

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

A proposal for verification method of flexural-failure type RC beams under impact loading following
performance-based design concept

岸 徳光*, 三上 浩**

Norimitsu Kishi and Hiroshi Mikami

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

In order to establish a verification method for performance-based impact resistant design method for flexural-failure type RC beams, experimental data of total thirty-six RC beams under single impact loading whose dimensions of cross-section, main rebar ratio and clear span were varied and bending-shear capacity ratio is more than 1.5, were accumulated. In order to verify the load-carrying capacity of the RC beams from service limit state to ultimate limit state, data for wide range of each parameter were considered as: 2.4 to 14.7 kJ input impact energy; 300 to 500 kg mass of heavy weight for falling-weight impact loading; and 4 to 7.7 m/s impact velocity. From this study, it is confirmed that: input impact energy is proportional to residual displacement of RC beams; and static load-carrying capacity for verifying impact resistant capacity of the RC beam for required limit state can be evaluated using that relationship.

Key Words : RC beam, flexural-failure type, single impact loading test, performance-based impact resistant design

キーワード : RC 梁, 曲げ破壊型, 単一衝撃荷重載荷実験, 性能照査型耐衝撃設計

1. はじめに

落石防護施設や砂防ダムなど、耐衝撃用途として用いられる鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 製構造物が今までに数多く建設されてきた。その設計の原則は、想定される外力に対して十分に安全であることであるが、過去には、想定外の外力の作用によって構造物が壊滅的な損傷を受けた例も少なくない¹⁾。その観点で、災害に強い構造物の新設や既設構造物を補強するためには、さらに合理的な耐衝撃設計法²⁾を確立することが重要と考えられる。しかしながら、構造物の主要な構成要素である梁部材でさえも、十分に合理的な耐衝撃設計法が確立されていないのが現状³⁾である。

著者らは、既往の研究⁴⁾において曲げ破壊が卓越する RC 梁に限定し、耐衝撃設計法を提案している。既往の提案式は、主に RC 梁の終局限界状態を規定した上で繰返し衝撃荷重載荷実験を実施し、その結果を統一的に取りまとめた構築されたものである。すなわ

ち、既往の研究では繰返し衝撃荷重載荷実験を主体とし、最大支点反力が得られた衝突速度でのみ単一衝撃荷重載荷実験を行っている。また、繰返し衝撃荷重載荷実験は、RC 梁の終局限界状態を累積残留変位量が純スパン長の 2% に達した状態と規定し、この状態に至るまで行っている。なお、耐衝撃設計法の提案は、最大支点反力と静的曲げ耐力の比（以後、耐力比と称する）および吸収エネルギーの入力エネルギーに対する比（以後、エネルギー比と称する）に基づき、支点反力と載荷点変位の関係が模式的に台形状で表わせるとの仮定を用いて行われている。

上記の耐衝撃設計法は合理的な設計法であるものの、以下のような課題も有していた。すなわち、1) 単一衝撃荷重載荷実験の結果も一部で利用しているものの、ベースとなる実験結果は繰返し衝撃荷重載荷実験によるものであり、実現象と合致していない側面があること、2) 終局限界状態を規定した上での繰返し衝撃荷重載荷実験結果に基づく提案式であり、多様な限界状態には対応できない可能性があること、が挙げられ

