室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

せん断破壊型軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性に及ぼすPVA短繊維混入率の影響

メタデータ	言語: jpn 出版者: 土木学会 公開日: 2012-03-16 キーワード (Ja): 軽量RC梁, PVA短繊維, 衝撃載荷実験, 耐衝撃性 キーワード (En): light-weight RC beam, Vinylon (PVA) short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity 作成者: 三上, 浩, 岸, 徳光, 栗橋, 祐介, 竹本, 伸一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/931

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

せん断破壊型軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性に及ぼすPVA短繊維混入率の影響

その他（別言語等）のタイトル	Influence of mixed PVA short-fiber ratio on impact resistant capacity for light-weight shear failure type RC beams
著者	三上　浩, 岸　徳光, 栗橋　祐介, 竹本　伸一
雑誌名	構造工学論文集. A
巻	52
ページ	1237-1248
発行年	2006-03
URL	http://hdl.handle.net/10258/931

せん断破壊型軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性に及ぼすPVA短繊維混入率の影響

Influence of mixed PVA short-fiber ratio on impact resistant capacity for light-weight shear failure type RC beams

三上　浩*，岸　徳光**，栗橋　祐介***，竹本　伸一****
Hiroshi Mikami, Norimitsu Kishi, Yusuke Kurihashi and Shin-ichi Takemoto

*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)
**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)　北海道開発土木研究所研究員　材料研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)
****博(工)　ドーピー建設工業（株）北海道本店統括部長(〒061-0001 札幌市中央区北1条西6丁目)

In order to investigate the upgrading effects of impact resistant capacity for light-weight shear failure type RC beams due to mixing Vinylon (PVA) short-fiber, static and falling-weight impact tests were conducted taking a mixed short-fiber ratio V_f in volume as variable. Here, the impact test was conducted using a 300 kg falling steel weight. The results obtained from this study are as follows; 1) static and dynamic shear capacities for light-weight RC beam were smaller than those of ordinary RC beam; 2) static and dynamic shear capacities for light-weight RC beam with 0.5 % mixed with short-fiber ratio in volume were almost equal to those of ordinary RC beam; 3) static and dynamic shear capacities for light-weight RC beam increased corresponding to increment of mixed short-fiber ratio V_f, those capacities for light-weight RC beam with 1.5 % mixed short-fiber ratio showed more than 2 times and almost 1.7 times those for light-weight RC beam without mixed short-fiber and for ordinary RC beam respectively.

Key Words : *light-weight RC beam, Vinylon (PVA) short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity*

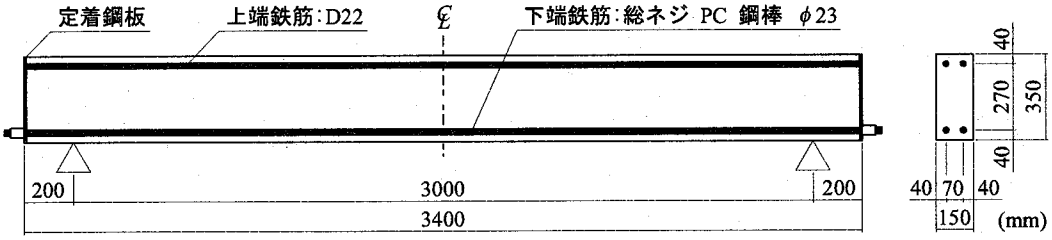
キーワード： 軽量RC梁，PVA短繊維，衝撃載荷実験，耐衝撃性

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート（RC）やプレストレストコンクリート（PC）製の橋梁等上部構造の軽量化にともなう下部構造の耐震性向上，建設コスト縮減をねらいとして，軽量コンクリートの適用が盛んに検討され[1)]，一部で実用化されている．しかし，軽量コンクリートは使用する軽量粗骨材の強度が小さいため，引張強度やせん断強度が普通コンクリートに比べて小さく，斜めひび割れや鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが発生しやすいことが知られている[2)]．そのため，軽量コンクリート製RC棒部材のせん断耐力は，普通コンクリートを用いた場合の70%に低減することが土木学会コンクリート標準示方書[3)]（以後，示方書）に規定されている．

軽量コンクリートや普通コンクリートの引張靭性能を改善するための方策として，近年，各種合成繊維を混入する方法が盛んに検討されている[4)~8)]．ポリビニルアルコール（PVA）短繊維（以後，短繊維）は，従来から用いられている鋼繊維に比べて軽量かつ耐食性に優れ，また練混ぜ時にミキサーに損傷を与える危険性が少なく，施工時の踏み抜きによる怪我の心配もないなど，優れた特徴を有している．同時に，親水性があり，モルタルとの付着性に優れているため，ひび割れを架橋してコンクリートの引張靭性能を改善することが期待できる．

著者らはこのような観点から，軽量コンクリートにPVA短繊維を混入する方法に着目し，RC梁の静的・衝撃耐荷性状を検討してきた[9)]．特に軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて引張強度やせん断強度が小さいため，普通コンクリートよりも短繊維混入の効果が大きく出現するものと期待される．既往の研究[9)]から，PVA短繊維混入によって静的せん断耐力が増大し，無混入時にせん断破壊した軽量コンクリート製RC梁が曲げ破壊に移行すること，衝撃載荷時には吸収エネルギーが飛躍的に増大し，同一の断面寸法，配筋量で数倍も耐衝撃性に優れるRC梁を構築できること，などが明らかとなっている．しかしながら，静的・衝撃載荷実験において，1%以下の体積混入率（以後，混入率）でせん断破壊が抑制されたため，短繊維混入率とせん断耐力増分の関係を明確にすることはできなかった．また，普通コンクリート梁との衝撃耐荷性状



図－1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表－1 試験体の一覧

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (vol. %)	コンクリートのの圧縮強度 (MPa)	計算せん断耐力 (kN)	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断余裕度	載荷方法	衝突速度 V (m/s)
N-0-S	普通	0	29.8	93.8	242.0	0.39	静的	-
LW-0-S	軽量		31.1	66.6	247.2	0.27		
LW-0.5-S		0.5	31.4	66.8	248.0	0.27		
LW-1.0-S		1.0	35.1	69.3	261.3	0.27		
LW-1.5-S		1.5	34.8	69.1	260.4	0.27		
N-0-IS-n	普通	0	29.8	93.8	242.0	0.39	衝撃(単一)	3, 3.5, 4, 4.5
LW-0-IS-n	軽量		31.1	66.6	247.2	0.27		2, 2.5, 3, 3.5
LW-0.5-IS-n		0.5	31.4	66.8	248.0	0.27		3.5, 4, 4.5, 5
LW-1.0-IS-n		1.0	35.1	69.3	261.3	0.27		4.5, 5, 5.5, 6
LW-1.5-IS-n		1.5	34.8	69.1	260.4	0.27		5, 5.5, 6, 6.5

