

[174] 動的荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性及び破壊性状

正会員 ○陸 好 宏 史 (埼玉大学工学部)
正会員 町 田 篤 彦 (埼玉大学工学部)

1. まえがき

動的荷重を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物の挙動は静的外力下におけるものと比較して、かなり異なることが認められている。例えば、一方向動的荷重を受けるRC部材の曲げ耐力は載荷速度により著しく異なること¹⁾。あるいは載荷速度によるせん断耐力の増大率は曲げ耐力に比べて大きいことなどが報告されている²⁾。また、動的載荷を受けるRC部材の変形能は静的外力下におけるものと比べて低減する傾向も指摘されている^{3, 4)}。さらに、破壊性状に関しては、静的荷重下において曲げ破壊をしたものが、動的荷重下ではせん断破壊を生じた例も報告されており^{1, 5)}、載荷速度による終局破壊形式の変化、あるいはじん性が低減する現象はRC構造物にとって極めて重要な問題である。しかし、過去における研究例ではRC部材の力学的特性に影響を及ぼす要因、あるいはコンクリート及び鉄筋の動的な材料特性との関係については十分に解明されていない。さらに、載荷速度が終局破壊形式に及ぼす影響についてはほとんど明らかにされていない。

本研究は、主に地震のような動的荷重を対象として、RC部材の一方向動的載荷実験を行い、動的荷重下におけるRC部材の力学的特性及び終局破壊形式に及ぼす影響とその要因をコンクリートと鉄筋の動的な材料特性を用いて実験的に明らかにしようとしたものである。

2. 実験概要

(1) コンクリート及び鉄筋の動的載荷実験

コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ特性が載荷速度によって異なることは既に数多く報告されている⁶⁾。しかし、コンクリート及び鉄筋の動的な特性は主にコンクリートの配合、鉄筋の材質によって異なるため、ここではRC供試体に用いたコンクリート及び鉄筋と同一のものについて実験した。表-1に実験に用いたコンクリートの配合を示す。供試体はφ10×20cmの円柱供試体を用い、打設後1週間湿潤養生を行い、その後は気乾養生とし、材令14日で実験を行った。載荷方法は50ton動的汎用載荷装置を用い、ひずみの計測には供試体に貼付したワイヤストレーンゲージと供試体両端面の変位を測定することによって求めた。載荷は供試体両端面の変位を制御することによって行い、設定ひずみ速度を0.001, 0.5, 10.0%/sとした。また、同様にして動的割裂試験も行った。供試体はφ15×20cmで荷重を制御することによって行った。

鉄筋の動的引張試験に用いた鉄筋は、D10, D13, D16, D19の4種類で、供試体は図-1に示すように、鉄筋の両端に鉄板を溶接したものをを用いた。ひずみの計測にはワイヤストレーンゲージと鉄筋の両端間の変位を測定することによって求めた。実験は変位制御で行い、設定ひずみ速度を夫々0.005, 0.5, 5.0, 50.0%/sとして一方向単調載荷を行った。以下に述べるコンクリート及び鉄筋のひずみ速度はともにワイヤストレーンゲージから得られた値を、また応力-ひずみ曲線は変位計から得られたものを用いた。

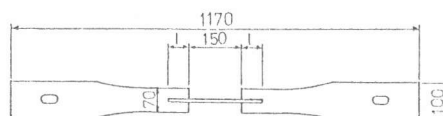
(2) RC梁の動的載荷実験

本研究では載荷速度による曲げ及びせん断特性と終局破壊形式を調べるために、実験要因として、載荷速度(ひずみ速度)、鉄筋比、a/dを主なパラメータとした。実験に用いた供試体は図-2に示すように、Aシリーズでは幅15cm、高さ20cmで、B, Cシリーズでは幅10cm、高さ15cmとした。各供試体の実験要因

表-1 配合表

| | W/C (%) | セメント (kg/m ³) | 細骨材 (kg/m ³) | 粗骨材 (kg/m ³) | 混和剤 (kg/m ³) | 圧縮強度 (kg/cm ²) | 引張強度 (kg/cm ²) |
|-----|---------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| (1) | 8.0 | 265 | 939 | 810 | 2.65 | 21.8 | 1.9 |
| (2) | 6.8 | 325 | 913 | 788 | 3.25 | 32.0 | 2.1 |
| (3) | 4.5 | 409 | 686 | 1000 | 4.09 | 50.3 | 2.7 |

粗骨材の最大寸法=12.5mm, スランプ 12±1 cm



l = 60 (D10)
100 (D13)
170 (D16)
250 (D19) (mm)

