

# RC はりの骨格曲線を用いた応答変位評価法の一検討

An investigation of evaluation method for response deflection by means of skeleton curve of RC beam

室蘭工業大学  
室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学大学院

○ 学生員 山越 壮之助 (Sonosuke Yamakoshi)  
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)  
学生員 戸上 卓也 (Takuya Togami)

## 1. はじめに

種々の鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐衝撃設計法の確立を最終目的として、最も基本的な構造要素である RC はりを対象とした実験および数値解析的な検討が数多く行われてきた<sup>1)</sup>。

既往の研究<sup>2)</sup>では、曲げ破壊型 RC はりの重錘落下衝撃実験の結果を対象に、入力エネルギー  $E_k$  と最大応答変位  $D_{max}$  や残留変位  $\delta_{rs}$  が線形関係にあることに着目するとともに、その勾配  $\alpha$  とはりの静的曲げ耐力  $P_u$  の関係式を導いている。この提案式を用いると、RC はりの静的耐力  $P_u$  と入力エネルギー  $E_k$  を与えることで、最大応答変位や残留変位を推定することができる。

$$D_{max} = 0.63 \cdot \frac{E_k}{P_u} \quad (1)$$

$$\delta_{rs} = 0.42 \cdot \frac{E_k}{P_u} \quad (2)$$

この評価方法は、RC はりの荷重-変位関係が降伏棚を有するバイリニア型の骨格曲線になるため(後述 図-2 参照)、RC はりのエネルギー吸収量と変位量が最大荷重(もしくは降伏荷重)を係数とする一次関数に類似した曲線となることによって成立しているものと考えられる(後述 図-3)。そのため、骨格曲線が上記のようなバイリニア型ではない構造要素(例えば、主鉄筋多段配置のはり、PC はり、複合構造部材、繊維補強コンクリートはり等)に関する評価式を構築するためには、新たに実験や数値解析を行う必要があるものと考えられる。

一方、骨格曲線で囲まれる面積が、構造要素の吸収エネルギー  $E_a$  であることに着目し、 $E_a$  がはりに伝達されるエネルギー  $E_t$  と等価であるもの仮定できるのであれば、各構造要素の骨格曲線を用いて最大応答変位を推定できる可能性があるものと考えられる。

このような観点から、本研究では、まず土木学会発行の「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>2)</sup>」の実験結果を対象に骨格曲線を用いた応答変位評価法の妥当性を検証し、次に形状寸法の異なる RC はりの実験結果を対象に検証した。

## 2. 骨格曲線を用いた応答変位の推定

### 2.1 検討対象

本論文で対象とした文献<sup>2)</sup>の実験は、所定の質量の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 30 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

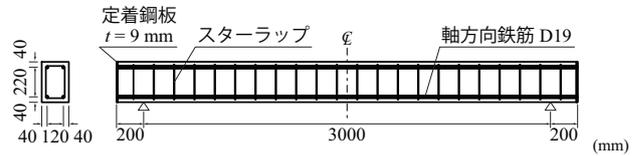


図-1 試験体の一例<sup>2)</sup> (G5 はり)

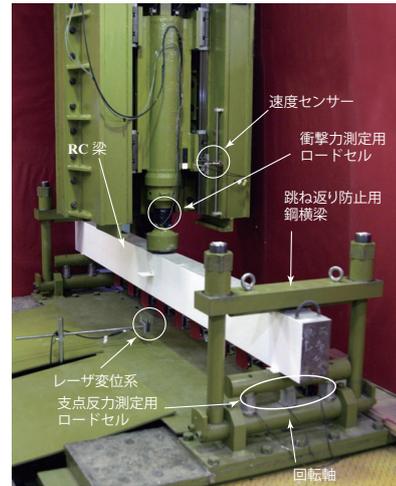


写真-1 実験状況

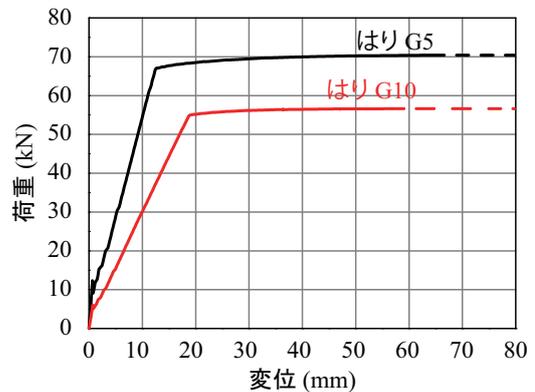


図-2 骨格曲線の一例 (G5 および G10 はり)