の比較も同程度の圧縮強度を有するコンクリートを用いた RC 梁では実施されていなかった．

以上のことから，本研究では梁の形状寸法や配筋を工夫し，1.5 % までの混入率においても静的・衝撃載荷時にせん断破壊に至るように試験体を計画し，PVA 短繊維混入率が静的，動的せん断耐力の増大や耐荷性状に与える影響を検討した．また，同等の圧縮強度を有する普通コンクリート製 RC 梁と静的・衝撃耐荷性状を比較し，どの程度の混入率で軽量コンクリート梁が普通コンクリート梁と同程度の静的・衝撃耐荷性能を発揮できるかを明らかにすることとした．

2. 実験概要

2.1 RC 梁の形状寸法および実験方法

図－1 に全ての RC 梁で共通な形状寸法および配筋状況を示す．試験に用いた RC 梁の断面寸法（幅 × 高さ）は 15 × 35 cm，純スパン長は 3 m の複鉄筋矩形 RC 梁であり，せん断破壊を先行させるために，梁幅に対して梁高さを大きく設定した．また，下端鉄筋には曲げ耐力を増大させるために直径 23 mm の総ネジ PC 鋼棒を用い，スターラップは配置していない．なお，PC 鋼棒の定着を確保するため，RC 梁端面に定着用鋼版を配置し，PC 鋼棒をナットで締め込み定着固定している．

衝撃載荷実験は，跳ね上がり防止用治具付きの支点治具上に RC 梁をセットし，梁のスパン中央に鋼製の重錘を所定の高さから 1 回のみ自由落下させる単一衝撃載荷法とした．なお，支点治具全体は RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている．用いた重錘は，質量が 300 kg で載荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘で，その底部には衝突時の片当たりを防止するため高さ 2 mm のテーパが施されている．なお，重錘の衝突速度は，理論落下高さでの衝突速度を実測し，摩擦などによる減速分を考慮して落下高さを補正し，補正後の高さから重錘を自由落下させて，その際の衝突速度を実測して確認する，という方法で目標とする衝突速度での載荷を可能としている．

計測項目は，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，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（以後，支点反力）と非接触式レーザ変位計による載荷点変位（梁側面の梁高さ中心点で測定）とした．

なお，重錘衝撃力およ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．

静的載荷実験は，衝撃載荷実験時の支点治具をその

表－2 各種コンクリートの配合

コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 (kg/m^3)			スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	AE剤	高性能減水剤	AE助剤		
普通	0	50.0	44.8	171	342	808	994	0.075	0	0	12.5	3.4
軽量	0	55.0	46.0	152	276	869	529	0	1.10	0	9.0	3.7
	0.5	52.6	48.5	165	314	884	486	0	1.26	0	13.5	3.9
	1.0	43.3	48.7	170	393	848	463	0	1.97	0	15.5	4.5
	1.5	40.7	50.1	175	430	850	439	0	2.37	3.44	14.5	4.9

表－3 コンクリートの力学的特性値

コンクリートの種類	短繊維混入率 (vol. %)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	比重
普通	0	29.8	19.8	0.2	2.2
軽量	0	31.1	20.5	0.3	1.8
	0.5	31.4	21.9	0.2	1.8
	1.0	35.1	21.2	0.2	1.8
	1.5	34.8	22.1	0.3	1.8

表－4 PVA 短繊維の寸法と材料特性値

密度 (g/cm^2)	長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

表－5 鋼材の力学的特性値

鉄筋種類	材質	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D22	SD345	398	206	0.3
G23	SBPD	1071		
D6	SD295A	334		

まま用い，RC 梁の浮き上がりを拘束せずにセットした後，幅 10 cm の厚鋼板をスパン中央にセットし，油圧ジャッキにて加力する方式で行った．なお，静荷重測定用ロードセルの容量は 200 kN であり，載荷点変位は，衝撃実験時と同様の変位計を用いて計測した．静的，衝撃載荷実験終了後には，RC 梁側面のひび割れをトレースし，ひび割れ分布図を作成している．

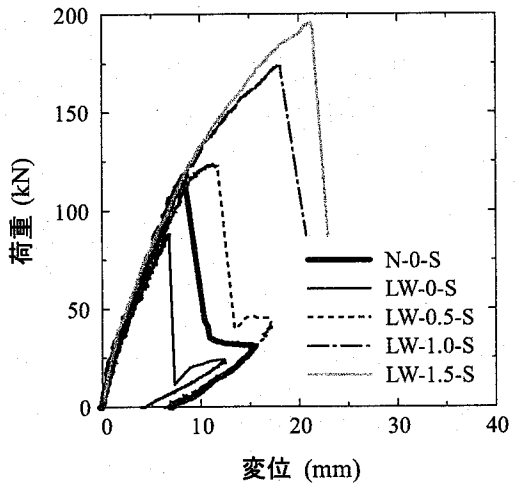
衝撃載荷実験時の各種応答波形は，サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている．また，重錘衝撃力波形は高周波成分が卓越することより原波形を用い，支点反力および変位波形には低周波成分が卓越することより，ノイズ処理のため 0.5 ms の矩形移動平均法により平滑化を施している．

2.2 試験体の構成および静的設計値

表－1 に本実験に用いた RC 梁の一覧を示している．RC 梁は普通コンクリート製（N- 梁）1 種と軽量コンクリート製（LW- 梁）4 種の合計 5 種類で，軽量コンクリート製の RC 梁では PVA 短繊維の混入率を 0 から 0.5 %きざみで最大 1.5 % としている．試験体名の LW-1.5 は軽量コンクリートを使用し，混入率が 1.5 % であることを示す．なお，試験体名の第 3 項目は載荷方法 (S: 静的載荷，IS:衝撃載荷) を示し，IS に続く数値は重錘の衝突速度 V (以後，衝突速度) を示している．各種 RC 梁は静載荷実験用に 1 体，単一衝撃載荷実験用に 4 体製作し，全試験体数は 25 体である．表には，使用したコンクリートの圧縮強度も併せて示した．本実験では，各種 RC 梁の計算せん断耐力を同程度にするため，普通コンクリートおよび各種軽量コンクリートの圧縮強度がほぼ同等になるように配合設計を行った．

表中の計算せん断耐力，計算曲げ耐力は示方書 [3] に準拠して算出した．ただし，LW- 梁の耐力は，短繊維の混入を無視して通常の軽量コンクリートとして算出している．なお，示方書で規定されているように，軽量コンクリートを用いた LW- 梁の計算せん断耐力は，普通コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力の 70 % として評価している．計算せん断耐力を計算曲げ耐力で除した計算せん断余裕度は，N- 梁で 0.4 程度，LW- 梁で 0.3 程度であり，1.0 を大きく下回っていることから，実験時にはせん断破壊が先行することが予想される．なお，本実験では，各種 RC 梁の弾塑性状態から終局状態に至るまでの衝撃耐荷性状を検討するため，各種 RC 梁で 4 種類の衝突速度を適宜設定している．なお，衝突速度とは，重錘が RC 梁に衝突する直前での速度である．

各種コンクリートの配合を表－2 に示す．軽量コンクリートでは，短繊維はいわば粗骨材に相当するものであることより，短繊維混入率 V_f が大きくなるほど強度低下やスランプ低下を抑制するために W/C を低下させ，s/a を増加させている．すなわち，V_f の増加とともにセメント量を増大させ，軽量粗骨材量を減少させた．なお，用いた軽量骨材は，焼成人工軽量骨材で，