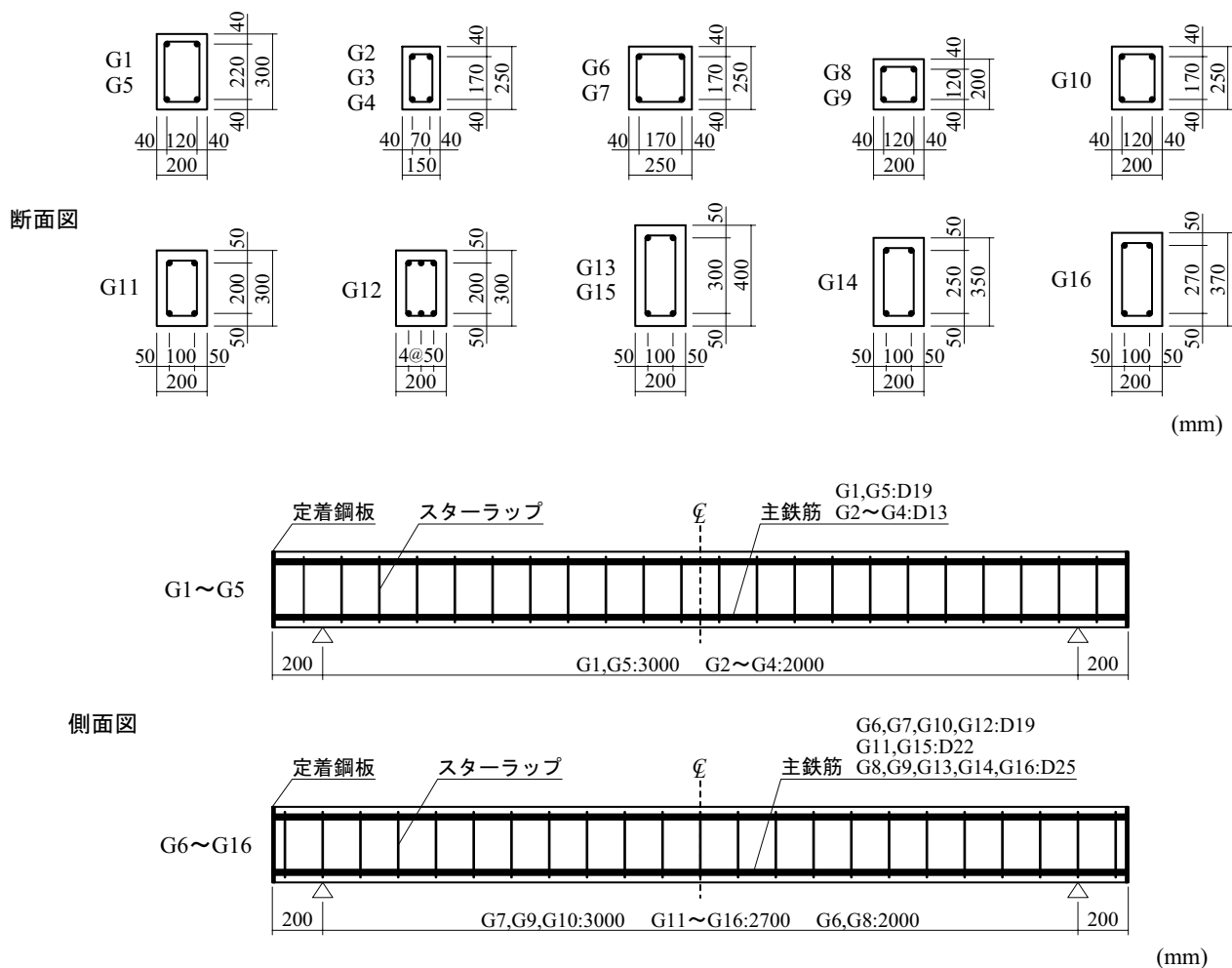
表－１ 試験体一覧

試験体名	試験体断面	主鉄筋		純スパン長 L (m)	主鉄筋比 p_t (%)	重錘質量 M (kg)	コンクリート強度 (MPa)	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 $\alpha(=V_{usc}/P_{usc})$	衝突速度 V (m/s)
		径	本数								
G1-1	200 × 300	D19	2	3	1.10	300	33.7	64.2	102.8	1.60	7
G1-1S											
G2-1	150 × 250	D13	2	2	0.80	300	32.2	38.2	63.6	1.66	4
G2-2											5
G2-3											6
G2L-1	150 × 250	D13	2	2	0.80	400	32.2	38.2	63.6	1.66	4
G2L-2											5
G2L-3											6
G3-1	150 × 250	D13	2	2	0.80	300	34.6	43.6	140.2	3.22	4
G3-2											5
G3-3											6
G4-1	150 × 250	D13	2	2	0.80	300	32.3	39.1	143.5	3.67	4
G4-2											5
G5-1	200 × 300	D19	2	3	1.10	400	39.2	69.7	167.0	2.40	6
G5-2											7
G6-1	250 × 250	D19	2	2	1.09	300	34.7	84.1	185.4	2.20	5
G7-1	250 × 250	D19	2	3	1.09	300	34.7	56.1	156.7	2.79	5
G7-2											6
G8-1	200 × 200	D25	2	2	3.17	300	34.7	101	153.3	1.52	6
G9-1	200 × 200	D25	2	3	3.17	300	34.7	67.3	131.4	1.95	5
G9-2											6
G10-1	200 × 250	D19	2	3	1.36	300	23.5	57.5	97.4	1.70	4
G10-2											5
G10-3											6
G10-4											7
G11-1	200 × 300	D22	2	2.7	1.55	500	23.6	94.9	177.6	1.87	3.13
G11-2											4.20
G11-3											5.05
G11-4											5.78
G11-5											6.42
G11-6											7.00
G12-1	200 × 300	D19	3	2.7	2.72	500	23.6	104.4	180.9	1.73	7.67
G13-1	200 × 400	D25	2		1.45			179.1	382.1	2.13	
G14-1	200 × 350	D25	2		1.69			150.6	299.3	1.99	
G15-1	200 × 400	D22	2		1.84			223.4	714.0	3.20	
G16-1	200 × 370	D25	2		1.58			162.0	355.2	2.19	

る。特に、終局限界状態における最大支点反力を耐衝撃設計上の重要な指標として用いているが、多様な限界状態に対応可能な設計式とするためには、各種 RC 梁の各限界状態に対して固有の支点反力を厳格に規定する必要がある。しかしながら、支点反力は試験体の静的曲げ耐力（断面寸法、鉄筋比、純スパン長など）によって変動するばかりでなく、同じ試験体でも入力エネルギーの大きさに対応して変動する。このため、各種 RC 梁の各限界状態に対応した支点反力を厳格に規定することは事実上不可能である。

一方、構造物の設計法として性能照査型設計法への移行が各分野で精力的に進められている。性能照査型設計法では、幾つかの限界状態を設定し、その状態に対応する規定値を設け、構造物がその規定値を満足

するか否かを照査する必要がある。RC 梁の限界状態は、例えば、使用限界や修復限界状態を考えれば、ひび割れ発生の有無やひび割れ幅および残留変位量などで規定できると考えられる。一方、RC 梁の終局限界状態は、板部材と異なり主として全体破壊を考慮すれば良く、曲げが卓越する状況下では残留変位や残留変位率（残留変位の純スパン長に対する比）で規定できるものと考えられる。この様に、残留変位や残留変位率は、RC 梁に対して多様な限界状態を設定し、その状態を明確に規定する上で大変便利な指標である。上記観点で、終局限界状態のみを設定して提案した既往の式は、残留変位を用いてはいるものの性能照査型設計法への対応が難しく、新しい合理的な設計式の提案が必要であるものと考えられる。



図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

そこで本研究では、性能照査型耐衝撃設計法の確立に資することを目的に、平成 11 年から著者らが実施してきた曲げ破壊が卓越する RC 梁の単一衝撃荷重実験の結果を統一的に取りまとめた。また、整理、統合した実験結果を基に、曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃性に普遍的な影響を及ぼす指標を抽出し、さらにその影響度を明確にして、比較的広範囲な限界状態に対応可能な性能照査型耐衝撃設計法に資する設計式を提案したので報告するものである。