図-1 鉄筋の引張試験に用いた供試体

を表-2に示す。供試体は同一要因につき同一バッチのコンクリートを用い、配合は表-1における(2)を使用した。載荷方法は、載荷速度、最大耐力を考慮して、Aシリーズでは50ton、B、Cシリーズでは5ton 動的汎用載荷装置を用い、実験はすべて梁中央のたわみを制御することによって行った。動的載荷の場合には衝撃的な荷重がかからないように、アクチュエーターの先端が供試体上部の分配桁に接した状態から載荷を行った。実験から得られたデータはすべてデータレコーダーに記録し、その後フォトコーダー及びX-Yレコーダーに出力した。

3. 実験結果

(1) コンクリート及び鉄筋の材料特性

図-3はコンクリートの動的載荷実験から得られた圧縮強度及び引張強度とひずみ速度との関係を示したものである。引張ひずみ速度は応力速度を同一バッチから得られた静的圧縮ヤング係数で除したものをを用いた。また、図-4は同一ひずみ速度から得られた圧縮応力-ひずみ曲線を平均したものを示している。図-5は鉄筋の応力-ひずみ曲線の一つを示したものであり、また図-6に上降伏点-ひずみ速度の関係を示す。コンクリートの圧縮及び引張強度と鉄筋の降伏点は何れもひずみ速度の対数値とほぼ比例しており、既往の研究結果と同じ傾向を示している。

(2) 載荷速度がRC梁の力学的特性に及ぼす影響

RC梁の動的載荷実験から得られた荷重-変位曲線の一つを図-7に示す。A1-S、D及びA2-S、Dは静的及び動的ともに曲げ破壊を生じたものである。一般に動的外力下における荷重-変位曲線は、動的引張力を受ける鉄筋の上降伏点