図－2 荷重－スパン中央変位の関係

表－6 静載荷実験結果の一覧

試験体名	実測静的耐力 P_{us} (kN)	最大荷重時変位 δ (mm)	残留変位 δ_{rd} (mm)	最大主鉄筋歪 (μ)
N-0-S	118.1	8.6	7.0	1890
LW-0-S	87.9	6.9	4.1	1390
LW-0.5-S	123.3	11.1	6.3	1810
LW-1.0-S	173.8	18.1	9.4	2420
LW-1.5-S	195.7	21.2	15.0	3050

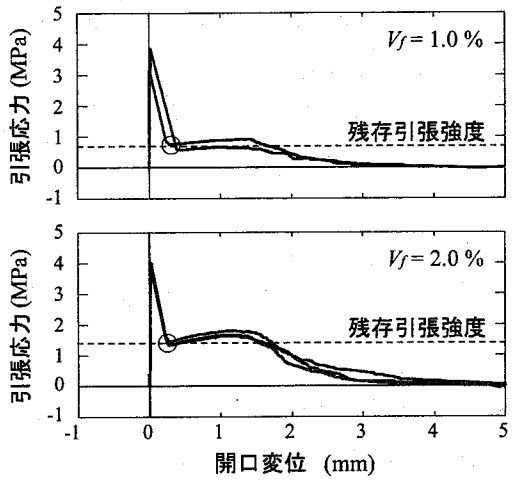
比重は 1.2，24 時間吸水率は 9 ～ 11 % と小さく，圧壊荷重は 1 kN 以上である．また，有害科学物質や塩分を含まず，アルカリ骨材反応が生じない等，従来の人工軽量骨材に比べて優れた品質を有している．各コンクリートのスランプの範囲は 9 ～ 16 cm，空気量の範囲は 3 ～ 5 % 程度であった．

表－3 ～ **5** に使用した材料の特性値を示す．軽量コンクリートの弾性係数は，V_f の大きさに関わらず 20 ～ 22 GPa であり，普通コンクリートと同程度であった．なお，比重は普通コンクリートの約 80 %である．使用した PVA 短繊維は，長さ 30 mm，アスペクト比 45 であり，**表－4** に示すように高引張強度，高破断歪を有している．なお，配合設計上の工夫などにより，練り混ぜ時にファイバーボールは全く形成されていない．下端鉄筋として用いた総ネジ PC 鋼棒 G23 の降伏強度は 1071 MPa であり，普通鉄筋の降伏強度の約 2.7 倍である．

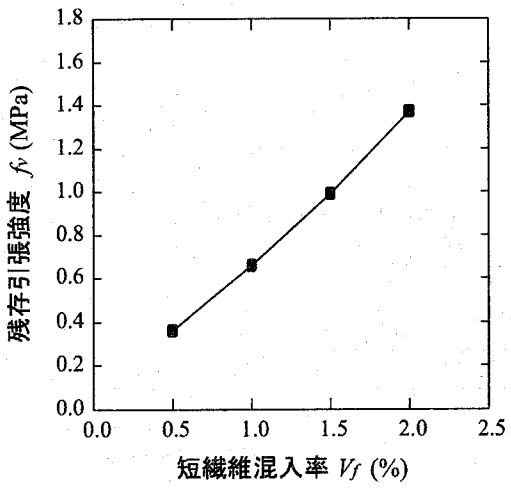
3. 静載荷実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

図－2 に静載荷実験時の荷重－スパン中央変位の関係を示す．また，**表－6** に静載荷実験結果を取りまとめた．**図－2** より，載荷途中までは全ての試験体でほ



図－3 普通コンクリートを用いた場合の残存引張強度 [10)]



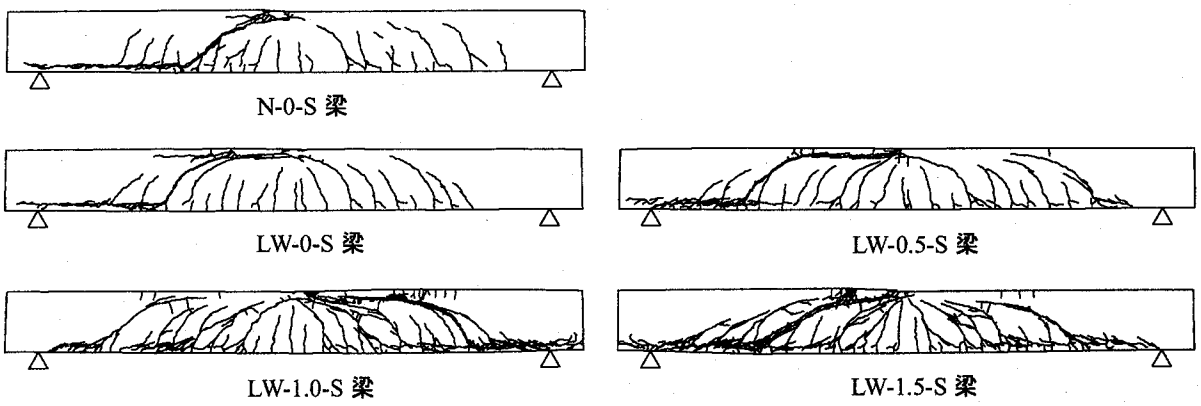
図－4 普通コンクリートを用いた場合の残存引張強度と短繊維混入率の関係 [10)]

ぼ同様の荷重－変位関係を示し，その後，荷重－変位のなす剛性勾配が多少低下して変位が増大した後荷重が急激に低下してせん断破壊していることがわかる．なお，短繊維を混入していない軽量コンクリートを用いた LW-0-S 梁の最大荷重は，普通コンクリートを用いた N-0-S 梁の 74 % 程度と小さい．これから，軽量コンクリート製 RC 梁のせん断耐力を普通コンクリート製 RC 梁の 70 % として評価する示方書の規定は妥当であるものと判断される．

短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 梁の最大荷重は，混入率の増加に対応して増大する傾向にあるが，特に 1 % を混入した LW-1.0-S 梁の荷重増加が顕著である．また，**表－6** から，最大荷重（せん断耐力）および最大荷重時変位，残留変位などの変形性能を併せて評価すると，普通コンクリート梁と同程度の静的耐荷挙動を示す軽量コンクリート梁は，短繊維混入率を 0.5 % とした LW-0.5-S 梁であることがわかる．な

表－7 静載荷実験結果と計算結果の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (vol. %)	コンクリートの残存引張強度 f_v (MPa)	計算せん断耐力のコンクリート分担分 V_c (kN)	計算せん断耐力の短繊維分担分 V_F (kN)	計算せん断耐力 V_{uc} (=V_c + V_F)	実測せん断耐力 P_{ue} (kN)	P_{ue}/V_{uc}
N-0-S	0	-	93.8	-	93.8	118.1	1.26
LW-0-S	0	-	66.6	-	66.6	87.9	1.32
LW-0.5-S	0.5	0.36	66.8	29.1	95.9	123.3	1.29
LW-1.0-S	1.0	0.66	69.3	53.4	122.7	173.8	1.42
LW-1.5-S	1.5	0.99	69.1	80.1	149.2	195.7	1.31