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

検討に用いた実験は、平成 11 年から 17 年までに著者らが実施したもので、全て RC 梁に単一衝撃荷重実験を行ったものである。表－１に試験体の一覧を示す。試験体は、断面幅が 150 mm から最大で 250 mm、高さは 200 mm から最大で 400 mm、純スパン長は 2 m から最大で 3 m である。主鉄筋比は、0.8 % から最大で約 3.2 % であり、試験体の計算静的曲げ耐力は 38

kN から最大で 223 kN 程度である。なお、いずれの試験体もせん断余裕度（計算せん断耐力/計算曲げ耐力）は 1.5 を上回り、静的には曲げ破壊に至る試験体である。なお、実験に用いた重錘の質量は、300, 400, 500 kg であり、衝突速度は 3.1 m/s から最大で 7.7 m/s 程度である。試験体の静的曲げ耐力に応じて、重錘の質量や落下高さ（衝突速度）を変化させた。なお、入力エネルギーの範囲は 2.4 kJ から 14.7 kJ 程度であり、前述したように終局限界状態を規定せず、無作為に設定している。

試験体名は、実施した実験ごと（試験時期や試験体の断面寸法および純スパン長ごと）にグループ分けし、同じグループの場合は衝突速度の小さい順に - 以降の数字を付記して分類している。なお、G1 は同じ条件での実験のため、末尾の S の有無で分類した。また、G2 は、重錘の質量が 300 kg と 400 kg の 2 ケースで実験しているため、400 kg の場合を G2L と表記することで分類している。試験体数は全 16 グループ、総計 36 体である。

図－１に試験体の概要を示す。上段は断面図、下段

表－２ コンクリート及び主鉄筋の力学的特性

試験体名	コンクリート				鉄筋		
	材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	名称	鋼材種	降伏強度 (MPa)
G1	10	33.7	21.3	0.19	D19	SD345	379
G2,G2L	26	32.2	22.9	0.17	D13	SD345	373
G3	13	34.6	25.0	0.23	D13	SD345	393
G4	26	32.3	20.9	0.17	D13	SD345	373
G5	11	39.2	28.3	0.18	D19	SD345	379
G6	88	34.7	25.7	0.21	D19	SD345	392
G7					D25	SD345	383
G8							
G9							
G10	47	23.5	20.0	0.26	D19	SD345	404
G11	23	23.6	-	-	D22	SD345	380
G12					D19	SD345	380
G13					D25	SD345	380
G14							
G15					D22	SD345	380
G16					D25	SD345	380



写真－１ 実験状況

は側面図である。何れの試験体も張出し部分が衝撃応答に影響を与えないように極力短くすることとし、上下端の主鉄筋は端部定着鋼板に溶接固定し、定着長を縮減している。また、各試験体でせん断余裕度が1.5を上回るようにするためにスターラップを適宜配置している。なお、全ての試験体において主鉄筋の抜け出しが無く、鉄筋が鋼板に十分定着されていることを確認している。

2.2 実験方法及び測定項目

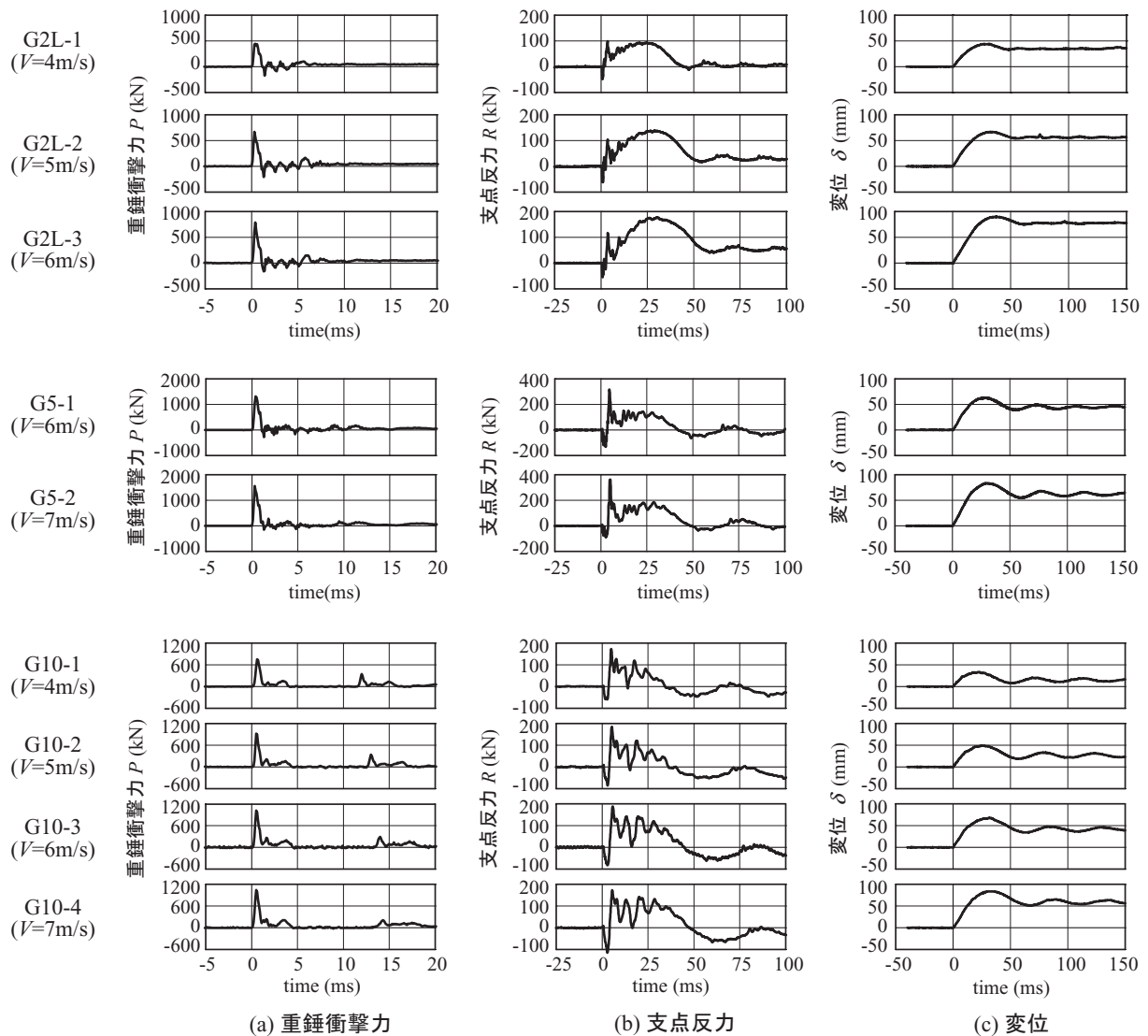
単一衝撃荷重載荷実験は、写真－１に示す重錘落下衝撃実験装置を用い、所定の質量の重錘を所定の高さから一度だけ梁のスパン中央に自由落下させて行っている。なお、支点部の上下縁で鋼製治具を用いて試験体を拘束し、重錘の衝突による試験体の跳ね上がりを防止している。治具全体は回転を許容し、ピン支持に近い状態となっている。用いた鋼製重錘は質量にかかわらず載荷部直径が150 mmの円柱状であり、その底部は片当りを防止するために2 mmのテーパを有する球面状となっている。