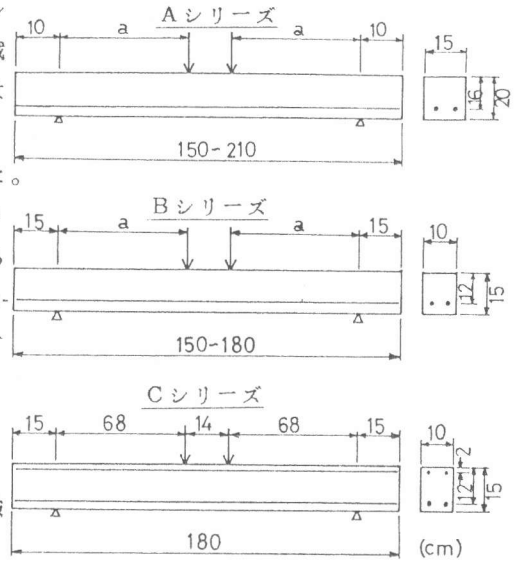


図-2 供試体の形状寸法

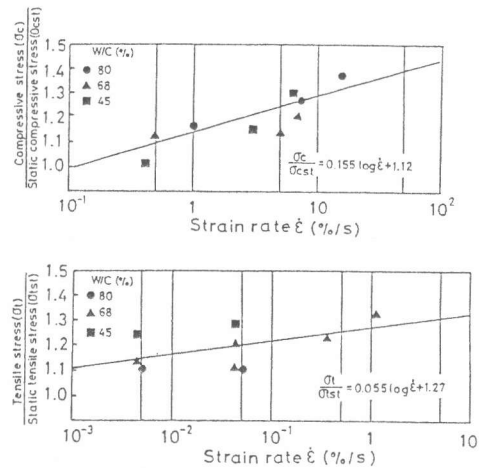


図-3 コンクリート強度とひずみ速度の関係

表-2 実験要因及び実験結果

| 供試体番号 | a/d | 引張鉄筋比 (%) | コンクリート強度 (kg/cm ²) | | 変位速度 (cm/s) | 主鉄筋歪速度 (%/s) | 最大荷重 (ton) | 計算耐力 (Lon) | | | 破壊形式 |
|-------|------|-----------|--------------------------------|------|-------------|--------------|------------|------------|-------|------|------|
| | | | 圧縮 | 引張 | | | | 曲げ | (I) | (II) | |
| A1-S | 5.5 | D10. 0.89 | 296 | 27 | 0.01 | 0.003 | 2.41 | 2.61 | 4.64 | — | F |
| A1-D | | | | | 8.3 | 3.14 | 3.04 | 4.94 | — | | |
| A2-S | | D16. 1.70 | 333 | 28 | 0.005 | 0.001 | 4.59 | 4.54 | 5.89 | — | F |
| A2-D | | | | | 22.0 | 5.3 | 5.61 | 5.60 | 3.14 | — | |
| A3-S | | | | | D19. 2.39 | 325 | 30 | 0.005 | 0.001 | 5.90 | 5.88 |
| A3-D | 21.6 | 5.5 | 7.22 | 7.10 | | | | 6.51 | 8.53 | S2 | |
| A4-S | 2.8 | D10. 0.89 | 347 | 28 | 0.003 | 0.002 | 5.27 | 5.44 | 6.03 | — | S1 |
| A4-D | | | | | 23.3 | 18.1 | 7.38 | 7.13 | 6.48 | 8.68 | — |
| A5-S | 3.1 | D13. 1.05 | 358 | 27 | 0.003 | 0.001 | 5.13 | 5.49 | 6.17 | — | S1 |
| A5-D | | | | | 11.5 | 3.0 | 7.29 | 6.33 | 6.54 | 8.48 | — |
| A6-S | 4.7 | D16. 1.70 | 346 | 29 | 0.002 | 0.001 | 4.63 | 5.12 | 6.12 | — | F |
| A6-D | | | | | 21.8 | 5.1 | 6.10 | 6.32 | 6.53 | — | |
| A7-S | 4.9 | D16. 1.70 | 322 | 30 | 0.005 | 0.001 | 4.99 | 5.30 | 6.06 | — | F |
| A7-D | | | | | 23.0 | 7.6 | 6.28 | 6.43 | 6.44 | 8.49 | S2 |
| B1-S | 5.7 | D13. 2.11 | 273 | 25 | 0.002 | 0.005 | 2.40 | 2.83 | 3.16 | — | F |
| B1-D | | | | | 76.3 | 12.8 | 3.72 | 3.70 | 3.50 | 4.66 | S2 |
| B2-S | 4.7 | D10. 1.78 | 292 | 25 | 0.003 | 0.004 | 3.10 | 2.90 | 3.20 | — | F |
| B2-D | | | | | 16.7 | 15.9 | 3.90 | 3.44 | 3.39 | — | |
| B3-S | 4.0 | D10. 1.19 | 237 | 20 | 0.002 | 0.001 | 2.60 | 2.32 | 2.75 | — | F |
| B3-D | | | | | 26.7 | 18.9 | 3.19 | 2.80 | 3.02 | 4.05 | S1 |
| B4-S | 4.9 | D10. 1.78 | 292 | 24 | 0.003 | 0.001 | 2.84 | 2.70 | 3.15 | — | F |
| B4-D | | | | | 56.7 | 14.3 | 3.44 | 3.31 | 3.33 | — | |
| B5-S | 3.8 | D13. 2.11 | 286 | 26 | 14.3 | 8.0 | 5.02 | 5.35 | 3.79 | 5.00 | S1 |
| B5-D | | | | | 27.7 | 14.1 | 4.79 | 5.45 | 3.80 | 5.07 | — |
| C1-S | 5.7 | D19. 4.78 | 242 | 24 | 0.002 | 0.0003 | 3.41 | 4.18 | 3.65 | — | — |
| C2-D | | | | | 18.9 | 3.4 | 5.13 | 4.70 | 3.72 | 4.88 | S1 |
| C3-D | | | | | 40.8 | 8.1 | 5.36 | 5.06 | 3.84 | 5.06 | — |