図－5 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

お，LW-1.5-S 梁のせん断耐力は，普通コンクリート梁の 1.7 倍，無混入の軽量コンクリート梁の 2.2 倍程度であった．

3.2 せん断耐力増分

短繊維の混入によるせん断耐力の増分は，著者らの既往の研究結果[10]から，一軸引張試験より得られる残存引張強度を基に下式を用いて算定できることが明らかとなっている．

$$V_F = 2 \times b \times (z / \tan\theta) \times f_v \cdots\cdots (1)$$

ここに，V_F：せん断耐力の短繊維分担分，b：ウェブ幅，$z = d/1.15$，d：有効高さ，θ：ひび割れ角度（安全側に 45° と仮定），f_v：短繊維混入コンクリートの残存引張強度

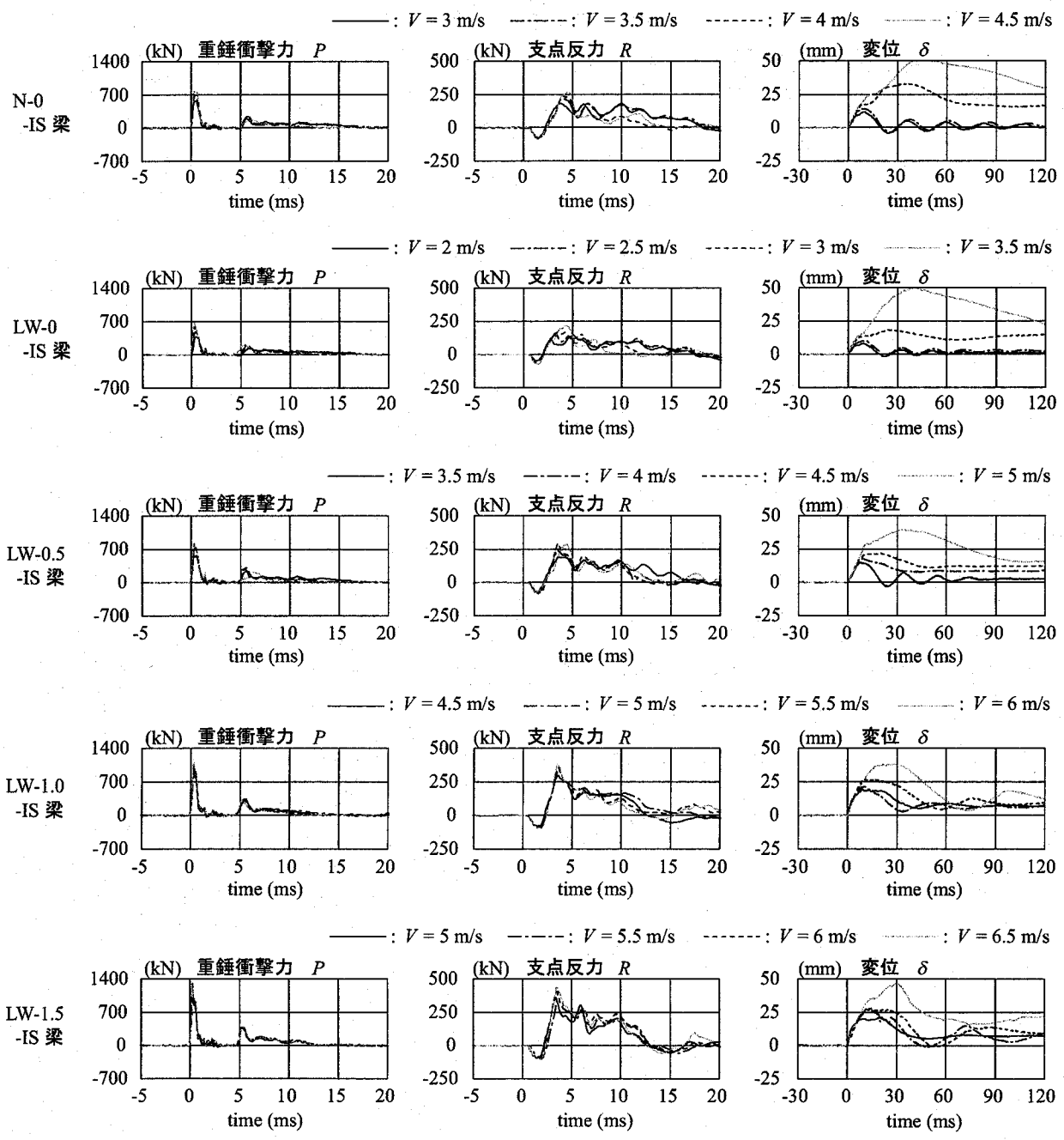
一例として，既往の研究から得られた普通コンクリートに短繊維を混入した場合の残存引張強度および短繊維混入率と残存引張強度の関係[10]を 図－3 および 図－4 に示す．

軽量コンクリートに短繊維を混入した場合の一軸引張試験は未だ実施されていないため，ここでは軽量コンクリートの残存引張強度と普通コンクリートのそれは同等であるものと仮定して軽量コンクリートに短繊維を混入した RC 梁のせん断耐力増分を求めた．これは，残存引張強度は，コンクリートにひび割れが発生した後の引張強度であり，残存引張強度の大半は短繊維が負担しているため，混入率が同等の場合はコンクリートの種類に関わらず，残存引張強度は同程度と推察されるためである．

上記の考え方を基にしたせん断耐力の計算値と実測値の比較を 表－7 に示す．ここで，軽量コンクリート梁の計算せん断耐力のコンクリート分担分は，示方書に準拠して普通コンクリートを用いた梁の 70 %としている．表－7 より，実測せん断耐力を計算せん断耐力で除した値は，コンクリートの種類や短繊維混入率に関わらず 1.3 ～ 1.4 程度であることがわかる．すなわち，本方法を用いることで，軽量コンクリートに短繊維を混入した梁のせん断耐力を普通コンクリートや短繊維を混入していない軽量コンクリートを用いた梁と同程度の安全率を有して評価可能であることが明らかとなった．

3.3 ひび割れ性状

図－5 に静載荷実験終了後における梁側面のひび割れ状況を示す．図－5 より，全 RC 梁の片側せん断区間にアーチ状あるいは斜め引張状のひび割れが大きく開口してせん断破壊していることがわかる．同時に下端 PC 鋼棒に沿った割裂ひび割れが認められ，載荷点



