに対し、図-11(b) には、上記よりもリスクの低い「重要/危険目標」を目指す場合について示している。図より、極めてまれな作用に対して、終局限界状態が対応していることが分かる。これは、図-11(a) の場合よりも、極めてまれな作用の大きさが小さい場合に適用可能であることを意味している。同時に極めてまれな作用の大きさを超える作用(想定範囲外の作用)に対する安全性裕度を有しているといえる。

さらに、図-11(c) には、リスクがより低い「安全限界目標」を目指す場合について示している。これは、図-11(b) の場合よりも、極めてまれな作用の大きさがさらに小さい場合のみ適用可能である。従って、安全性裕度がさらに大きく評価される。しかしながら、過剰に安全側の設計であるともいえる。全ての防災構造物をこのような設計思想で管理することは困難であり、構造物の重要性などを考慮する必要があるものと考えられる。

このように、RC はりの  $P$ - $\delta$  曲線から  $\delta$ - $E_a$  関係を導出し、それを「性能レベル-設計レベル関係」に置き換えることにより、リスク評価や安全性裕度の設定を定量的に検討することができることが分かる。

従って、このような検討により、防災構造物のリスクとコストのトレードオフ関係(費用対効果)を明確にして検討することが可能である。

## 5. まとめ

本研究では、既往の研究成果に基づいて、従来よりも適用範囲が広くかつ簡易な RC はりの応答変位推定法の提案を試みた。すなわち、衝突作用を受ける RC はりの応答変位の主たる要因と考えられる、入力エネルギー、衝突時のエネルギー損失、および梁の曲げ変形によるエネルギー吸収を考慮した応答変位推定法を提案し、過去の実験結果を対象にその妥当性を検証した。また、提案の応答変位推定法による既設防災構造物のリスク評価や安全性裕度の設定の考え方を示した。

今後は、提案の応答変位推定法のさらなる適用範囲の拡大を目的に、使用材料や構造形式の異なる構造物に関する検討を進める。また、構造性能や衝突作用の不確定性を考慮した信頼性解析を試み、既設防災構造物の安全かつ経済的な維持管理手法の提案に向けた検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：令和元年度版 国土交通白書, 2019
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.12
- 3) 岸 徳光, 三上 浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007.3
- 4) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計 - 基準体系の指針 -, 構造工学シリーズ 22, 2013.1
- 5) 橋紗代子, 榎谷浩, 中村佐智夫：RC はりの衝撃特性と性能評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 1261-1272, 2009.3
- 6) 藤掛一典, リー・ビン, サム・スーン：衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位の解析的評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 1204-1214, 2009.3
- 7) 岸徳光, 今野久志, 三上浩, 岡田慎哉：大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.3
- 8) Hyeon-Jong Hwang, Thomas H.-K. Kang, and Chang-Soo Kim: Numerical Model for Flexural Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Low-Velocity Impact Loads, ACI Structural Journal, V. 116, No. 2, March 2019, pp.65-76.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書, 設計編, 2017.3
- 10) 今野久志, 岸徳光, 岡田慎哉, 三上浩：大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動への重錘質量の影響に関する実験および数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009
- 11) 酒井啓介, 栗橋祐介, 今野久志, 岸徳光：扁平 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす敷砂緩衝材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016
- 12) 栗橋祐介, 今野久志, 三上浩, 岸徳光：AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造力学論文集 Vol. 60A (2014年3月)
- 13) 勝見悠太, 栗橋祐介, 水田真紀, 岸徳光：凍結融解作用により劣化した RC 梁の耐衝撃性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.2, 2016
- 14) SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.