

衝突荷重を受ける各種 RC はりの最大変位推定に関する研究

A study on the estimation of maximum displacement of various RC beams subjected to collision load

高橋然*, 栗橋祐介**, 榎谷浩***

Zen Takahashi, Yusuke Kurihashi, Hiroshi Masuya

*金沢大学, 理工学域, 地球社会基盤学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**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, 理工学域, 地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: RC はり, 衝撃実験, 性能設計法, 応答変位

Keywords: RC beam, impact experiment, performance design method, response displacement

1. はじめに

近年地球温暖化に伴い, 全国各地で発生する災害は激甚化している. その被害からインフラや人々の命を守るために, ロックシェッドをはじめとする防護構造物が多数建設されている. これらの防護構造物は, これまで許容応力度法を用いて設計が行われてきた. 一方で, 既往の研究によりロックシェッドが過大な衝撃荷重を受けた際, 残留変形やひび割れが生じるものの, シェッド内部の安全性は十分確保できることが明らかになっている¹⁾.

したがって, ロックシェッドに対し性能設計法を適用することで, 耐衝撃性能をより適切に評価可能になると考えられる. 今後この設計法をロックシェッドに適用するためには, 荷重が作用した際の変形量を精度良く推定するための方法を確立することが重要となる. しかしながら, 単純な構造である RC はりにおいても衝撃作用時の変位の算出方法は確立されていないのが現状である. そのため, 衝突荷重を受ける RC はりの変位を推定するための研究が, 国内外の研究機関で行われている^{2), 3), 4)}.

研究例として, 岸らは曲げ破壊先行型の RC はりを用いて衝撃実験を行い, その結果に基づいて応答変位を推定する式を提案している²⁾. また, 橋らも同様な実験を行い, 応答変位の推定法を提案している³⁾. 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うえで変位推定法を提案しており, 他の機関で行われた実験データを用いて, 提案式が変位を安全側で評価できることを証明している⁴⁾. しかしながら, これらの推定法はいずれも適用範囲が限られているほか, 煩雑である面もあり, 実務設計になじまない可能性がある.

このような背景から, 本研究では従来よりも適用範囲が広く, なおかつ容易に変位を算出できるような式を提案することを試みた. 検討の手順として, はじめに曲げ破壊が先行する RC はりを用いて衝撃実験を行い, はりの吸収エネルギーや重錘とはり

の衝突の様子を分析を行った. 次に, これらの分析結果をもとに, いくつかの仮定を条件として決定し, 理論的に変位推定の提案式を導出した. さらに, これに加えて, 導出した提案式の妥当性について検証を行うために, 過去に行われた衝撃実験のデータを用いて分析を行った.

2. 完全塑性衝突と RC はりの曲げ 1 次振動を仮定して求めた伝達衝撃エネルギーの妥当性検証

2.1 実験の目的

本衝撃実験の目的は, 重錘による RC はりへの伝達エネルギーを理論的に算出する方法について検討することである. そのために, 重錘と RC はりの衝突が完全塑性衝突とみなせるか否かについて, 実験結果を用いて検証を行った. 完全塑性衝突とは, 図-1 に示すように, 重錘(図-1 中の衝突体)と RC はりが, 衝突後一体となって運動することを指す. この仮定が適用できれば, 運動量保存則の理論を用いて, 衝突後に重錘と一体となった RC はりの運動速度が算出でき, この算出結果を用いて伝達エネルギーの理論値を導出することが可能となる. 完全塑性衝突の検証には, 実験の際に計測した, 重錘衝撃力や載荷点変位, 重錘移動量を用いた. そして, 理論的に算出した伝達エネルギーの妥当性を検証するために, 実験値による伝達エネルギーとの比較を行った.