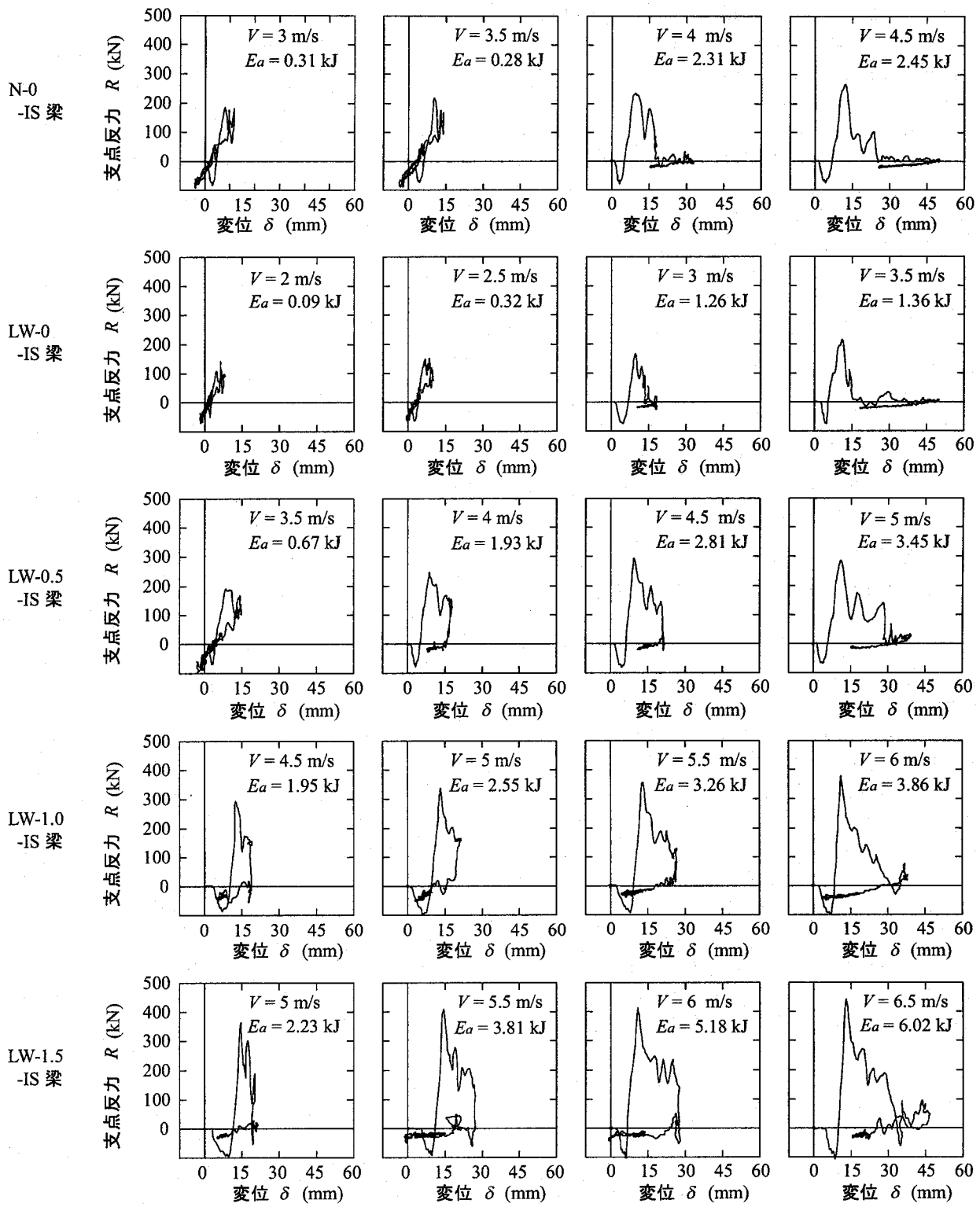
図－6 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

近傍では局所的に圧縮破壊していることがわかる．普通コンクリート梁と無混入の軽量コンクリート梁のひび割れ性状はほぼ同様であり，ともにアーチ状のひび割れが載荷点側に形成されている．混入率を増加すると，アーチ状ひび割れの形成位置はより支点側に近づく傾向にあるが，LW-1.5-S 梁では，載荷点から斜め引張ひび割れが大きく開口し，アーチ状ひび割れの形成は顕著には認められない．なお，曲げひび割れは混入率が大きくなるほど細密化し，多数発生する傾向にあるが，下端 PC 鋼棒が降伏していないため，大きな開口には至っていない．

4. 衝撃載荷実験結果および考察

4.1 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

図－6 に，各梁の重錘衝撃力，支点反力およびスパン中央変位の波形を衝突速度ごとに示した．時間軸は重錘衝撃力の立ち上がり時刻を 0 ms として整理している．重錘衝撃力波形の性状はコンクリートの種類や混入率に関わらず各梁でほぼ同様であり，衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い第 1 波と振幅が小さく継続時間がより長い第 2 波から構成されている．なお，衝撃初期の最大振幅は，混入率や衝突速度の増加に対



図－7　支点反力－変位履歴曲線

応して増大する傾向にある．ここで，重錘衝撃力が載荷初期に大きな振幅を示した後徐荷され，再度より小さい振幅で発生するのは，重錘が梁に衝突後，梁が下方に変形して両者は一旦離れるものの再度重錘が梁に衝突したためと考えられる．

支点反力波形は，各梁ともに継続時間が 8 ～ 15 ms 程度の三角形波と周期が数 ms 程度の波形が合成された性状を示している．衝撃初期の立ち上がり勾配や振幅は，無混入の LW-0-IS 梁で最も小さく，次に普通コンクリート梁で小さい．混入率が高い軽量コンクリート梁ほど衝撃初期の立ち上がり勾配は大きく，振幅が大きくなる傾向にある．一方，普通コンクリート梁や

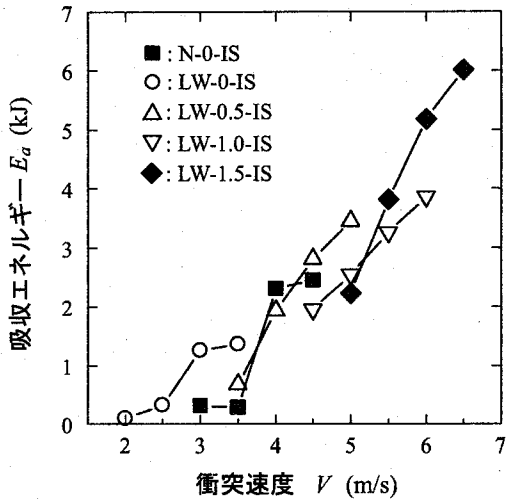
無混入の軽量コンクリート梁では，衝突速度の増加によって波形の振幅や継続時間が大きく変動し，両梁ともに最終の衝突速度では，振幅が増大し，継続時間がより短くなる性状を示している．これは，衝突速度の増加に対応して，斜めひび割れや割裂ひび割れが大きく開口し，大きな段差が生じるなどして梁が二分され，局所的な応答が支配的になったためと推察される．なお，混入率が 0.5 % 程度以上の軽量コンクリート梁では，衝突速度の増加による支点反力波形の変動は少なく，急激なせん断破壊が抑制されていることがわかる．すなわち，軽量コンクリートでも，混入率をある程度以上に大きくすることで耐衝撃性状は安定し，普通コンクリートよりも優れた耐衝撃性能を発揮できるものと考えられる．

なお，衝撃初期に負の支点反力が励起されるのは，張り出し部分が衝撃力によって浮き上がろうとするのを支点部の浮き上がり防止治具で抑制していることから，支点治具に内蔵されたロードセルには引張力が作用するためと推察される．