300 ~ 500 kg、衝突速度は 4 ~ 7.67 m/s である。図-1 には、RC はりの一例 (G5 はり)<sup>2)</sup> を示している。写真-1 には、衝撃載荷実験の状況<sup>2)</sup> を示している。

### 2.2 骨格曲線の算定方法

骨格曲線は、土木学会コンクリート標準示方書設計編<sup>3)</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

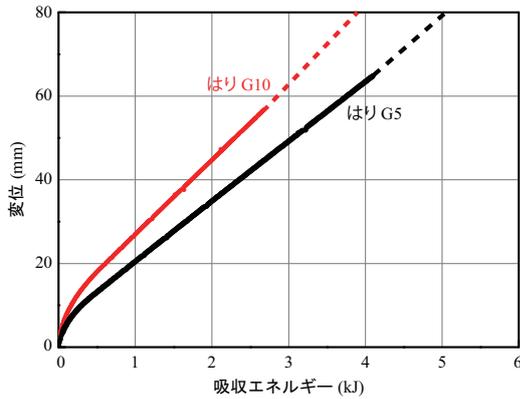


図-3 変位  $\delta$  - 吸収エネルギー  $E_a$  関係

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、得られた骨格曲線の一例を示している。

### 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、上述の骨格曲線を用いて求めた。すなわち、骨格曲線において任意の変位量  $\delta_i$  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  $\delta_i$  との関係を探っている。図-3には、得られた吸収エネルギー-変位関係の一例を示している。

図-4には、前節で求めた G5 および G10 はりに関する吸収エネルギー-変位関係に衝撃載荷実験結果をプロットして示している。衝撃載荷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、文献<sup>4)</sup>を参考に、下式により求めた。

$$E_t = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot E_k \quad (3)$$

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、質量比を考慮して求めた伝達エネルギー  $E_t$  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られることで、比較的精度良く安全側の評価を与え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には、最大応答変位に関する推定値と実測値の比較として、まず既存式による推定値を実測値と比較して示している。図より、推定値は実測値とよく対応していることが分かる。

次に図-6, 7には、それぞれ変位-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。これらの図より骨格曲線から変位-吸収エネルギー曲線を求め、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

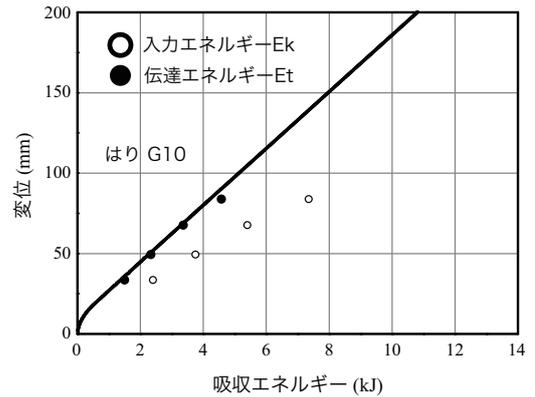
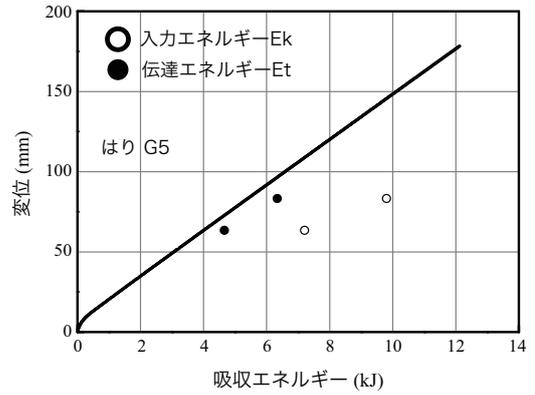


