

(27) 載荷速度が鉄筋コンクリート梁のせん断耐力に及ぼす影響

Effect of loading rate on shear resistance of RC beams

讃岐正太郎*, 藤掛一典**

Shotaro Sanuki, Kazunori Fujikake

*防衛大学校理工学研究科前期課程地球環境科学専攻(〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科(〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 鉄筋コンクリート, せん断破壊, せん断耐力, RC梁, 載荷速度

Key Words: reinforced concrete, shear failure, shear resistance, RC beam, loading rate

1. はじめに

RC構造物の中には事故や災害に起因した車両や船舶、航空機の衝突、落石や土石流による衝突、さらには爆発による衝撃荷重を受けるものがある。衝撃荷重の発生確率は小さいものの、一度発生するとRC構造物は壊滅的な損傷を受けることが予想される。近年、こうした被害から人命や社会生活を守るために合理的な耐衝撃設計法の確立が期待されている。

衝撃荷重を受けるRC構造物の応答は、非常に複雑であるが概ね二つの応答からなると考えられている。一つは衝撃荷重作用直後の比較的短時間内に載荷点近傍で起こる応力波の伝播に関係した局所的な応答であり、もう一つは比較的長時間にわたる部材全体の弾塑性応答に関係した全体応答である。局所応答では、貫入、裏面剥離、貫通、押し抜きせん断等の局所的な破壊が問題になるのに対して、全体応答では曲げ破壊やせん断破壊のような部材全体にわたる破壊が問題になる。

これまでに衝撃荷重を受けて全体曲げ破壊するRC梁の衝撃応答や安全性の評価に関する研究は非常に盛んに行われている^{1)~8)}。一方、衝撃荷重によるRC梁のせん断破壊について調べた研究は非常に少ないのが現状である。せん断破壊するRC梁の耐力や挙動は、RC梁の形状や寸法、拘束条件、載荷条件、引張鉄筋量や鉄筋の配置、せん断補強筋の有無やせん断補強筋量、コンクリートや鉄筋の特性、コンクリートの打設や養生方法、載荷履歴、せん断スパン比などの影響を複雑に受けることが知られている⁹⁾。せん断破壊は変形性能に乏しく極めて脆性的な破壊を呈することから、その安全性を評価する方法を確立することは非常に重要であると考えられる。衝撃荷重下におけるRC梁のせん断破壊メカニズムをより良く理解し、その安全性を評価する手法を確立するためには、まずはRC梁のせん断耐力に載荷速度が及ぼす影響を調べ

ることが必須であると考えられる。

そこで本研究では、主に静的載荷時にせん断破壊が卓越するRC梁に注目し、せん断スパン比(a/d)、せん断補強筋比および載荷速度を試験パラメータとする急速載荷試験を行い、これらのパラメータがRC梁の破壊モードおよび最大耐力に及ぼす影響について検討を行った。

2. 急速載荷試験の概要

2.1 試験パラメータ

本研究では、急速載荷を受けるRC梁の破壊モードおよび最大耐力にせん断スパン比、せん断補強筋比および載荷速度が及ぼす影響を実験的に把握することを目的としている。表-1および表-2に本試験ケースの一覧を示す。

本試験で用いるRC梁試験体のせん断スパンは、400mmおよび700mmの2種類であり、せん断スパン比a/dは、それぞれ1.9および3.3であることから、前者をRC1シリーズ、後者をRC3シリーズと呼ぶ。せん断補強筋比は、RC1シリーズでは0、0.42および0.84%の3種類とし、RC3シリーズに対しては0、0.12および0.60%の3種類とした。せん断補強筋比0%はせん断補強筋を配置しないことを意味する。載荷速度は、静的(S)、低速(L)、中速(M)および高速(H)の4種類であり、各載荷速度は変位速度で表すと静的載荷が 4.0×10^{-4} (m/s)、低速載荷が 4.0×10^{-2} (m/s)、中速載荷が 4.0×10^{-1} (m/s)、高速載荷が 2.0×10^0 (m/s)である。実験はそれぞれの載荷速度に対して2回ずつ行った。試験体名はせん断スパン比、せん断補強筋比、載荷速度および試験数から表記している。例えば、せん断スパン比1.9、せん断補強筋比0.42%、載荷速度が中速の場合の2体目の載荷試験であることをRC1S42M2と表記している。