変位波形は，各梁ともに正弦波状の波形性状が卓越し，衝突速度が小さい場合は減衰自由振動を呈し，残留変位がほとんど生じていないことがわかる．衝突速度が大きくなると各梁ともに応答変位量は増大し，変位が大きく残留する傾向にある．N-0-IS 梁と LW-0-IS 梁で比較すると，残留変位が認められるのは N-0-IS 梁で V = 4 m/s，LW-0-IS 梁で V=3 m/s であり，軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて耐衝撃性能に劣ることがわかる．一方，LW-0.5-IS 梁で残留変位が認められた衝突速度は N-0-IS 梁と同様に V= 4 m/s であり，その時の残留変位量には大差がないことから，N-0-IS 梁と同程度の耐衝撃性能を有するためには，軽量コンクリートに PVA 短繊維を 0.5 % 程度混入する必要があることがわかる．また，短繊維混入率を大きくすることで変位が残留する衝突速度を増大させることができるが，限界を超えた衝突速度では応答変位量や継続時間および残留変位量が大幅に増加する傾向にある．以上から，軽量コンクリートに短繊維を混入することで普通コンクリート梁と同等以上の耐衝撃性能が期待できるものと考えられる．

4.2 支点反力－変位履歴曲線

図－7 に各梁の支点反力－変位履歴曲線を衝突速度ごとに示した．いずれの梁も衝突速度が小さい場合は弾性的な挙動を示し，ほとんどエネルギーが吸収されていないことがわかる．一方，最終衝突速度近傍ではせん断破壊時特有の三角形状の分布を示し [11]，エネルギーをより大きく吸収していることがわかる．ただし，曲げ破壊時の支点反力－変位履歴曲線が平行四辺形状を示す [12] のとは異なるため，エネルギー吸収量は曲げ破壊時に比べて小さい．なお，各梁の最終衝突速度において，三角形状の分布を示すものの再度載荷状態となり，変位が増加していることがわかる．これは，斜めひび割れや割裂ひび割れの開口などによってエネルギーが大きく吸収されたものの，未だ PC 鋼棒は弾性状態にあるため，コンクリート塊を伴った梁としての振動状態が励起されたためと推察される．

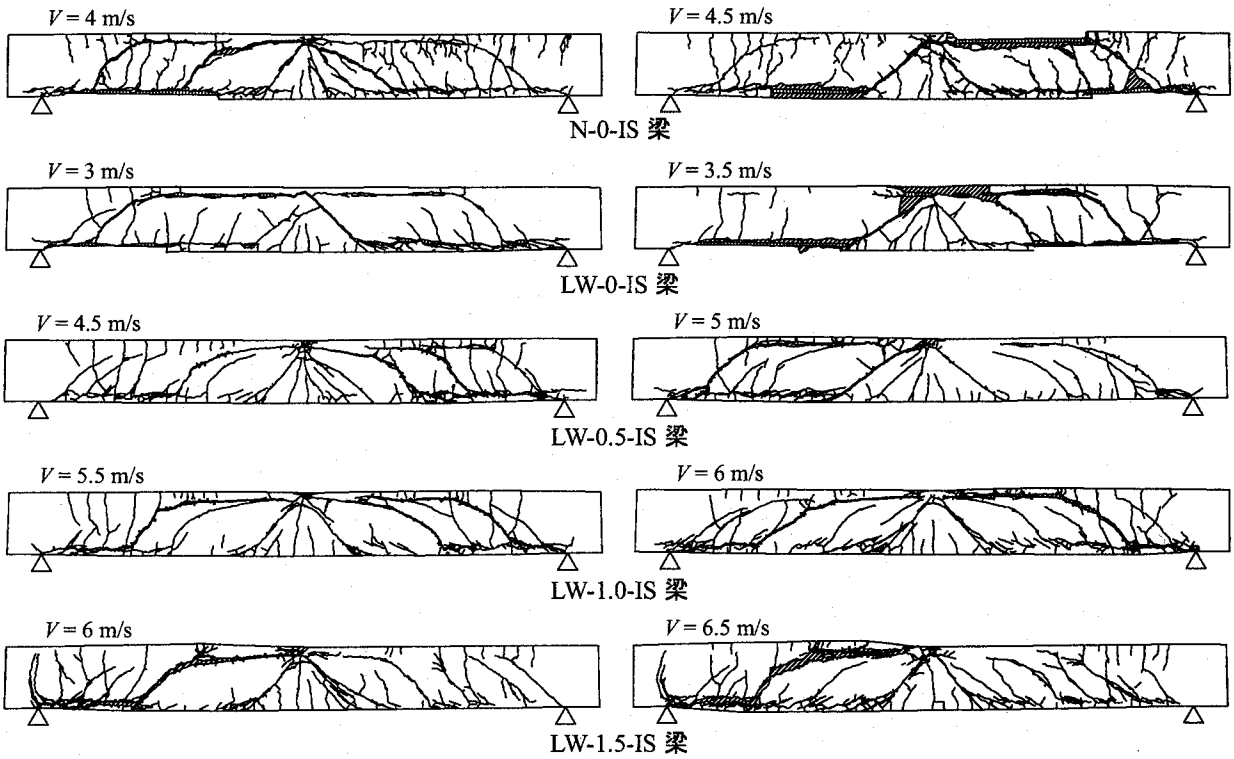


図－8 吸収エネルギーと衝突速度の関係

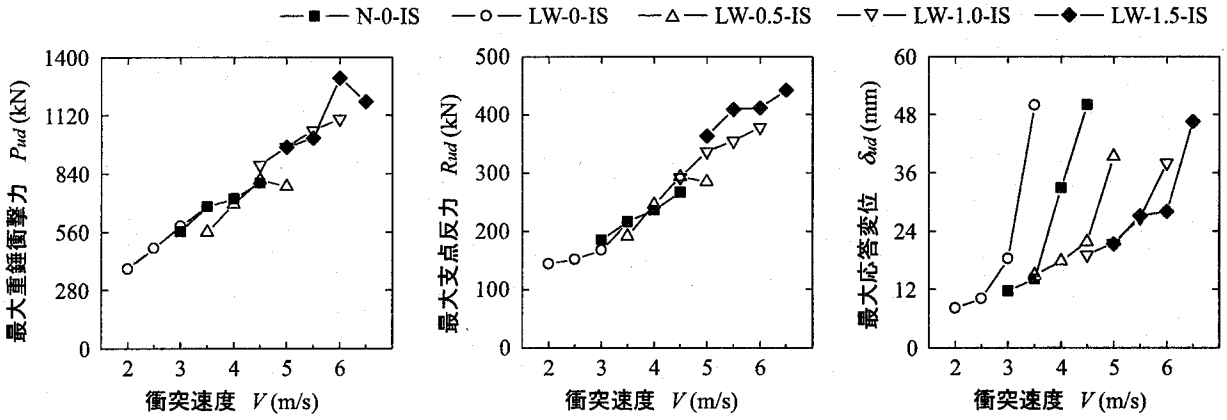
図－8 に支点反力－変位履歴曲線を積分して求められる吸収エネルギーを各梁の衝突速度ごとに示した．これより，吸収エネルギーは梁の種類に関わらず，衝突速度の増加に対応して増大する傾向にあることがわかる．短繊維を混入していない軽量コンクリート梁の吸収エネルギーは全般的に普通コンクリート梁よりも大きく，梁の損傷がより顕著であることがうかがわれる．なお，LW-0.5-IS 梁の吸収エネルギーは全般的に N-0-IS 梁と同程度であり，短繊維を 0.5 % 混入することで，軽量コンクリート梁でも普通コンクリート梁と同程度のエネルギー吸収性能を発揮できることがわかる．なお，LW-1.5-IS 梁の最大吸収エネルギーは，N-0-IS 梁のそれの 2.5 倍以上である．