測定項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力 P 、支点治具に内蔵された起歪柱型ロードセルによる合支点反力 R （以後、支点反力と称する）及び非接触式レーザ変位計による載荷点変位 δ の応答波形である。なお、載荷点変位は梁側面の梁高さ中心点で測定している。

重錘衝撃力及び支点反力測定用ロードセルの容量と応答周波数は各々1,470 kN、DC～4.0 kHz、900 kN、DC～2.4 kHzであり、レーザ式変位計の容量と応答周波数は200 mm、915 Hzである。各種応答波形はサンプリングタイム0.1 msでデジタルデータレコーダにて一括収録している。なお、重錘衝撃力波形は高周波成分が卓越するため原波形を用い、支点反力及び変位波形には低周波成分が卓越するため、ノイズ処理として0.5 msの矩形移動平均法により平滑化を行っている。

2.3 材料の力学的特性

表－２に用いたコンクリート及び主鉄筋の力学的特



図－２ 重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位波形

性を示す。コンクリートの圧縮強度は、試験体の製作時期が異なるため差異があり、最低で 23.5 MPa、最大で 39.2 MPa である。なお、主鉄筋には異形鉄筋 D13 ～ D25 を用いたが、降伏強度は概ね 370 MPa ～ 400 MPa であり、試験体間の差異は少ない。なお、表－1 に示す計算静的曲げ耐力は、上記の材料試験結果を用い、断面分割法によって圧縮縁が $3,500 \mu$ となった状態を終局として算出している。また、せん断耐力は上記材料試験結果を用いてコンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算出している。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位波形

図－２に RC 梁試験体の重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位波形の例として、断面寸法、純スパン長、重錘質量などが異なる G2L、G5、G10 試験体の結果を

示す。

重錘衝撃力波形の外観は各グループで大略同様であり、衝撃初期の立ち上がりが急激で振幅が大きく継続時間の短い正弦半波と、その後に継続時間が第 1 波目よりも長く、振幅の小さい第 2 波目が生じている。なお、G10 では、12 ～ 15 ms 経過後に再度重錘衝撃力が増加し、重錘と試験体が再衝突したことがうかがわれる。

支点反力波形は、各グループともに正弦半波状の波形が主体であるものの、その波形に継続時間の短い高周波成分が合成される状況は各試験体で多少異なっている。G2L 試験体では、衝撃初期の振幅よりも 25 ～ 30 ms 経過後の振幅の方が大きく、この傾向は衝突速度が大きくなるにつれて明瞭となっている。また、衝突速度の増加に対応して支点反力は増加する傾向にある。一方、G5 試験体も正弦半波状の波形が主体であるが、衝撃初期の振幅が最も大きく、その振幅は衝突