図-4 エネルギー-変位の関係

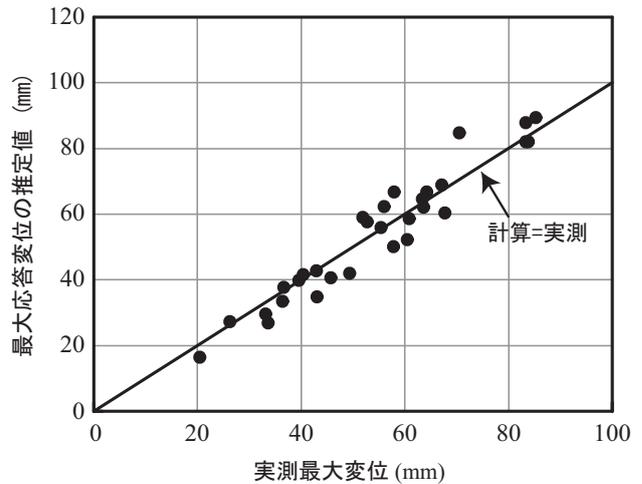


図-5 文献2による計算最大変位と実測最大変位の関係

大応答変位を比較的効率良く推定できることがわかる。ただし、既存式ほどの精度は得られず、安全側にばらつく傾向にあることが分かる。今後は、骨格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. 各種 RC はりの応答変位の推定

### 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。表-1には、本論文で検討に用いた各 RC はりの諸元を一覧にして示している。また、図-8, 図-9には、各 RC

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 (t)	落下高さ (m)	文献
		呼び径	本数					
W2H10	1000 × 1000	D25	7	8.0	0.42	2	10	5)
W5H4							4	
W10H2							2	
W2H5							5	
W10H1							1	
N-I0.1	450 × 150	D13	4	2.0	0.75	0.3	0.1	6)
N-I0.25							0.25	
N-I0.5							0.5	
N-I1.0							1.0	
N-I1.5							1.5	
N-I-H1.0	200 × 250	D19	2	3.0	1.15	0.3	1.0	7)
N-I-H1.5							1.5	
N-I-H2.0							2.0	
N-I-H2.5							2.5	
N-H300	60 × 100	D6	1	0.9	0.528	0.02	0.27	8)
N-H600							0.54	
N-H900							0.81	
PB800-H5	1000 × 1000	D32	7	8.0	0.65	2	5	9)
PB800-H10							10	
PB800-H15							15	
PB800-H20							20	
PC620-H5	1000 × 850	D29	7	8.0	0.64	2	5	9)
PC620-H10							10	

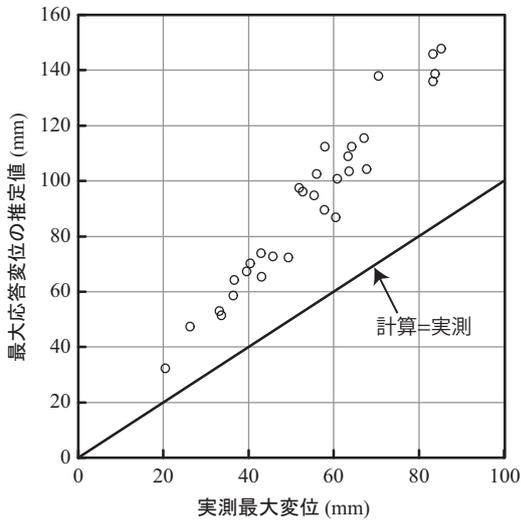


図-6  $E_k$  に対応する変位を推定値とした場合

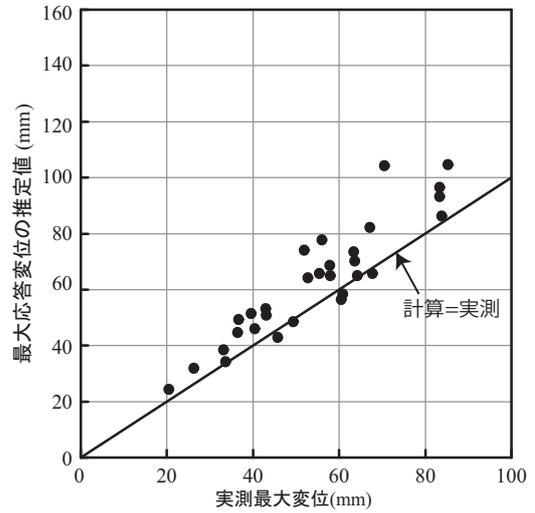


図-7  $E_t$  に対応する変位を推定値とした場合

はりの形状寸法を示している。

3.2 最大応答変位の推定

図-10 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。

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 はりの骨格曲線の算定方法を検討するとともに、骨格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。