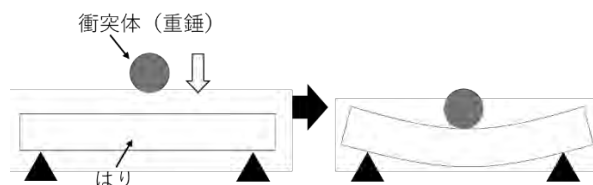


図-1 完全塑性衝突の様子

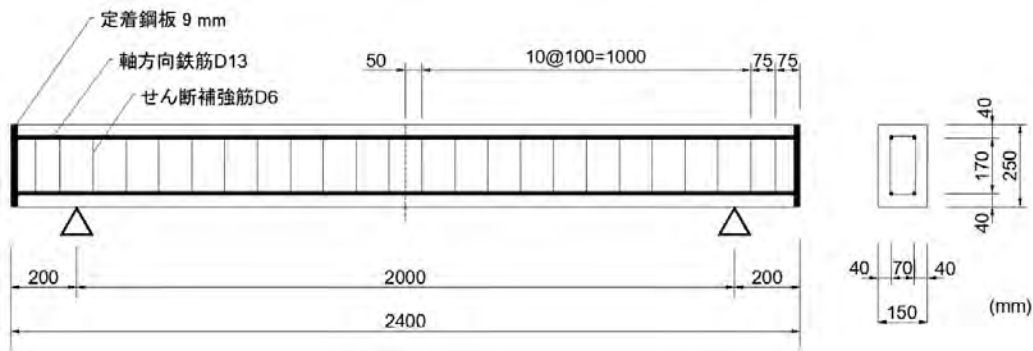


図-2 RC はりの形状寸法と配筋状況

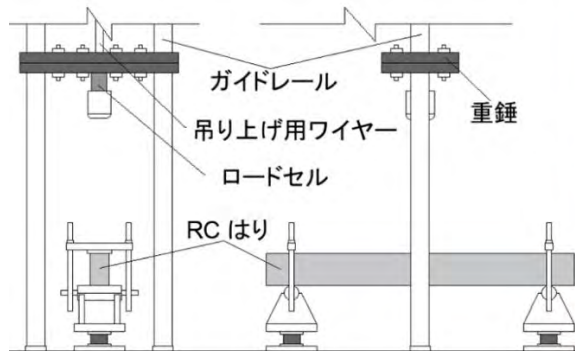


図-3 衝撃実験装置



図-4 衝撃実験の状況

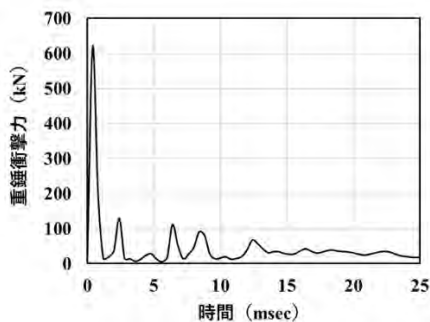


図-5 重錘衝撃力の波形

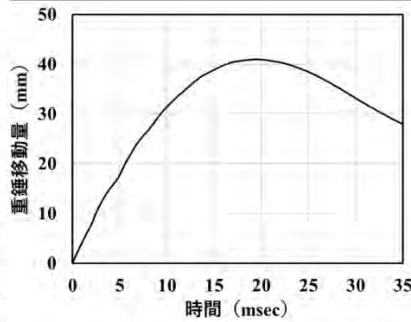


図-6 重錘移動量の波形

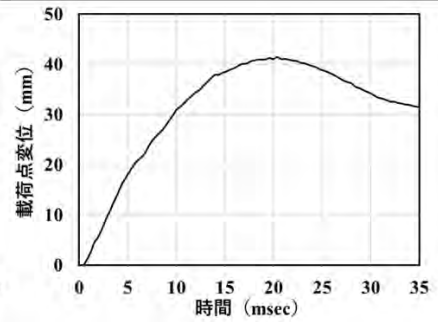


図-7 載荷点変位の波形

2.2 実験方法

図-2 に衝撃実験の際に使用した RC 試験体の図面を示した。この試験体は、構造工学シリーズ 15「衝撃実験・解析の基礎と応用」における共通実験と同じ諸元である。寸法について、断面幅が 150 mm、断面高さが 250 mm、スパン長が 2000 mm となっている。また、曲げ耐力が 32.6 kN、せん断耐力が 111.4 kN となっており、曲げ破壊が先行するように設計されている。事前の試験により、コンクリートの圧縮強度の平均は 44.1 MPa であった。鉄筋については、軸方向鉄筋として、D13 を上下二本ずつ、せん断補強鉄筋として、D6 を 100 mm 間隔で配置している。降伏強度については、軸方向鉄筋が 356 MPa、せん断補強鉄筋は 350 MPa であり、降伏荷重は 34.8 kN、降伏変位は 4.92 mm であった。次に、衝撃実験の際に用いた実験装置を図-3 に、実験状況を図-4 に示した。重錘は 161 kg のものを用いており、ガイドレールに沿って自由落下するようになっている。重錘の落下高さは、落下速度が 6 m/s となるように、1.835

m とした。これは、RC はりが塑性変形する程度の入力エネルギーとするためである。実験の際には、重錘衝撃力、重錘移動量、およびはりの載荷点変位を測定した。重錘衝撃力は、圧電素子型のロードセルを用いて計測した。このロードセルは、容量が 1200 kN、固有周波数は 4.0 kHz である。重錘移動量と RC はりの載荷点変位は、高速度カメラで画像計測したものを結果とした。フレームレートは 12500 fps とした。