表-1 試験ケース一覧(RC1 シリーズ)

試験体名	せん断スパン比 a/d	せん断補強筋比 P_w	載荷速度			
			静的 4×10^4 (m/s)	低速 4×10^2 (m/s)	中速 4×10^1 (m/s)	高速 2×10^0 (m/s)
RC1 S0 S1 RC1 S0 S2	1.90	0%	○			
RC1 S0 L1 RC1 S0 L2				○		
RC1 S0 M1 RC1 S0 M2					○	
RC1 S0 H1 RC1 S0 H2						○
RC1 S42 S1 RC1 S42 S2		0.42%	○			
RC1 S42 L1 RC1 S42 L2				○		
RC1 S42 M1 RC1 S42 M2					○	
RC1 S42 H1 RC1 S42 H2						○
RC1 S84 S1 RC1 S84 S2		0.84%	○			
RC1 S84 L1 RC1 S84 L2				○		
RC1 S84 M1 RC1 S84 M2					○	
RC1 S84 H1 RC1 S84 H2						○

表-2 試験ケース一覧(RC3 シリーズ)

試験体名	せん断スパン比 a/d	せん断補強筋比 P_w	載荷速度			
			静的 4×10^4 (m/s)	低速 4×10^2 (m/s)	中速 4×10^1 (m/s)	高速 2×10^0 (m/s)
RC3 S0 S1 RC3 S0 S2	3.33	0%	○			
RC3 S0 L1 RC3 S0 L2				○		
RC3 S0 M1 RC3 S0 M2					○	
RC3 S0 H1 RC3 S0 H2						○
RC3 S12 S1 RC3 S12 S2		0.12%	○			
RC3 S12 L1 RC3 S12 L2				○		
RC3 S12 M1 RC3 S12 M2					○	
RC3 S12 H1 RC3 S12 H2						○
RC3 S60 S1 RC3 S60 S2		0.60%	○			
RC3 S60 L1 RC3 S60 L2				○		
RC3 S60 M1 RC3 S60 M2					○	
RC3 S60 H1 RC3 S60 H2						○