4.3 ひび割れ性状

図－9 に衝撃載荷実験終了後の各梁のひび割れ状況を示す．なお，各梁ともに最終衝突速度および最終直前の衝突速度におけるひび割れ状況を示している．N-0-IS 梁および LW-0-IS 梁のひび割れ状況は，衝突速度に差異はあるものの大略同様である．すなわち，最終直前の衝突速度では，上端，下端筋に沿った割裂ひび割れおよびアーチ状ひび割れの開口が顕在化し，一部で下縁かぶりコンクリートの脱落が見受けられる．一方，最終衝突速度では，上端，下端筋に沿った割裂ひび割れの開口がさらに顕著となり，かぶりコンクリートの脱落が下縁および上縁においても認められる．また，載荷点近傍の斜めひび割れと支点近くに形成され



図－9 衝撃載荷実験終了後のひび割れ分布性状

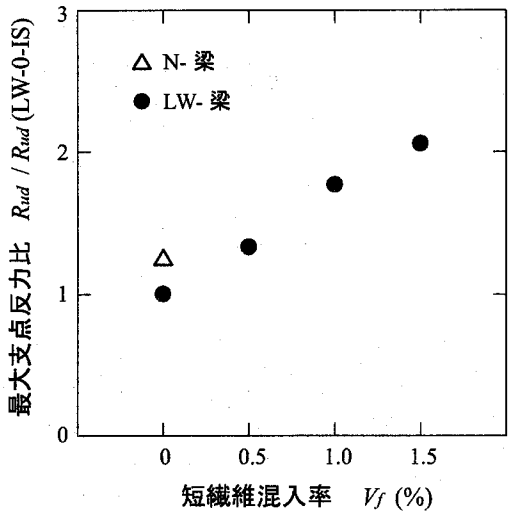


(a) 最大重錘衝撃力　(b) 最大支点反力　(c) 最大応答変位

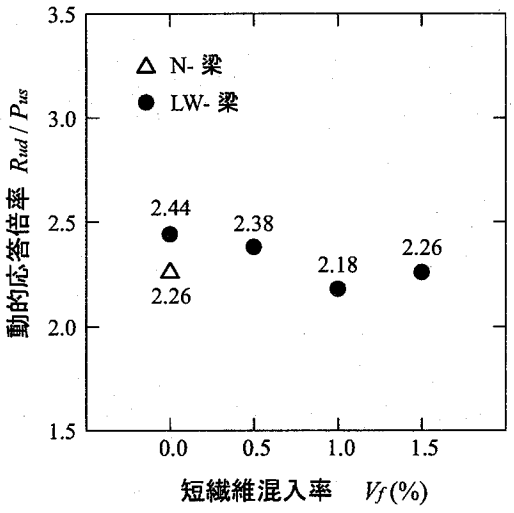
図－10 各種応答値

たアーチ状ひび割れの間が一つのブロックを形成し，このブロックが下方向に変形し，せん断ずれが生じているように見受けられる．

短繊維を混入した軽量コンクリート梁では，アーチ状のひび割れが明瞭に形成され，衝突速度の増加に伴い開口幅が拡大する傾向にあることがわかる．しかし，下端，上端筋に沿った割裂ひび割れは，N-0-IS 梁や LW-0-IS 梁に比べて最終衝突速度が大きいにも関わらず顕著ではなく，また，かぶりコンクリートの脱落も認められない．以上から，ひび割れ性状から見た短繊維混入の効果は，主として鉄筋や総ネジ PC 鋼棒に沿った割裂ひび割れの開口およびかぶりコンクリートの脱落を抑制することにあるものと考えられる．なお，アーチ状ひび割れの形成位置は，短繊維混入率が大きくなるほど支点近傍から離れ，より載荷点側に形成される傾向にあることがわかる．これは，混入率の増加に伴って損傷が軽微となり，最終の衝突速度が大きくなるために局部破壊の性状が強まったためと推察される．



図－11 最大支点反力比と短繊維混入率の関係



図－12 動的応答倍率と短繊維混入率の関係

4.4 各種応答値と動的耐力比および動的応答倍率

図－10 に各試験体の最大重錘衝撃力，最大支点反力および最大応答変位と衝突速度の関係を示す．最大重錘衝撃力は，全般的には各試験体ともに衝突速度の増加に対応して増大し，多少のばらつきは見られるものの最大重錘衝撃力と衝突速度にはほぼ線形の関係が認められる．

各試験体の最大支点反力も全般的には衝突速度の増加に対応して増大する傾向を示し，最大支点反力と衝突速度の関係にも線形性が認められる．しかし，最大支点反力の大きさは最大重錘衝撃力の 1/3 程度と小さい．衝突速度が同一の場合の N-0-IS 梁と LW-0.5-IS 梁の最大重錘衝撃力および最大支点反力はほぼ対応していることから，普通コンクリート梁と同程度の耐衝撃性を有するためには，軽量コンクリートに 0.5 % 程度の PVA 短繊維を混入する必要があるものと考えられる．なお，普通コンクリートと軽量コンクリートを用いた梁で，重量は 2 割程度異なるが，最大重錘衝撃力や最大支点反力は，両者で大差がない．これは，部材の慣性力が最大重錘衝撃力や最大支点反力に与える影響よりも，部材のせん断耐力や曲げ耐力の影響の方がより顕著であることを示すものと考えられる．

最大応答変位は，各梁ともに衝突速度の増加に対応して増大し，特に最終の衝突速度または最終直前の衝突速度で急増する傾向にあることがわかる．なお，最大応答変位が急増する以前の衝突速度における最大応答変位は，梁の種類に関わらず衝突速度の増加に対応してほぼ線形に増大している．変位の急増する衝突速度は，LW-0-IS 梁で最も小さく，次が N-0-IS 梁であった．この観点からも，せん断破壊の性状を示す軽量コンクリート梁の耐衝撃性は，普通コンクリート梁に比べて劣っているものと判断される．なお，LW-0.5-IS 梁は，N-0-IS 梁に比べて最大応答変位が急増する衝突速度が V = 1.0 m/s 大きく，最大応答変位から見た耐衝撃性は，LW-0.5-IS 梁の方が N-0-IS 梁よりも優れている．これは，ひび割れ図からわかるように，N-0-IS 梁では下縁かぶりコンクリートが脱落したのに対して，LW-0.5-IS 梁では短繊維の架橋効果によってかぶりコンクリートの脱落が抑制されたためと考えられる．