2.3 実験結果

(1) 重錘衝撃力

図-5 に重錘衝撃力の時間変化について示した。なお、重錘が RC はりに接触した時間を 0 msec に設定している。図から、重錘がはりに接触した直後に急激に衝撃力が大きくなっていることが分かる。また、その後は約 100 kN をピークとして波形が何度か立ち上がり、収束に向かっていくことがわかる。

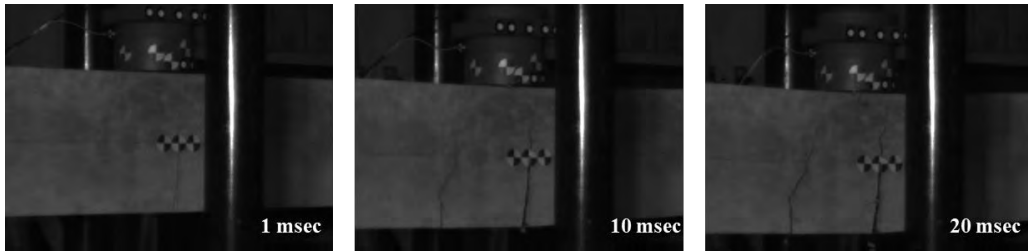


図-8 重錘と RC はりの衝突の様子

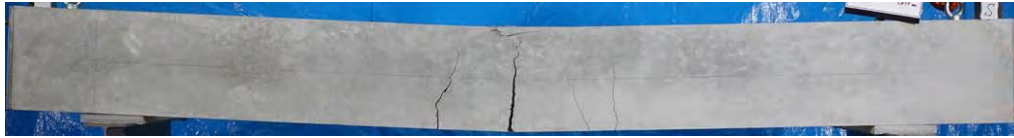


図-9 衝撃実験終了後の RC はり試験体



図-10 RC はり試験体のひび割れ図

(2) 重錘移動量

図-6 に重錘移動量の時間変化を示した. 図-5 と同様に, 重錘と RC はりが接触した時間を 0 msec に設定している. 図から重錘とはりが接触した後, 約 20 msec 経過後に, 重錘移動量が最大値に達していることが分かる.

(3) はりの載荷点変位

図-7 に, 重錘と RC はりの接触時を 0 msec とし, はりの載荷点の変位波形を示した. 図-6 と比較すると, グラフの形状が類似していることがわかる. したがって重錘が RC はりに接触した後, 両者はほぼ一体となって運動したということがわかる.

(4) 衝突後の変形挙動について

図-8 に, 重錘がはりに接触した時間を 0 msec とし, 高速度カメラで撮影した 1 msec, 10 msec, 20 msec 経過後の写真を示した. 図-8 より, 重錘と RC はりは変形量が最大値に達するまで, ほぼ一体となって変形していることが分かる. したがって, 重錘と RC はりは, ほぼ完全塑性衝突に近い挙動を示しているといえる.

(5) RC はりのひび割れの状況について

図-9, 図-10 に, 衝撃実験終了後の試験体における, ひび割れの状況を示した. 図-9 より, RC はりの中央部に最も大きなひび割れが生じており, また最大変位も試験体の中央部で生じていることがわかる. さらに図-10 から, 試験体の中央部以外にも小さなひび割れが生じていることがわかる.

2.4 エネルギーに関する理論値と実験値との比較

(1) 重錘移動速度

衝突後の重錘移動速度を理論的に算出する場合は,

運動量保存則の理論を用いる. 実験結果より, 衝突は完全塑性衝突に近い挙動を示すことが明らかになった. したがって, 式(1), (2)のように, 重錘と RC はりの衝突を完全塑性衝突と仮定した上で, 運動量保存の式を立式し, 衝突後の速度 V' を算出する. なお, 式(1), (2)で使用する各物理量は図-11 および表 1 に示すとおりである. 等価質量は RC はりの質量に, 係数となる 17/35 を乗じた値である. 等価質量の詳細は, 本論文末尾の付録にまとめた.

$M_w = 161 \text{ kg}$, $M = (17/35) \times 187 \text{ kg} = 91 \text{ kg}$, $V = 6 \text{ m/s}$ であることから, 式(2)より速度 $V' = 3.83 \text{ m/s}$ が算出される. 以上より, 衝突後の重錘移動速度の理論値は 3.83 m/s となる.