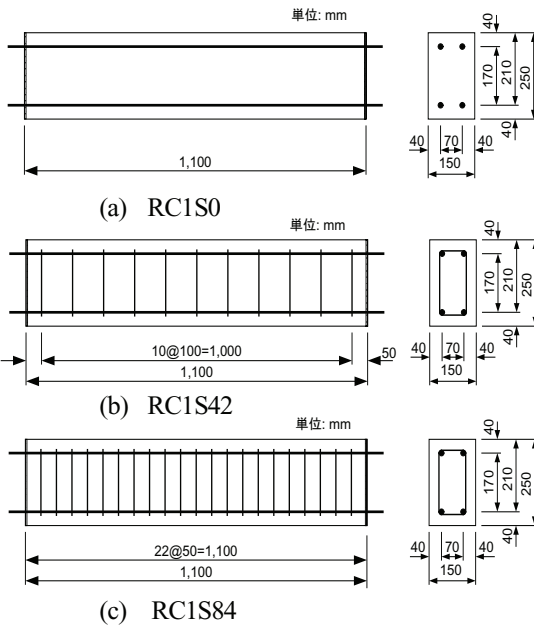


図-1 RC1 シリーズ試験体の概要

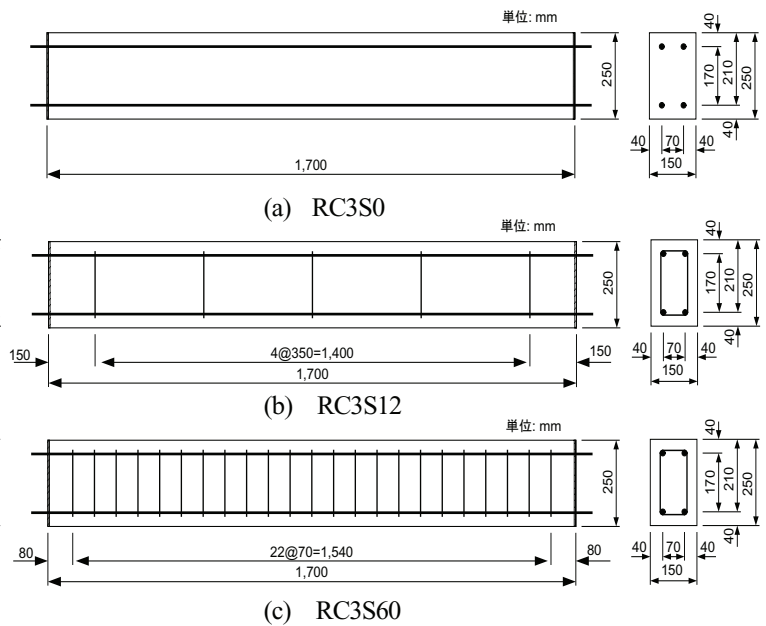


図-2 RC3 シリーズ試験体の概要

2.2 試験体および試験方法

(1) 試験体

図-1, 2に試験体の形状寸法および配筋状況を示す。RC梁試験体は、幅150(mm)、高さ250(mm)の断面寸法を有し、長さはRC1シリーズが1,100mm、RC3シリーズが1,700mmである。RC梁の両端には厚さ3mmの鋼板を設置し、主鉄筋を鋼板に溶接して主鉄筋の抜け出しを防止した。主鉄筋には、D22 (SD345) を用い、せん断補強筋にはD6 (SD295) を使用した。表-3に試験体に用いた

コンクリートの配合を示す。鉄筋とコンクリートの材料試験結果から、主鉄筋とせん断補強筋の降伏強度はそれぞれ371.1と342.1 (N/mm²)、コンクリートの圧縮強度は39.1 (N/mm²)であった。表-4に土木学会コンクリート標準示方書に基づき計算した各試験体の曲げ耐力およびせん断耐力を示す。また表中には曲げ耐力とせん断耐力の比をせん断余裕度として表示した。せん断余裕度が1.0未満のものはせん断破壊することが予想される^{10)~13)}。

表-3 コンクリートの配合

最大粗骨材寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比(%)	単位重量(kg/m ³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
20.0	18.0	53.0	332	176	790	999

表-4 試験体の耐力

供試体名	主鉄筋比 p	せん断補強筋比 p _w	曲げ耐力 P _{mud} (KN)	せん断耐力 P _{vyd} (KN)	せん断余裕度
RC1S0	2.46%	0%	245.1	94.8	0.39
RC1S42	2.46%	0.42%	245.1	174.0	0.71
RC1S84	2.46%	0.84%	245.1	253.1	1.03
RC3S0	2.46%	0%	140.1	94.8	0.68
RC3S12	2.46%	0.12%	140.1	117.4	0.84
RC1S60	2.46%	0.60%	140.1	207.9	1.48



図-3 サーボ制御式急速載荷装置

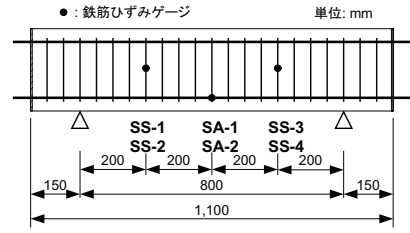
(2) 試験方法

急速載荷試験は、図-3に示すサーボ制御式急速載荷装置（最大荷重容量980kN，最大載荷速度4m/s）を用いて実施した。急速載荷装置は、あらかじめ設定された変位速度を一定に保持した状態で載荷できる機能を有していることから、試験体の力学的特性に載荷速度が及ぼす影響を把握するためには最適な試験装置である。

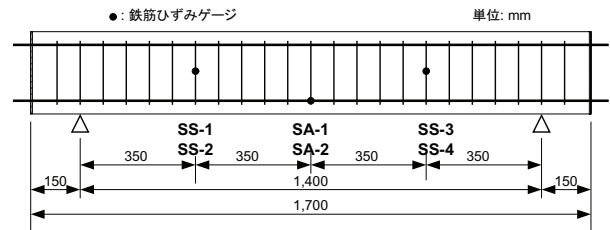
急速載荷試験では、図-3に示すように単純支持されたRC梁の中央部にあらかじめ設定された載荷速度で荷重を加えている。RC1シリーズ試験体とRC3シリーズ試験体の支点間長はそれぞれ800mmおよび1,400mmとした。