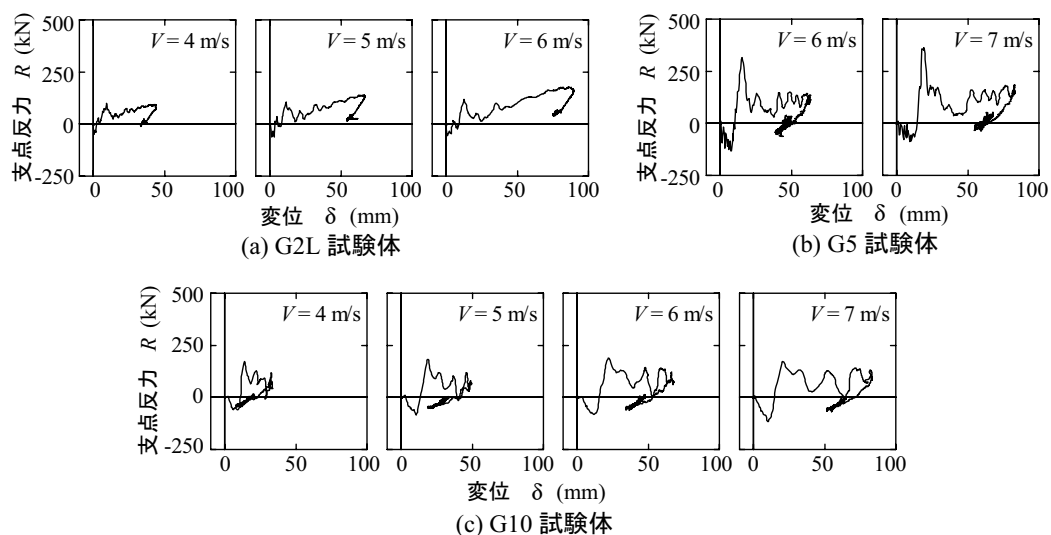


図-3 支点反力-载荷点変位関係

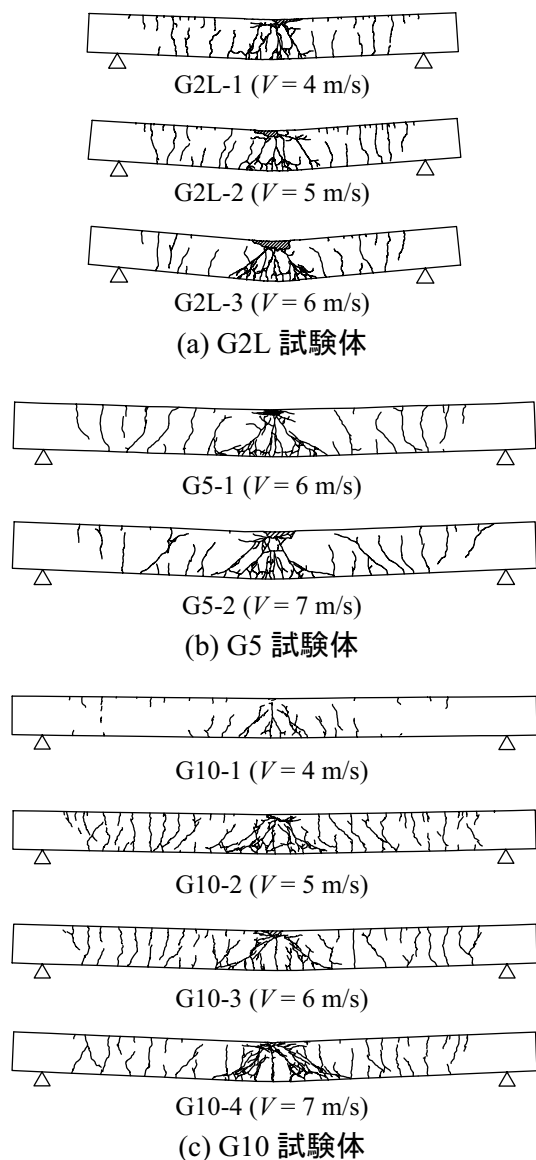


図-4 実験終了後におけるひび割れ性状

速度の増加に対応して増大する傾向にある。なお、衝撃初期の支点反力は、それ以降の継続時間の長い波形部分の支点反力の2倍以上大きい。

G10 試験体も G5 試験体と類似の波形性状を示すが、G5 試験体に比べて継続時間の短い高周波成分が卓越している。また、部分的に大きく除荷され、15 ms 程度経過した時点では支点反力がほぼ零となっている。波形の振幅は衝突速度に関わらず衝撃初期に最も大きく、40～50 ms 経過時点以降では負の支点反力が生じている。なお、支点反力の最大値は、衝突速度に関わらずほとんど変化していない。

このように、支点反力波形の性状は各試験体で異なることが分かる。これは、各グループで静的曲げ耐力が異なり、同じグループでも入力エネルギーが異なるため、RC 梁の損傷状況や損傷程度が異なるためと考えられる。

载荷点変位波形の外観は各試験体で大略同様であり、正弦半波状の主波動を示した後、変位が残留していることが分かる。各グループとも残留変位は衝突速度の増加に対応して増大する傾向にある。なお、G2L 試験体では残留変位波形に振動状態が見受けられず、梁は完全に塑性化していることが分かる。一方、G5、G10 試験体では変位が残留しているものの振動状態を示していることから、G2L 試験体に比べて損傷程度は軽微であることがうかがわれる。

3.2 支点反力-载荷点変位関係

図-3 に支点反力と载荷点変位の関係を G2L、G5、G10 試験体を例に示す。前述したように、各試験体の支点反力波形に特徴があるため、支点反力-载荷点変位関係の外観も各試験体で異なっている。G2L 試験体では、 $V = 4 \text{ m/s}$ 载荷ではほぼ台形状を示すものの、衝突速度が大きくなると変位の増加に対応して支点反