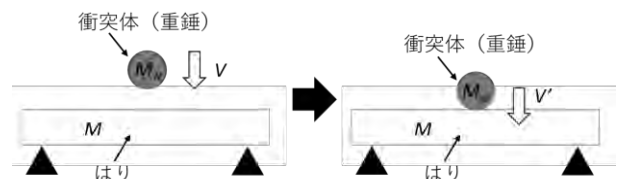


図-11 代入する各物理量

表 1 各物理量について

数式中の表記	内容
M_w	重錘質量
M	RC はりの等価質量
V	重錘落下速度
V'	衝突後の移動速度

$$M_w V = (M_w + M) V' \quad (1)$$

$$V' = \frac{M_w}{M_w + M} V \quad (2)$$

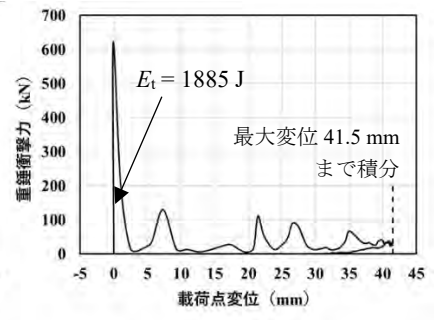
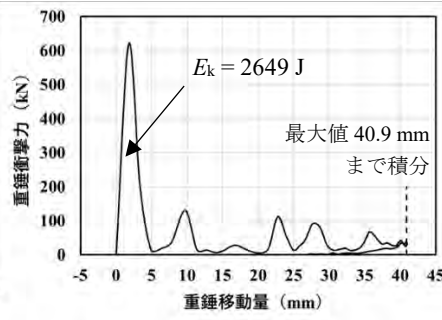
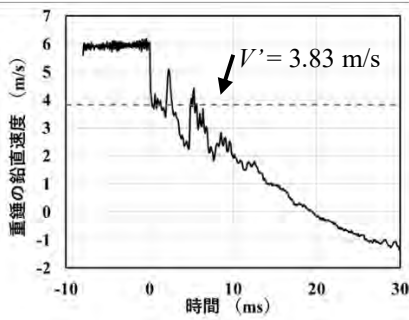


図-12 重錘移動速度の波形

図-13 重錘衝撃力-重錘移動量関係

図-14 重錘衝撃力-载荷点変位関係

次に衝突後の重錘移動速度の実験値について述べる。図-12 に、高速度カメラの画像解析により算出した重錘移動速度の波形を示した。図-12 の波形について、衝突直後となる 0.08 msec から 2 msec までの平均値を計算すると、衝突後の重錘移動速度の実験値 $V'=3.87$ m/s が算出される。これより、落下速度約 6 m/s で RC はりに衝突した重錘は、衝突直後に、理論値である 3.83 m/s 程度に減速していることがわかる。

以上より、衝突直後の重錘移動速度の実験値は、重錘と RC はりの衝突を完全塑性衝突と仮定して算出した理論値とほぼ一致することがわかる。したがって衝突直後の重錘移動速度は、重錘と RC はりの衝突を完全塑性衝突とみなしたうえで、運動量保存則から算出可能であるといえる。

(2) 入力エネルギー E_k

入力エネルギーの理論値は、重錘が RC はりに衝突する直前の重錘が持つ運動エネルギーが相当する。すなわち、入力エネルギーの理論値は式(3)のようになる。

$$E_k = \frac{1}{2} M_w V^2 \quad (3)$$

$M_w=161$ kg, $V=6$ m/s より、式(3)から入力エネルギー E_k の理論値 2898 J が算出される。

一方入力エネルギーの実験値は、上の図-13 に示された重錘衝撃力と重錘移動量の波形の面積より算出できる。図の波形に対して重錘移動量の最大値である 40.9 mm まで台形積分を行うと、入力エネルギー E_k の実験値 2649 J が算出される。

(3) 伝達エネルギー E_t

伝達エネルギー E_t の理論値は、2.4(1)で導出した衝突後の重錘移動速度 V' を用いて式(4)のようになる。これは、衝突後の重錘および RC はりの運動エネルギーに相当する。

$$E_t = \frac{1}{2} (M_w + M) V'^2 = \frac{1}{2} \frac{M_w^2}{M_w + M} V^2 \quad (4)$$

$M_w=161$ kg, $M=(17/34) \times 188$ kg = 91 kg, $V=6$ m/s であることから、式(4)より伝達エネルギー E_t の理

論値 1852 J が算出される。

これに対して、伝達エネルギー E_t の実験値は、上の図-14 に示す、実験から得られた重錘衝撃力と载荷点変位の波形で囲まれた面積となる。図-14 の波形に対して最大変位である 41.5 mm まで台形積分を行い、面積を算出すると、伝達エネルギー E_t の実験値 1885 J となる。