本実験の計測項目は、RC梁試験体に作用する荷重、RC梁試験体の加速度、載荷点変位、コンクリートのひずみ、主鉄筋ひずみ、せん断補強筋のひずみであり、荷重の計測はロードセル、加速度は加速度計、載荷点変位はレーザー式変位計、各種ひずみはひずみゲージによって計測した。図-4ならびに図-5に、各RC梁試験体に配置されたひずみゲージならびに加速度計の位置を示す。こ

ここで、SA-1、SA-2は主鉄筋に貼り付けたひずみゲージ、SS-1～SS-4はせん断補強筋に貼り付けたひずみゲージ、SC-1～SC-6はコンクリート表面に貼り付けたひずみゲージ、ACC-1～ACC-6は加速度計である。せん断補強筋に貼り付けたひずみゲージの貼付位置は支点と載荷点

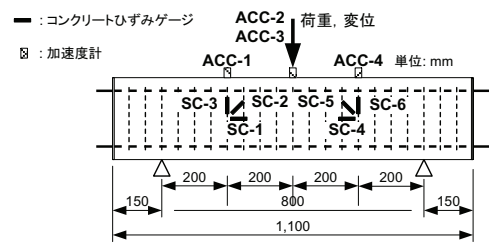


(a)RC1

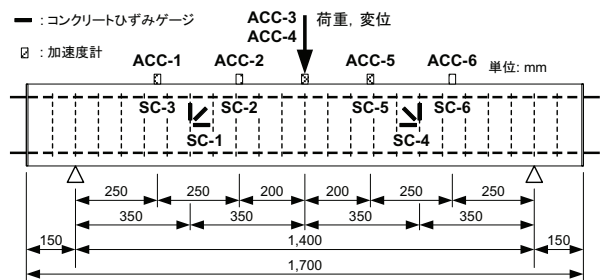


(b)RC3

図-4 鉄筋ひずみゲージ貼付位置



(a)RC1



(b)RC3

図-5 コンクリートひずみゲージ貼付位置

の中央とした。また、急速載荷の様子は高速カメラによって1/3,000 (sec) の間隔で撮影し、ひび割れの進展状況等を確認した。

(3) 試験体に作用する荷重の評価

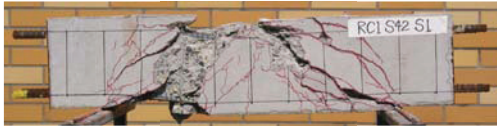
急速載荷試験では、静止しているRC梁試験体を極めて短時間内にあらかじめ設定された一定変位速度まで加速している。そのため、載荷初期にはRC梁試験体に大きな加速度が生じ、ロードセルで計測された荷重には慣性力の影響が及ぶことになる。したがって、本研究ではRC梁の最大耐力を適切に評価する観点から、計測された加速度分布を用いて既往の研究^{8), 15), 16)}に従い慣性力の影響を除去した。



(a) RC1S0S1



(b) RC1S0H1



(c) RC1S42S1



(d) RC1S42H1



(e) RC1S84S1



(f) RC1S84H1

図-6 RC1 シリーズの試験体の破壊状況



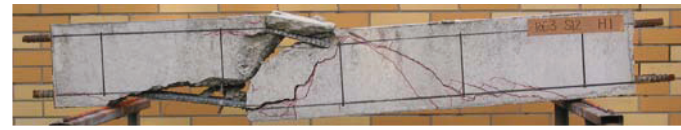
(a) RC3S0S1



(b) RC3S0H1



(c) RC3S12S1



(d) RC3S12H1



(e) RC3S60S1



(f) RC3S60H1

図-7 RC3 シリーズの試験体の破壊状況

3. 実験結果

3.1 破壊の状況

図-6, 7に急速荷重試験で得られたRC梁試験体の破壊状況を示す。RC梁の破壊状況は、せん断スパン比ならびにせん断補強筋比により異なることがわかる。

せん断スパン比(a/d)が1.9であるRC1シリーズの試験体では、支点と荷重点を結ぶ直線上に斜めひび割れが発生した後に圧縮部コンクリートの圧壊によって終局を迎えるせん断圧縮破壊が顕著にみられた。また、せん断補強筋比が大きくなるにつれて圧縮破壊領域が小さくなり、斜めひび割れが分散する傾向にあることが認められた。