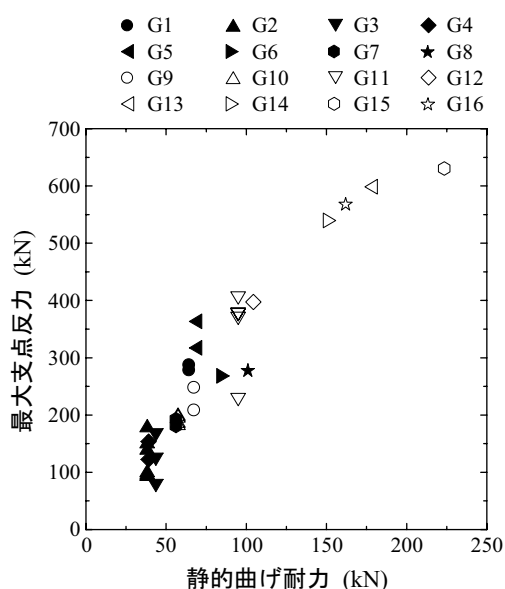
表－3 実験結果の一覧

試験体名	衝突速度 V (m/s)	落下高さ h (m)	入力エネルギー (KJ)	残留変位 δ_{rs} (mm)	最大変位 D (mm)	最大重錘 衝撃力 P (kN)	最大 支点反力 (kN)	耐力比	残留 変位率
G1-1	7	2.50	7.35	47.3	64.3	1495.6	278.5	4.34	0.016
G1-1S			7.35	41.6	58.0	1600.6	287.6	4.48	0.014
G2-1	4	0.82	2.40	19.5	28.3	510.2	95.3	2.49	0.010
G2-2	5	1.27	3.75	34.5	44.0	779.3	92.9	2.43	0.017
G2-3	6	1.83	5.40	46.2	57.0	853.5	149.6	3.91	0.023
G2L-1	4	0.82	3.20	34.6	44.2	446.6	99.0	2.59	0.017
G2L-2	5	1.27	5.00	56.6	66.8	668.4	138.8	3.63	0.028
G2L-3	6	1.83	7.20	79.5	89.7	786.9	177.9	4.65	0.040
G3-1	4	0.82	2.40	28.9	36.7	1208.5	80.6	1.85	0.014
G3-2	5	1.27	3.75	43.6	52.0	1469.5	126.4	2.90	0.022
G3-3	6	1.83	5.40	60.6	70.6	1038.6	169.0	3.88	0.030
G4-1	4	0.82	2.40	30.9	39.7	800.3	122.5	3.13	0.015
G4-2	5	1.27	3.75	45.2	56.1	985.8	153.6	3.93	0.023
G5-1	6	1.83	7.20	43.9	63.5	1313.2	317.2	4.55	0.015
G5-2	7	2.50	9.80	62.5	83.4	1557.1	363.3	5.21	0.021
G6-1	5	1.27	3.75	16.0	26.4	1335.9	268.4	3.19	0.008
G7-1	5	1.27	3.75	27.8	45.8	1242.8	181.1	3.23	0.009
G7-2	6	1.83	5.40	40.7	60.9	1588.3	192.8	3.44	0.014
G8-1	6	1.83	5.40	21.2	36.5	1192.1	277.5	2.75	0.011
G9-1	5	1.27	3.75	20.8	43.2	931.2	208.6	3.10	0.007
G9-2	6	1.83	5.40	31.3	57.9	1102.7	248.2	3.69	0.010
G10-1	4	0.82	2.40	14.0	33.7	750.7	173.3	3.23	0.005
G10-2	5	1.27	3.75	26.5	49.5	922.3	183.6	3.44	0.009
G10-3	6	1.83	5.40	39.5	67.8	1016.9	188.3	3.39	0.013
G10-4	7	2.50	7.35	58.0	83.9	1042.3	172.7	3.16	0.019
G11-1	3.13	0.50	2.45	8.9	20.5	702.8	230.8	2.43	0.003
G11-2	4.20	0.90	4.41	19.2	33.2	971.0	380.0	4.00	0.007
G11-3	5.05	1.30	6.38	28.1	43.1	1461.5	372.4	3.92	0.010
G11-4	5.78	1.70	8.34	39.1	55.5	1877.8	379.0	3.99	0.014
G11-5	6.42	2.10	10.30	49.4	67.2	1764.8	379.3	4.00	0.018
G11-6	7.00	2.50	12.26	58.8	83.4	1906.6	408.1	4.30	0.022
G12-1	7.67	3.00	14.72	63.7	85.4	1675.0	397.5	3.81	0.024
G13-1				31.0	60.6	2150.0	598.7	3.34	0.011
G14-1				35.0	63.7	2258.1	539.6	3.58	0.013
G15-1				26.5	40.5	2062.9	630.4	2.82	0.010
G16-1				35.8	52.9	2022.6	567.7	3.50	0.013

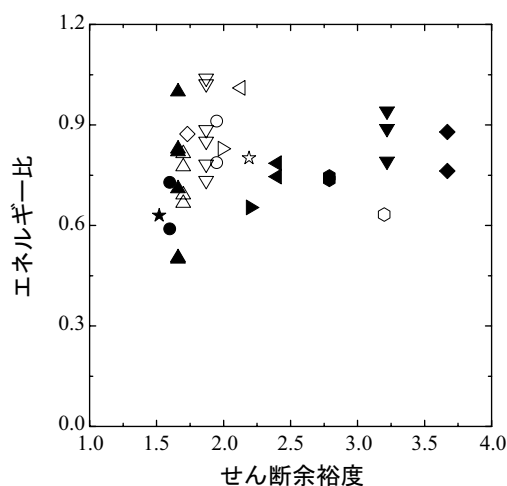
力が増大する傾向を示している。これは、G2L 試験体では衝突後 25 ms 程度経過した時点で支点反力が最大となるためである。なお、最終段階でも支点反力が零になっていないのは、大変形によって支点治具が回転し、試験体を拘束したままの状態になっているためと推察される。一方、G5 試験体では、衝撃初期に負の支点反力が生じた後急激に支点反力は増大し、短い継続時間の後反力は大きく減少してほぼ同程度の値を示すとともに変位が大きく増加した後徐荷されている。この変位が増加する部分のみを取り上げると、ほぼ台形状の分布であり、この状況下での支点反力は衝撃初期の支点反力の 1/3 から 1/2 程度である。

G10 試験体では、衝突速度が低い場合は三角形状を

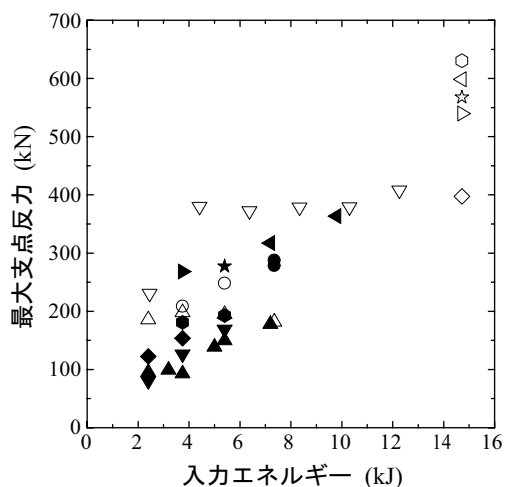
示し、衝突速度が大きくなると、G5 試験体と比較的類似した性状を示している。ただし、載荷途中で支点反力は一旦零となり、再度支点反力及び変位が増加している。この再載荷状態は、前述したように重錘の再衝突によるものと思われる。また、G5 試験体の場合に比較して衝撃初期に急増した支点反力とそれ以降の支点反力の差異は大きくない。このように、載荷点変位－支点反力の関係は試験体によって異なり、特に支点反力の最大値が生じる変位レベルが試験体によって異なることは極めて重要な相違点であると考えられる。以上のことから、多様な試験体、多様な入力エネルギー、多様な損傷状態の基では、支点反力の最大値で RC 梁の耐衝撃性を統一的に議論することは困難で