(4) 伝達エネルギーの妥当性検証

表 1 に、各項目の実験値と理論値を示した。なお、衝突前の重錘移動速度 V の実験値は、図-12 の波形の、計測開始時間である -8 msec から衝突直前となる -0.08 msec までの値の平均値を掲載している。表 1 より、伝達エネルギー E_t の実験値と理論値がほぼ一致していることがわかる。よって、完全塑性衝突の仮定や、伝達エネルギーの算出方法は概ね妥当であることがわかる。

一方、表 1 中の実験値の入力エネルギー E_k と伝達エネルギー E_t を比較すると、 E_t の方が、 E_k よりも小さくなっていることが分かる。原因として、衝突直後の衝突部のコンクリート面のへこみ変形や、曲げ、せん断ひび割れの発生によるエネルギー損失が影響しているものと考えられる。

表 1 各項目の比較表

	実験値	理論値
V	5.93 m/s	6 m/s
V'	3.87 m/s	3.83 m/s
E_k	2649 J	2898 J
E_t	1885 J	1852 J

3. 応答変位推定式の提案

3.1 提案式の導出に当たって

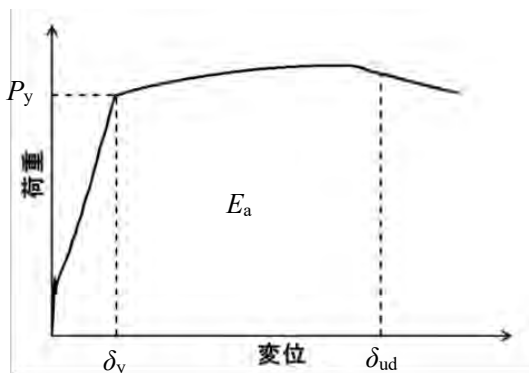
Hyeon-Jong Hwang らは、エネルギー保存則を用いて応答変位の推定式を提案している⁵⁾。そこで本研究では、このエネルギー保存則の理論を用いて新たに応答変位を算出するための推定式の提案を試みた。なお、変位をより容易に算出できるようにするために、Hyeon-Jong Hwang らが考慮している、RC はりのたわみ変形による位置エネルギー、および RC はり中央部上縁の変形によるエネルギー⁵⁾は、本研究では考慮の対象外とした。したがって式(5)に示すよ

うに、本研究では前章で述べた伝達エネルギー E_t と、図-16 に示す RC はりの荷重変位関係グラフによって算出される吸収エネルギー E_a が等価になるとして、応答変位推定式の提案を試みた。

$$E_t = E_a \quad (5)$$

3.2 提案式の導出方法

(1) 吸収エネルギー E_a の算出



↓ 簡略化

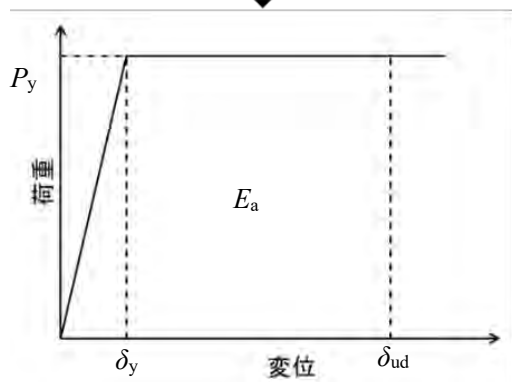


図-15 RC はりの荷重変位関係

図-15 のグラフによって囲まれた面積が、RC はりの吸収エネルギー E_a となる。なお、 E_a を算出しやすくするために、図-15 のように、グラフを簡略化したものを計算に用いる。したがって、吸収エネルギー E_a は式(6)のようになる。

$$E_a = P_y \delta_{ud} - P_y \delta_y / 2 \quad (6)$$

(2) 応答変位 δ_{ud} の算出

得られたエネルギー式をもとにして、 $E_t = E_a$ を立式すると、式(7)のようになる。

$$\frac{1}{2} \frac{M_w^2}{M_w + M} V^2 = P_y \delta_{ud} - \frac{1}{2} P_y \delta_y \quad (7)$$

式(7)を応答変位 δ_{ud} について解くと式(8)のようになり、応答変位の推定式が導出される。

$$\delta_{ud} = \frac{M_w^2 V^2}{2P_y(M_w + M)} + \frac{\delta_y}{2} \quad (8)$$

3.3 推定値と実験値の比較

ここでは、衝撃実験で実際に計測した応答変位と、式(8)に示した応答変位の推定式により算出した変位の比較を行う。以下の表2に各変位の比較表を示した。表2から、変位の値を安全側で推定できていることがわかる。なお、提案式に代入した各物理量の値は、表3に示すとおりである。