F: 曲げ引張破壊, S1: 斜引張破壊, S2: 付着割裂を伴うせん断破壊

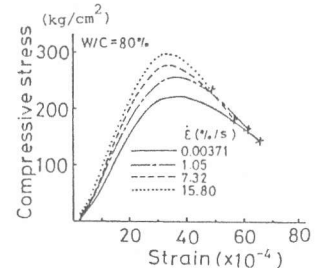


図-4 コンクリートの応力-ひずみ曲線の一つ

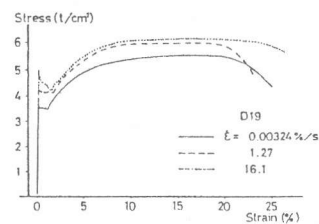


図-5 鉄筋の応力-ひずみ曲線

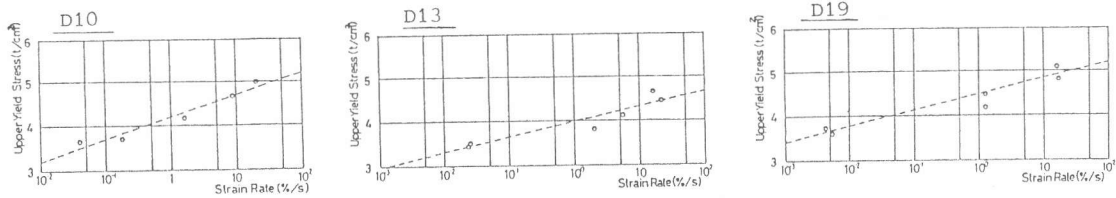


図-6 上降伏点とひずみ速度の関係

と同様に鋭いピークを示しており、最大荷重を越えてから荷重が減少する程度は静的に比べて大きい傾向を示している。静的荷重下において、A 3-S, A 7-S, B 3-Sはいずれも鉄筋が降伏し、最終的には圧縮部のコンクリートが圧壊する曲げ破壊を生じたのに対し、動的荷重下においては、A 3-D, A 7-Dは鉄筋降伏後付着割裂を伴うせん断破壊が生じた。また、B 3-Dは鉄筋降伏後、斜引張破壊が生じ、載荷速度により終局破壊形式に違いがみられた。図に示すように、動的荷重によりせん断破壊を生じた供試体の荷重-変位曲線は、耐力が急激に減少し、粘りのない破壊性状を示している。

表-2は、載荷速度がRC梁の耐力に影響を及ぼす要因を明確にするため、実験及び計算によって得られた曲げ及びせん断耐力を示したものである。ここで、曲げ耐力の計算値とは、実験によって得られた梁中央の鉄筋のひずみゲージから得られたひずみ速度に相当する降伏応力を図-6から求め、曲げ終局耐力を計算したものである。また、せん断耐力の算定には岡村、楢貝によって提案された(1)式を用いた。

$$V(I) = 0.94 f'_c \frac{1}{3} (0.75 + 1.4(a/d)) (1 + \beta_p + \beta_d) b d \dots (1)$$

ただし、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 $\beta_p = \sqrt{p_w} - 1 \leq 0.73$

p_w : 主鉄筋比、 $\beta_d = \sqrt{100/d} - 1 \geq 0$ 、 d : 有効高さ

ここで、 V は静的単調増加荷重下で引張鉄筋が降伏する以前に斜引張破壊を起こす場合の耐力を意味するものである。従って、RC梁の動的せん断耐力を求める場合、動的荷重下におけるせん断破壊機構は静的外力下と同じであると仮定し、ひずみ速度によるコンクリート強度の上昇のみを考慮することにした。式中の f'_c はコンクリートの引張強度、骨材のかみあわせ、dowel actionなどのせん断抵抗をすべて包含したものである。このため、動的荷重下において、式中の f'_c に影響を及ぼすと思われるひずみ速度の大きさを一義的に定義することは困難なので、ここでは便宜的に梁中央の鉄筋のひずみ速度を用い、このひずみ速度に相当するコンクリート強度を図-3から求めて動的せん断耐力(1)とした。また(II)は式(2)に示すように、(1)式によって得られた静的せん断耐力にひずみ速度によるコンクリートの引張強度の上昇率を考慮したものである。

$$V(II) = (\sigma_t:dynamic / \sigma_t:static) V(I) \dots (2) \quad \sigma_t: \text{引張強度}$$

表-2に示すように、動的荷重下における曲げ耐力は計算値とよく一致している。これは、曲げ耐力はひずみ速度による鉄筋の降伏応力の上昇が主な原因で上昇したことを示している。一方、動的荷重下において、鉄筋が降伏する以前にせん断破壊を生じた場合(B 5, C 1~C 3)の耐力は、静的耐力に比べて著しい増大を示し、載荷速度による耐力の上昇は、曲げにおける耐力の上昇と同じかあるいはそれ以上であることが認められた。この場合のせん断耐力の計算値は(I)より(II)の方がより近い値を示している。このこと