せん断スパン比(a/d)が3.33であるRC3シリーズの破壊状況を見てみると、せん断補強筋比0.12%以下の試験体(RC3S0S1, RC3S0H1, RC3S12S1 および RC3S12H1)では支点から約40°に進展するひび割れが引張鉄筋に達した後、鉄筋とコンクリートの付着剥離が発生して脆性的な破壊に至る斜め引張破壊が生じている。一方、せん断補強筋比が0.60%の試験体(RC3S60S1 および RC3S60H1)では曲げひび割れが発生し、引張鉄筋が降伏した後に圧縮

縁コンクリートが圧壊する曲げ破壊を生じた。

なお、本研究では、特に荷重速度の影響によって破壊モードに違いがみられるかどうか調べたが、顕著な相違は認められなかった。ただし、せん断破壊する試験体は荷重速度が大きくなるほど主要な斜めひび割れと水平とのなす角度が若干大きくなる傾向が見られた。

3.2 荷重—変位関係

図-8, 9にそれぞれの試験体で得られた荷重—変位関係を示す。RC1シリーズの荷重—変位関係では、せん断補強筋比が増加するにつれて脆性的な挙動から延性的な挙動に変化しているのがわかる。荷重速度が最大耐力に及ぼす影響は、せん断補強筋を設置していないRC1S0試験体で非常に顕著である。また、せん断補強筋を0.84%としたRC1S84試験体の荷重—変位関係は曲げ破壊に近い挙動を呈している。

せん断スパン比3.33のRC3シリーズの荷重—変位関係もせん断補強筋比の増加に伴い脆性的な挙動から延性的な挙動に変化している。せん断補強筋を0.60%としたRC3S60試験体の荷重—変位関係は典型的な曲げ破壊の挙動を呈している。