実験値と推定値の間に誤差が生じた原因の一つ目は、提案式導出の際に、ひずみ速度効果を見逃していることが考えられる。重錘による衝撃は瞬間的であるため、ひずみ速度効果が生じる。それにより、一時的に RC はりの力学的性能が変化するために、実験時の変位が小さくなることが考えられる。原因の二つ目は、衝撃力を一点荷重で加えているために、RC はり中央部上面（重錘が接触する部分）のコンクリートが水平方向に加え、鉛直方向に圧縮されることが考えられる。これにより、はり中央部のコンクリート強度が局所的に大きくなることで、実験の際に変位が小さくなると考えられる。

表2 応答変位の比較表

	実験値	推定値
δ_u	41.5 mm	55.7 mm

表3 代入した各物理量の値

物理量名	式中の文字	値
重錘質量	M_w	161 kg
RC はりの等価質量	M	91 kg
落下速度	V	6 m/s
鉄筋降伏荷重	P_y	34.8 kN
鉄筋降伏変位	δ_y	4.92 mm

4. 応答変位推定式の妥当性の確認

ここでは、重錘の落下高さや RC はりの断面積などの条件を変化させた場合に、式(8)に示した提案式が、どのように応答変位を予測するのかについて検証を行う。検証には、Yongjae Yu らによってまとめられた衝撃実験データ 15 ケース⁶⁾を用いた。この文献を用いた理由は、比較的新しい実験データがまとめられていたためである。さらに、断面積の異なる複数の試験体を用いたり、重錘の質量を変化させて実験を行ったりしており、提案式の妥当性を検証するうえで有効であると判断したため、文献 6)を用いることとした。

表 4 各試験体のデータ

供試体名	重錘質量(kg)	落下速度(m/s)	Py(kN)	δ_y (mm)	断面積(m ²)	密度(ton/m ³)	スパン長(m)	せん断余裕度
E30-C40-H6-M1	700	9.43	591	5.61	0.24	2.5	3.3	1.472
E30-C40-H6-M2	1500	6.33	593	5.54				1.471
E30-C40-H6-M3	2500	5.04	592	5.62				1.471
E30-C40-H5-M1	700	9.43	473	7.12	0.20			1.569
E30-C40-H5-M2	1500	6.33	472	7.12				1.569
E30-C40-H5-M3	2500	5.04	475	7.04				1.567
E30-C28-H6-M1	700	9.43	582	5.88	0.24			1.488
E30-C28-H6-M2	1500	6.33	579	6.05				1.511
E30-C28-H6-M3	2500	5.04	582	5.92				1.490
E30-C28-H8-M1	700	9.43	1221	6.12	0.32			0.957
E30-C28-H8-M2	1500	6.33	1214	6.01				0.954
E30-C28-H8-M3	2500	5.04	1230	5.95				0.945
E50-C40-H6-M1	700	12.14	592	5.60	0.24			1.473
E50-C40-H6-M2	1500	8.27	589	5.58				1.472
E50-C40-H6-M3	2500	6.44	590	5.57				1.472

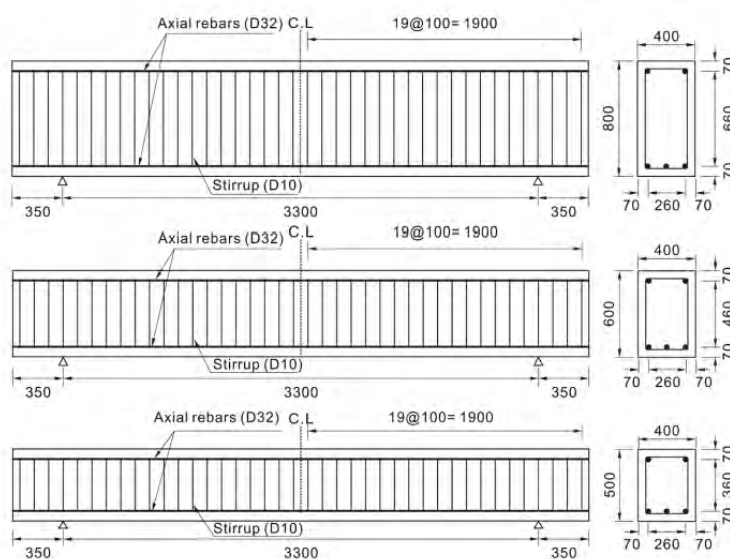


図-16 文献6)のRCはりの形状寸法

4.1 RC 試験体データと図面の提示

表 4 に、文献中の衝撃実験で用いられた RC 試験体のデータを示した。試験体の名称については、例えば E30-C40-H6-M1 は、入力エネルギーが 30 kJ、コンクリートの指定圧縮強度が 40 MPa、断面高さが 600 mm、重錘質量が 700 kg のものを用いていることを意味する。重錘質量は M1 が 700 kg、M2 が 1500 kg、M3 が 2500 kg であることを示している。表 4 から、本衝撃実験は、重錘の質量や落下高さを変化させているものの、重錘による入力エネルギーは一定になっていることがわかる。また、図-16 に試験体の図面を示した。図-16 より、試験体にはスターラップが用いられており、せん断耐力が強化されていることがわかる。