図－11 に各梁の LW-0-IS 梁を基準とした最大支点反力比と短繊維混入率の関係を示す．ここで，最大支点反力は，衝撃力によって壊滅的な破壊に至る場合は低下することが知られており，衝撃力を受ける試験体の動的耐力と同義的な指標であると考えられる [11),12)]．なお，最大支点反力は衝突速度に関わらず各梁の最大値とした．図－11 より，軽量コンクリートを用いた梁の最大支点反力比，すなわち動的せん断耐力比は，短繊維の混入率に対応してほぼ線形に増大することがわかる．また，LW-0-IS 梁の動的せん断耐力比は N-0-IS 梁よりも小さいことから，軽量コンクリート梁の動的せん断耐力は普通コンクリート梁に比べて小さいと判断される．また，LW-0.5-IS 梁の動的せん断耐力比は N-0-IS 梁のそれと同程度であることから，軽量コンクリート梁の動的せん断耐力を普通コンクリート梁と同等程度にするためには，短繊維を 0.5 % 程度混入する必要があることがわかる．

なお，LW-1.5-IS 梁の動的せん断耐力は，LW-0-IS 梁の 2.1 倍，N-0-IS 梁の 1.7 倍程度であり，短繊維の混入率を 1.5 % とすることで，短繊維を混入していない軽量コンクリート梁の約 2 倍，普通コンクリート梁の 1.7 倍程度の動的せん断耐力が得られるものと考えられる．

図－12 には各梁の動的せん断耐力を実測の静的せん断耐力で除した動的応答倍率と短繊維混入率の関係を示している．図－12 より，動的応答倍率は，コンクリートの種類や短繊維の混入率に関わらずほぼ一定で

あり，2.2～2.4 程度を示すことがわかる．以上から，本研究の範囲内では，せん断破壊型の普通コンクリート梁および短繊維混入率の異なる軽量コンクリート梁の動的応答倍率を 2.0 程度と考えることで，耐衝撃性を安全側に評価できるものと判断される．

5. まとめ

本研究では，軽量コンクリート製 RC 部材の構造性能の改善と軽量コンクリートの適用範囲拡大を目的として，普通コンクリート製 RC 梁と PVA 短繊維の混入率を 4 種類に変化させた軽量コンクリート製 RC 梁を合計 25 体製作し，静的，衝撃載荷実験を実施して耐荷性能を比較検討した．なお，衝撃載荷実験の方法は，重錘を所定の高さから 1 回のみ自由落下させる単一衝撃載荷法とした．本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する．

静載荷実験結果：

1) 短繊維を混入しない軽量コンクリート梁のせん断耐力は，示方書の規定と同程度の割合で普通コンクリート梁に比べて小さい．軽量コンクリート梁が普通コンクリート梁と同程度のせん断耐力および変形性能を発揮するためには，PVA 短繊維を軽量コンクリートに体積割合で 0.5 % 程度混入する必要がある．なお，短繊維を 1.5 % 混入した軽量コンクリート製 RC 梁のせん断耐力は，普通コンクリート梁の 1.7 倍，無混入の軽量コンクリート梁の 2.2 倍であった．
2) 短繊維を混入した軽量コンクリート梁のせん断耐力の実測値と短繊維混入によるせん断耐力の増分を既往の提案式で評価し算定したせん断耐力の計算値との比率は，示方書に準拠して算定した普通コンクリート梁および無混入の軽量コンクリート梁と同程度であった．これから，提案式を用いることで短繊維を混入した軽量コンクリート梁のせん断耐力を，示方書式とほぼ同等の安全率を有して評価可能であるものと考えられる．

衝撃載荷実験結果：

1) 短繊維を混入しない軽量コンクリート梁の耐衝撃性は，普通コンクリート梁に比べて劣る．総合的に見て，普通コンクリート梁と同程度の耐衝撃性を発揮するためには，軽量コンクリートに 0.5 % 程度の PVA 短繊維を混入する必要がある．
2) PVA 短繊維の混入による軽量コンクリートの耐衝撃性向上効果は，ひび割れ性状的には短繊維の架橋効果による割裂ひび割れの開口およびかぶりコンクリートの脱落抑制によるものと考えられる．
3) 軽量コンクリートに短繊維を混入することで動的せん断耐力は向上し，1.5 % の混入で普通コンクリート梁の 1.7 倍，無混入の軽量コンクリート梁の 2.1 倍の動的せん断耐力が得られる．
4) 動的せん断耐力を静的せん断耐力で除した動的応答倍率は，コンクリートの種類や短繊維混入率に関わらずほぼ一定であり 2.2～2.4 程度を示す．これから，せん断破壊型普通コンクリート梁および短繊維混入率の異なる軽量コンクリート梁の動的応答倍率を 2.0 程度と考えることで，耐衝撃性を安全に評価可能と判断される．

両実験結果を総合して：

1) 短繊維を混入しない軽量コンクリート梁の静的，動的せん断耐力は，普通コンクリート梁よりも小さい．
2) 軽量コンクリート梁が普通コンクリート梁と同程度の静的，動的耐荷性能を発揮するためには，PVA 短繊維を体積割合で 0.5 % 程度混入する必要がある．
3) 軽量コンクリート梁のせん断耐力は，短繊維混入率を増加することで増大するが，1.5 % 混入時の静的，動的せん断耐力は，短繊維を混入しない軽量コンクリート梁の 2 倍強，普通コンクリート梁の 1.7 倍である．

参考文献

1) 二羽淳一郎，岡本享久，前堀伸平：高品質軽量コンクリートの構造部材への適用，コンクリート工学，Vol.38, No.12, pp.3-9, 2000.12
2) 高性能軽量コンクリート研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2000.8
3) コンクリート標準示方書（2002 年制定）構造性能照査編，土木学会, 2002.
4) コンクリート工学協会：高靭性セメント複合材料を知る・作る・使う，2002.1
5) 古田昌弘，金久保利之，閑田徹志，永井　覚：高靭性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法，建築学会構造系論文集，第 568 号，pp,115-121, 2003.
6) 田口史雄，三上　浩，栗橋祐介，岸　徳光：ビニロン短繊維混入 RC 梁の耐荷性状に及ぼす短繊維混入率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.287-292, 2003.
7) 岸　徳光，田口史雄，三上　浩，栗橋祐介：ビニロン短繊維を混入した RC 梁の耐衝撃性に及ぼす短繊維混入率の影響，構造工学論文集，Vol.50A, 2004.
8) 喜多俊介，小室文也，二羽淳一郎：短繊維補強された RC 部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.1717-1722, 2003.
9) 竹本伸一，岸　徳光，三上　浩，栗橋祐介：ビニロン短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁

の繰り返し衝撃載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.1644-1650, 2004.
10) 田口史雄，岸　徳光，三上　浩，栗橋祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.283-288，2005.
11) 岸　徳光，三上　浩，安藤智啓：せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1689-1699,1999.
12) 岸　徳光，三上　浩，松岡健一，安藤智啓：静載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

(2005 年 9 月 10 日受付)