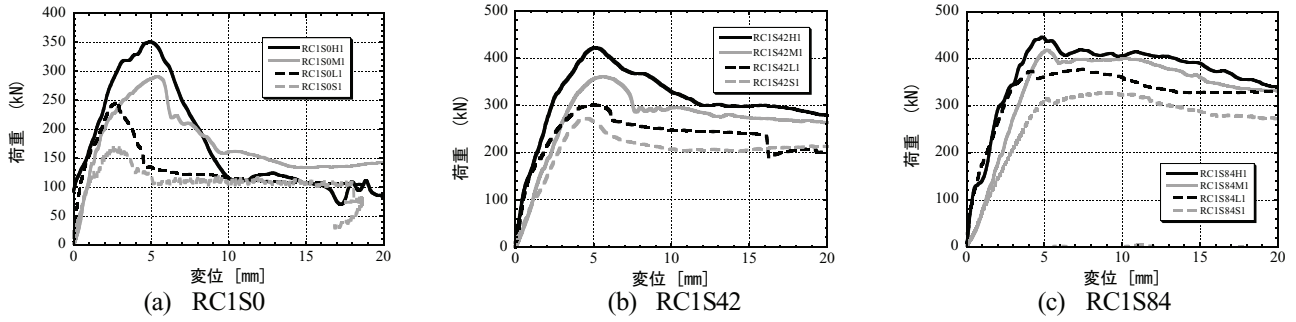


図-8 RC1 シリーズ荷重—変位関係

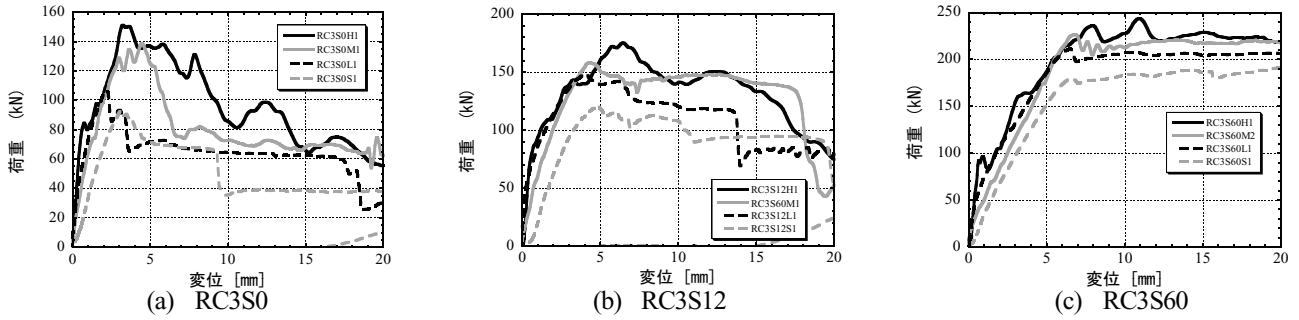


図-9 RC3 シリーズ荷重—変位関係

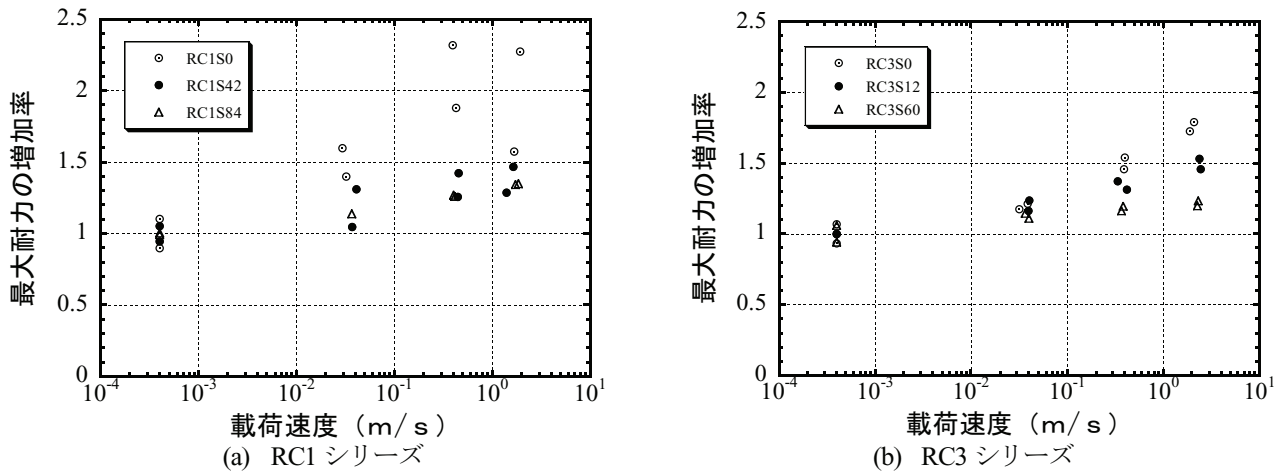


図-10 最大耐力の増加率と載荷速度の関係

3.3 最大耐力の増加率と載荷速度の関係

各試験体シリーズで得られた最大耐力の増加率と載荷速度の関係を図-10 に示す. ここで, 最大耐力の増加率は, 静的載荷で得られた最大耐力に対する各載荷速度における最大耐力の比を表している.

RC1 シリーズの場合, せん断補強筋を配置していない RC1S0 試験体の最大耐力の増加率が最も載荷速度の影響を受けるのに対して, せん断補強筋比が大きくなると各載荷速度における最大耐力の増加率は小さくなる. このような傾向は RC3 シリーズにおいても同様に見られる.

それぞれの試験体は, せん断補強筋比やせん断スパン比の違いにより, せん断圧縮破壊, 斜め引張破壊, 曲げ破壊を生じており, これらの破壊モードの違いにより最大耐力の増加率は異なる. 曲げ破壊する場合の最大耐力

の増加率は引張鉄筋のひずみ速度効果による降伏強度と密接な関係にあることが明らかにされている. これに対して, せん断破壊する場合の最大耐力の増加率は曲げ破壊する場合のそれよりも大きくなることから, ひずみ速度効果によるコンクリートの圧縮強度や引張強度の増加と密接に関係していると考えられる.

4. まとめ

本研究は, 主に静的載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に, せん断スパン比 (a/d), せん断補強筋比および載荷速度を試験パラメータとする静的載荷および急速載荷試験を行い, 各パラメータが RC 梁の破壊モードおよび最大耐力に及ぼす影響を定性的・定量的に調べたものである. 本研究の範囲内において得られた結果をまとめ,