4.2 応答変位の分析結果

図-17 に Yongjiae Yu らによってまとめられた衝撃実験データ 15 ケース⁹⁾の分析結果を示した。縦軸に

式(8)の提案式によって算出した応答変位 δ_{ud} 、横軸に実験の際に計測された応答変位 $\delta_{u,exp}$ が示されている。また図-18 に、各応答変位を鉄筋の降伏変位で除した塑性率についての結果を示した。式(8)の提案式を用いて変位 δ_{ud} を算出する際は、表 4 で示したデータを用いた。

図-17、図-18 より、ほとんどの実験ケースにおいて応答変位を安全側で予測できていることがわかる。しかしながら、変位の値が小さいときの数ケースでは、予測値が実験値よりも小さくなり、変位を危険側で評価している。このような結果は、主に断面高さが大きい試験体を用いたときに見られる。原因としては、断面積の大きな試験体が、他の試験体よりもせん断余裕度が小さいことが考えられる。これにより、曲げ破壊に加えてせん断破壊が生じ、その影響により、変位の実験値が大きくなったと考える。

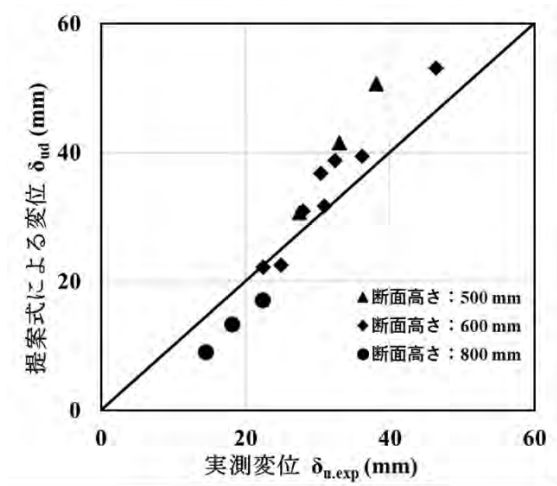


図-17 最大変位の比較図

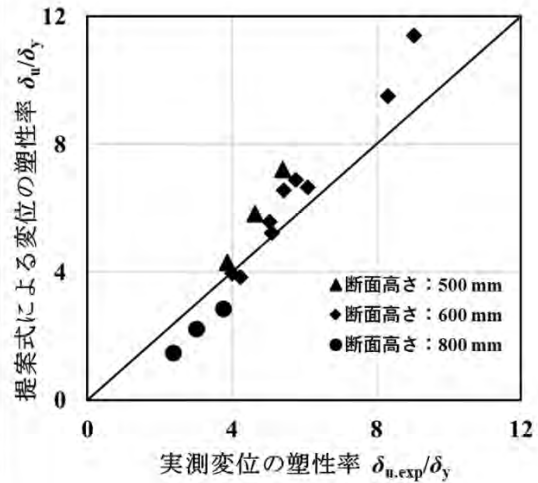


図-18 応答変位塑性率の比較図

5. まとめ

本研究では曲げ破壊先行型の RC はりを用いて衝撃実験を行い、そこから分かったことをもとにして応答変位を算出するための式を提案した。また、その式の信頼性を検証するために、過去に行われた衝撃実験のデータをもとにして分析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) RC はりと重錘の衝突について、最大変位に達するまでの変形は完全塑性衝突に近い挙動を示す。
- (2) 重錘による RC はりへの伝達エネルギーは、完全塑性衝突を考慮して算出した、重錘と RC はりの運動エネルギーの値とほぼ等価になる。
- (3) RC はりの衝撃に対する曲げ変形量は、本研究で導出した応答変位の提案式を用いて、精度よく、あるいは安全側で予測可能である。
- (4) せん断余裕度が小さい場合、提案式は変位を危険側で評価する場合がある。

今後は、提案式の適用可能な範囲について、更に多くの衝撃実験のデータを用いて検証する必要がある。また提案した式が、さまざまな種類のはりの応答変位を推測できるようにするために、以降はよりせん断余裕度の小さい、せん断破壊先行型の RC はりや、繊維補強コンクリートを素材としたはりを用いて衝撃実験を行うことを予定している。さらに衝撃実験を行う際に、緩衝材を用いることも検討している。そのうえで、本研究で提案した式について、緩衝材を用いた場合も適用できるようなものに応用する予定である。