図－5 静的曲げ耐力と最大支点反力の関係



図－6 せん断余裕度とエネルギー比の関係



図－7 入力エネルギーと最大支点反力の関係

あるものと考えられる。

3.3 ひび割れ状況

図－4 にひび割れ状況の例として，G2L，G5，G10 試験体のひび割れ図を示す。何れの試験体も荷重点直下近傍には多くの曲げひび割れが発生し，特に G2L 試験体では，梁の圧縮縁である荷重点部の損傷が衝突速度の増大とともに顕著となり， $V = 6 \text{ m/s}$ 荷重では大きく角折れしていることが分かる。また，何れのグループも衝突速度が大きくなると，荷重点直下近傍に斜め 45° のひび割れが顕在化し，円錐状に押し抜ける兆候が見られる。なお，G10 試験体では， $V = 4 \text{ m/s}$ 荷重と 5 m/s 荷重でひび割れ性状が大きく異なるものの，それ以降の衝突速度における差異は上記の円錐状ひび割れの顕在化を除いて顕著ではない。

3.4 各種最大応答値

(1) 実験結果の一覧

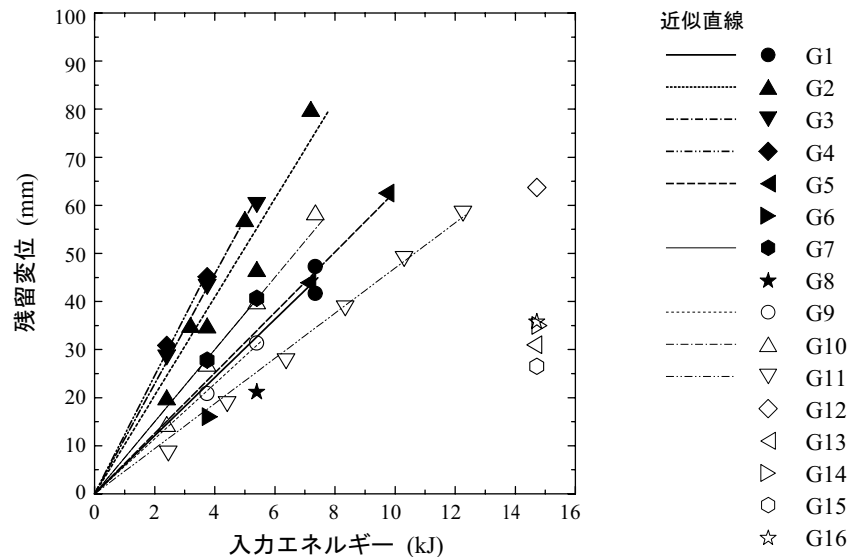
表－3 に実験結果の一覧を示す。ここでは，残留変位，最大応答変位，最大重錘衝撃力，最大支点反力，耐力比及び残留変位率に関して取りまとめている。全試験体の耐力比は最大で 5.2 程度であった。なお，本論文では試験体の限界状態にかかわらず，励起された最大支点反力を静的曲げ耐力で除した耐力比で整理している。このため，終局限界状態に限定した実験結果に基づく既往の研究⁴⁾における耐力比とは，その意味が異なることに留意が必要である。耐力比の最大値は G5 試験体で生じているが，これは図－2, 3 に示したように，衝撃初期に極めて大きな支点反力が発生したためである。一方，残留変位率は 0.3 % から最大で 4 % であり，一部の試験体では十分に終局限界状態に至っていることが分かる。

(2) 静的曲げ耐力と最大支点反力の関係

図－5 に静的曲げ耐力と最大支点反力の関係を示す。同じグループの試験体でも，入力エネルギーによって最大支点反力が異なることが分かる。また，全般的に静的曲げ耐力が大きいグループほど最大支点反力が大きくなる傾向にある。すなわち，最大支点反力は RC 梁の全般的な耐衝撃性を検討する上で重要な指標であることは明らかである。しかしながら，前述のように，多種多様な試験体，多様な入力エネルギー，多様な損傷状態の基では，最大支点反力で RC 梁の耐衝撃性を統一的に評価することはできないことに留意する必要がある。

(3) せん断余裕度とエネルギー比の関係

図－6 にせん断余裕度とエネルギー比の関係を示す。終局限界状態に限定した既往の研究⁴⁾から，せん断余裕度が大きくなるとより曲げ破壊型となり，梁の全体変形によるエネルギー吸収量が増加してエネルギー比（吸収エネルギーの入力エネルギーに対する



図－8 入力エネルギーと残留変位の関係

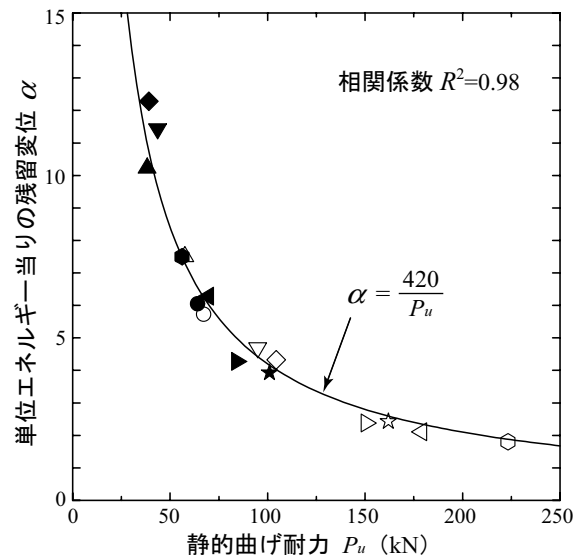
比)が増大することが明らかになっている。図から、全般的な傾向として、同じグループの試験体でも入力エネルギーによってエネルギー比が異なることが分かる。なお、エネルギー比は概ね 0.5 から 1.0 程度の範囲にあり、せん断余裕度との関係は明瞭ではない。これは、本研究は既往の研究と異なり、試験体の損傷程度が必ずしも終局限界状態に統一されていないためと考えられる。

(4) 入力エネルギーと最大支点反力、残留変位の関係

図－7 に入力エネルギーと最大支点反力の関係を示す。図より、最大支点反力がほぼ線形に増加するグループ (G10, G11 を除くグループ) と入力エネルギーに関わらずほぼ一定値を示すグループ (G10 及び G11) があることが分かる。このように、最大支点反力は重要な指標であるものの、全ての試験体を統一的に評価可能な指標ではないことが分かる。