以下に示す。

- (1) せん断補強筋のない RC 梁は非常に脆性的な破壊挙動を示し、せん断補強筋比が大きくなるほど破壊挙動は延性的になり、最大耐力も大きくなる。
- (2) 破壊モードについて、 $a/d=1.9$ の試験体は全てせん断圧縮破壊した。ただし、せん断補強筋比が大きくなるほど破壊挙動は延性的になり、せん断補強筋比 0.84% の試験体は曲げ破壊に近い荷重—変位関係を示した。また、 $a/d=3.3$ の試験体はせん断補強筋比 0%、0.12% で斜め引張破壊、せん断補強筋比 0.60% で曲げ破壊した。
- (3) 荷重速度が $4.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^0$ (m/s) の範囲では荷重速度の違いによる破壊モードの大きな変化は見られなかった。なお、せん断破壊する試験体は荷重速度が大きくなるほど主要な斜めひび割れと水平とのなす角度が大きくなる傾向が見られた。
- (4) 荷重速度の増加に伴い、RC 梁の最大耐力も増加する。また、その傾向はせん断スパン比、せん断補強筋比が小さいものでより顕著であった。
- (5) 荷重速度が最大耐力に及ぼす影響は破壊モードに応じて異なる。試験体がせん断破壊する場合の最大耐力は、曲げ破壊する場合のそれと比べて荷重速度の影響を顕著に受ける。

謝辞

本研究を実施するにあたり、実験並びにデータ整理に尽力を頂いた防衛省技官宮川正樹氏、防衛大学校研究科学生福田貴志氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hughes, G., and Beeby, A. W. : Investigation of the effect of impact loading on concrete beams, The Structural Engineer, 60B(3), pp.45-52, 1982.
- 2) Ishikawa, N., Katsuki, S., and Takemoto, K. : Dynamic analysis of prestressed concrete beams under impact and high speed loadings, Proc. of 6th International Conference on Structures under Shock and Impact, pp.247-256, 2000.
- 3) Kishi, N., Ikeda, K., Mikami, H., and Yamaguchi, E. : Dynamic behavior of RC beams under steel weight impact loading-effects of nose-shape of steel weight, Proc. of 3rd International Conference on Concrete Under Severe Conditions, pp.660-667, 2001.
- 4) Yamamoto, M., Masuya, H., and Nishimura, Y. : A Study on the impact test method and characteristics of impact behavior of various concrete beams, Proc. of 1st International Conference on Design and Analysis of Protective Structure against Impact/ Impulsive/ Shock Loads, pp.245-255, 2003.

- 5) Kishi, N., Ando, T., Imoto, K., Ishida, M., Kasai, Y., Katsuki, S., Kanbayashi, A., and Masuya, H. : Round robin analysis of RC beam subjected to an impact load due to a falling weight, Proc. of 1st International Conference on Design and Analysis of Protective Structure against Impact/ Impulsive/ Shock Loads, pp.305-318, 2003.
- 6) 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—, pp.129-131, pp.178-187, 森北出版株式会社, 2008.
- 7) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓 : 静荷重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, Vol-51, pp.177-190, 2000.
- 8) Kazunori Fujikake, Bing Li, Sam Soeun : Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.938-950, 2009.
- 9) Bresler, B. and MacGregor, J. G. : Review of Concrete Beams Failing in Shear, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.93, No. ST1, pp. 343-372, 1967.
- 10) 松本 啓 : 画像解析と修正圧縮場理論を用いた鉄筋コンクリートはりのせん断挙動解析, 武蔵工業大学修士学位論文, 2004.
- 11) 幸左賢二, 脇山知美, 西岡 勉, 小林 寛 : せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的検討, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.798-814, 2006.
- 12) 土木学会 : コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002
- 13) 土木学会 : コンクリート標準示方書[設計編], 2007.
- 14) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤 : 急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No627, Vol-44, pp.37-54, 1999.
- 15) Selcul Saatci, Frank J. Vecchio : Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams, ACI Structural Journal, pp.78-86, 2009.
- 16) N. Bantia, S. Mindess, A. Bentur, M. Pigeon : Impact testing of concrete using a Drop-weight impact machine, Experimental Mechanics, pp.63-69, 1989.
- 17) 別府万寿博, 新井信裕, 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則 : コンクリートの動力学特性に及ぼす寸法効果に関する研究, 土木学会 第 6 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2002.
- 18) T. Tang, et. al. : Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.118, No.1, pp.108-124, 1992.
- 19) 伊藤義人, 劉斌, 宇佐美康一, 草間竜一, 貝沼重信 : 車両衝突を受ける橋梁用鋼製防護柵の材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究, 土木学会論文集, No759, Vol-67, pp.337-353, 2004.

(2010年11月5日受付)