謝辞

本研究における RC はりの衝撃実験は、「耐衝撃設計における安全性照査法に関する研究小委員会」にて議論し、計画・実施した実験の一部である。また、RC はりは、バルテクス (株) にご提供いただいた。DIC の計測・分析は、構造計画研究所にご協力いただいた。ここに記して感謝申し上げる次第である。

付録

はりの等価質量について

ここでは提案式を用いるうえで必要となる、はりの等価質量について、それを採用する理由と算出方法を述べる。

1. 等価質量を用いる理由

今回導出した提案式に、はりの質量を代入する場合は、はりの質量に 17/35 を乗じた等価質量が用いられる。この理由は図-19 のように、重錘衝突後のはりの振動を単振動の理論を用いて単純化しているためである。提案式導出の際は、完全塑性衝突を仮定しているので、重錘衝突後に重錘と RC はりが一体となって進行方向に運動することが想定されている。しかし実際は、重錘衝突後にはり全体は運動せず、支点が固定された状態でたわみ振動するため、はりの質量を換算しているのである。

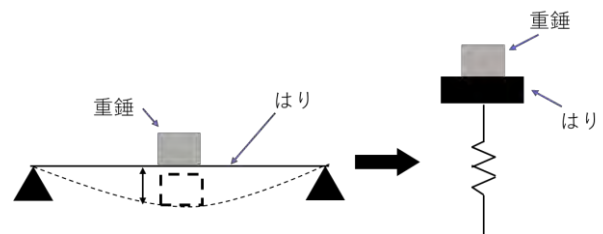


図-19 はりの振動を単振動に単純化した様子

2. 等価質量の算出方法

(1) はり中央部の変位 y_c の算出

はじめに図-20 に示すように、スパン長 L 、単位長さあたりの質量 ρ のはりに質量 M_w の重錘を静的に置いた際に発生する荷重が P になるとして、中央部の変位 y_c を算出する。変位 y_c は、式(9)のようになる。なお、式中の E は RC はりのヤング係数、 I は断面二次モーメントである。

$$y_c = \frac{PL^3}{48EI} \quad (9)$$

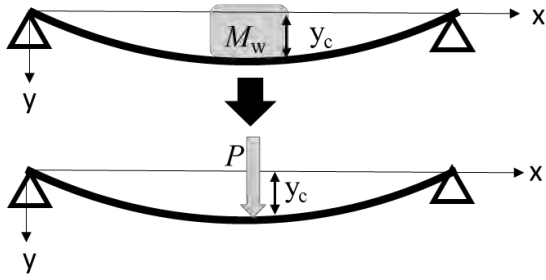


図-20 はりに荷重 P を作用させた様子

(2) 位置 x における変位 y を算出

次に図-20 をもとにして、(1)で算出した y_c をもとに RC はりの位置 x における変位 y を算出する。変位 y は、式(10)のようになる。

$$y = \frac{PL^3}{48EI} \left(3\frac{x}{L} - 4\frac{x^3}{L^3} \right) = y_c \left(3\frac{x}{L} - 4\frac{x^3}{L^3} \right) \quad (10)$$

$$(0 < x < L/2)$$

(3) 運動エネルギー K を算出

次に(2)の変位 y をもとに、衝突後に重錘と一体となった RC はりの運動エネルギー K を、積分を用いて算出する。運動エネルギー K は、式(11)のようになる。

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$= \frac{1}{2}M_w(y_c')^2 + \frac{1}{2} \int_0^{L/2} \rho(y_c')^2 \left(3\frac{x}{L} - 4\frac{x^3}{L^3} \right)^2 dx$$

$$= \frac{1}{2} \left(M_w + \frac{17}{35}\rho L \right) (y_c')^2 \quad (11)$$

(4) 算出された K をもとに、等価質量を決定

上で算出された K において、RC はりの質量の部分に着目すると、 $17/35 \rho L$ となっていることがわかる。よって、等価質量は実際の RC はりの質量に $17/35$ を乗じればよいことがわかる。

参考文献

- 1) 土木学会：爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価，構造工学シリーズ 27，2017
- 2) 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
- 3) 橘紗代子，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
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) Yongjae Yu, Sangho Lee, Jae-Yeol Cho: Deflection of reinforced concrete beam under low-velocity impact loads, International Journal of Impact Engineering, pp.3-7, 2021
- 7) 栗橋祐介，榎谷浩：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，第 12 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp3-5，2019