なお、G10 及び G11 試験体の入力エネルギーと最大支点反力の関係が他の試験体と異なるのは、何れもコンクリートの圧縮強度が 24 MPa 以下と小さいために曲げ剛性が小さく、他の試験体が全て 32 MPa 以上と大きいために曲げ剛性が大きく、この曲げ剛性の差異が最大支点反力の大きさに影響を及ぼしたためと推察される。

図－8 に入力エネルギーと残留変位の関係を示す。各試験体ともに入力エネルギーが増加することで残留変位はほぼ線形に増大する傾向を示し、この傾向は最大支点反力が入力エネルギーに関わらずほぼ一定であった G10, G11 試験体でも明瞭に認められる。このように、入力エネルギーと残留変位の関係には極めて高い相関があり、試験体の種類や入力エネルギーの大小、言い換えれば損傷の状況や損傷程度に関わらず、極めて普遍性の高い関係であることが分かる。なお、



図－9 静的曲げ耐力と α の関係

図－8 に示した直線は、各試験体グループの入力エネルギーと残留変位関係を直線近似した結果であり、残留変位 δ は近似直線の勾配を α とし、入力エネルギーを E とすると式 (1) で与えられる。

$$\delta = \alpha \cdot E \quad (1)$$

ここで、 δ : 残留変位 (mm), E : 入力エネルギー (kN・m) である。すなわち、勾配 α は単位エネルギー当りの残留変位に関与する N^{-1} の単位を有する指標である。

(5) 性能照査型耐衝撃設計法に適用可能な設計式の提案

図－8 より、直線勾配 α は全般的に静的曲げ耐力が大きな試験体ほど小さい傾向にあることが分かる。そ

ここで、静的曲げ耐力と入力エネルギー-残留変位関係のなす直線勾配 α の関係を図-9 に示す。図より、各試験体グループの静的曲げ耐力と直線勾配 α には高い相関が認められる。ここで、その近似曲線を求めると直線勾配 α は静的曲げ耐力の逆数に比例し、以下の式で表すことができる。

$$\alpha = 420/P_u \quad (2)$$

ここで、 P_u ：静的曲げ耐力 (kN)
式 (1) と式 (2) を用いて整理すると、式 (3) が得られる。

$$P_u = 0.42 \cdot E/\delta \quad (3)$$

ここで、 P_u ：静的曲げ耐力 (kN)、 E ：入力エネルギー (kN・m)、 δ ：残留変位 (m) である。

すなわち、想定する入力エネルギーに対して、残留変位を各種の限界状態に対応して規定すると、その規定値を満足する RC 梁は式 (3) より得られる静的曲げ耐力を有する RC 梁を設計することで設計可能となる。ここで、著者らの既往の提案式を以下に示す。

$$P_u = (1/3) \cdot E/\delta \quad (4)$$

新しい提案式 (3) の構成は、著者らの既往の提案式 (4) と同様であり、比例定数が 1/3 から 0.42 に増加したことが分かる。すなわち、既往の提案式よりも設定した入力エネルギー及び残留変位に対して、より静的曲げ耐力の大きな梁を設計する必要があることが分かる。なお、比例定数が増加した要因として、本論文での試験体の断面寸法や純スパン長が既往の研究⁴⁾よりも全般的に大きく、用いた重錘質量も全般的に重いことが考えられる。

同時に式 (3) は、終局限界状態のみならず、比較的広範囲な限界状態に対しても適用可能な設計式であり、性能照査型設計法の確立に資する提案式と考えられる。今後は、より大きな実大規模 RC 梁への適用性を検討し、さらなる適用範囲の拡大に努めることが肝要であると考えられる。

4. まとめ

衝撃载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の確立に資するため、著者らが実施した断面寸法、主鉄筋量、純スパン長を変化させた 36 体の RC 梁の単一衝撃载荷実験結果を統一的に整理した。なお、入力エネルギーは重錘の質量を 300 kg ~ 500 kg、衝突速度を 3.1 m/s ~ 7.7 m/s 程度にまで変化させ、RC 梁の限界状態を規定せずに 2.4 kJ ~ 14.7 kJ 程度にまで無作為に設定した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 本実験で用いた RC 梁のせん断余裕度は 1.5 以上

であり、試験体は全て単一衝撃载荷時に曲げ破壊型の挙動を示した。

- 2) 支点反力波形や支点反力-载荷点変位関係は、試験体グループや入力エネルギーの大きさによって変化する。また、支点反力の最大値が生じる経過時間は試験体グループによって異なり、静的曲げ耐力や入力エネルギーの異なる RC 梁試験体の支点反力の最大値は、耐衝撃性を損傷程度にかかわらず統一的に評価できる指標ではない。
- 3) 全試験体で入力エネルギーと残留変位は線形関係にあり、高い相関が認められた。また、直線の勾配は静的曲げ耐力の逆数と高い相関関係にあることが明かとなった。
- 4) 上記関係を基に、既往の提案式と同様に入力エネルギーと残留変位を規定し、その規定値に対応した静的曲げ耐力を有する RC 梁を設計することで、耐衝撃設計が可能となる新しい設計式を提案した。
- 5) 提案式は、静的曲げ耐力を P_u (kN)、入力エネルギーを E (kN・m)、残留変位を δ (m) とすると、以下のように示される。

$$P_u = 0.42 \cdot E/\delta$$

本提案式は既往の式と異なり、実験室レベルでの多様な RC 梁の比較的広範囲な入力エネルギーに対応可能であり、性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計式と考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、防衛庁技術研究本部陸上装備研究所技官の安藤智啓氏に貴重なご意見を頂きました。また、論文の取りまとめにあたり、室蘭工業大学博士研究員の澤田純之君を始め、構造力学研究室の諸君に多大なるご支援を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法，1996
- 2) 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
- 3) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004
- 4) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静载荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.177-190，2000.4
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002

(2006 年 9 月 11 日受付)