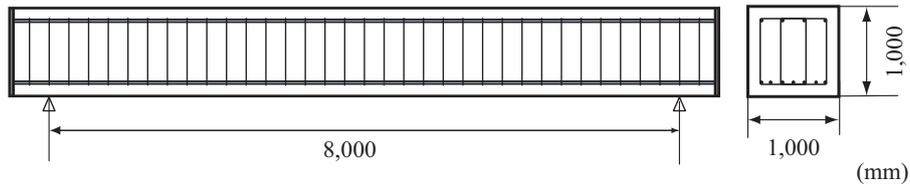


図-8 検討に用いたRCはり<sup>5)</sup>

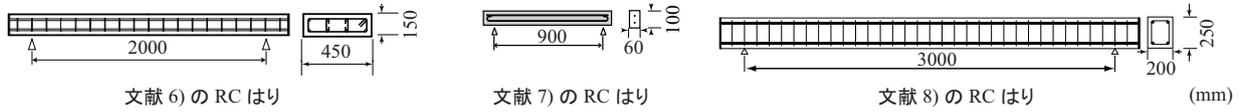


図-9 検討に用いたRCはり<sup>6),7),8),9)</sup>

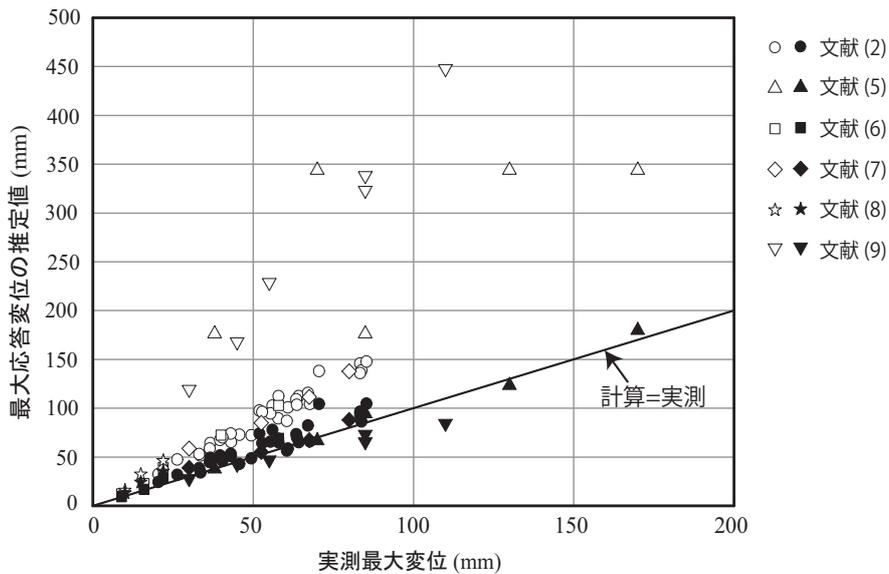


図-10 骨格曲線と質量比に基づく計算最大変位-実測最大変位の関係

#### 4. まとめ

本研究では、衝突作用を受けるRCはりを対象に、既往の文献からできるだけ多くの衝撃载荷実験の結果を収集し、骨格曲線を用いた応答変位推定の提案を試みた。その結果、RCはり骨格曲線から求めた変位-吸収エネルギー曲線に基づき、伝達エネルギー  $E_t$  に対応する変位を求めることにより、実測最大応答変位を安全側に比較的精度よく推定できることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ 15, 2004.3
- 2) 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
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，設計編，2017.3
- 4) 石川信隆，大野友則，藤掛一典，別府万寿博：基礎か

らの衝撃工学 - 構造物の衝撃設計の基礎 -

- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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)
- 8) 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
- 9) 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，Vol. 54A (2008年3月)