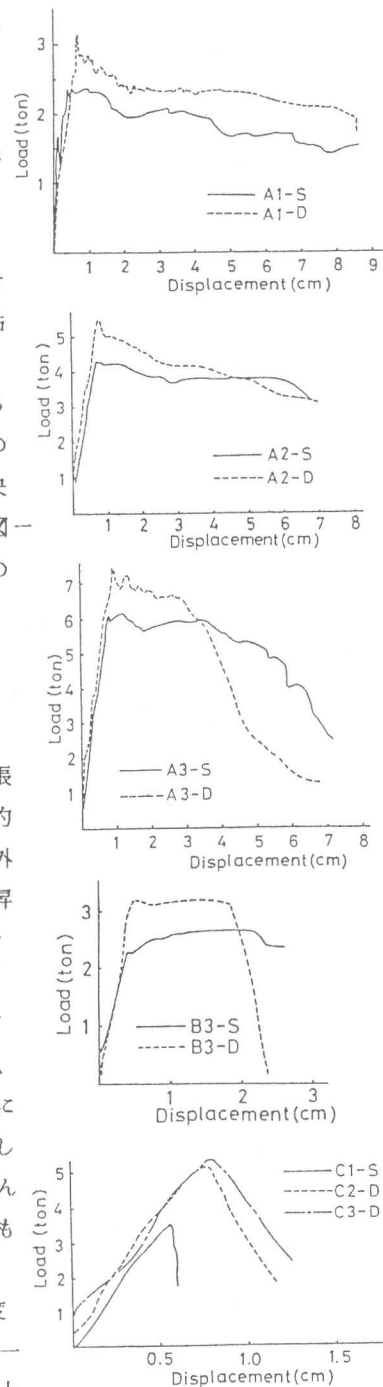


図-7 荷重-変位曲線

は、動的荷重下におけるせん断破壊機構は、静的におけるものと異なっていることを示唆している。上記の事実と、本実験において破壊形式に違いが生じたものはすべて鉄筋が降伏してからであることを考え合わせると、荷重速度により終局破壊形式に違いが生じる可能性は、主に主鉄筋が降伏してからのせん断耐力に支配されるものと思われる。そこで静的及び動的荷重下において、鉄筋が降伏してからの挙動について検討した。図-8は荷重点外側にある鉄筋のひずみと梁中央部の変位との関係を示したものである。同一変位におけるひずみの大きさは、動的荷重による方が静的よりも大きな値を示している。これは、荷重-変位関係のところでも述べたように、同一変位では、動的荷重による方が鉄筋の降伏点が上昇し、ひずみも増大するためである。また、ひびわれ間隔は静的と動的ではほぼ同じであることから、同一変位では、せん断支間における曲げひび割れ幅も動的荷重による方が大きくなることが考えられ、その結果骨材のかみあわせによるせん断抵抗力は静的に比べて減少するものと思われる。さらに、動的荷重下におけるコンクリートの応力-ひずみ特性は図-4に示したように、静的に比べて耐力が急激に減少する傾向がある。このことをも考え合わせると、主鉄筋が降伏してからのせん断耐力は、動的荷重下における方が静的に比べて、減少する割合は大きくなり、その結果、破壊形式に違いが生じたものと推測される。なお、異形鉄筋の付着特性は荷重速度によって異なることも指摘されているので、今後荷重速度による付着特性についても検討を行う必要がある。

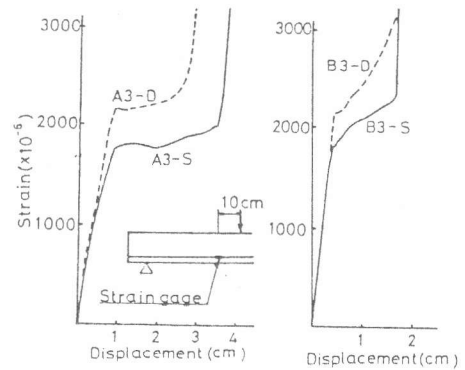


図-8 せん断支間の鉄筋のひずみと変位

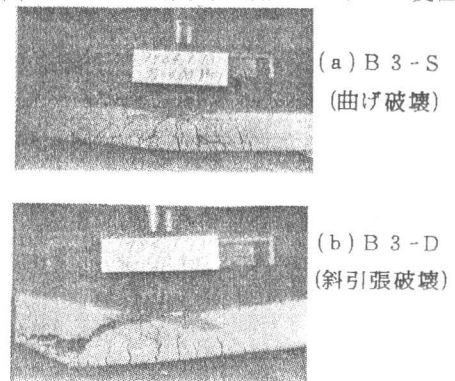


写真-1 終局破壊状況の一例

4. 結論

- (1) 動的荷重を受けるRC部材の耐力は、静的荷重下における耐力と比べて著しく増大することが認められた。この場合、曲げ耐力の増加はひずみ速度による鉄筋の降伏点の上昇を考慮することによって推定することが可能である。しかし、せん断耐力に関しては、静的荷重下におけるせん断破壊機構と同じように扱うことはできないと思われる。
- (2) 地震などにより通常起り得ると考えられる荷重速度に対して、RC部材の終局破壊形式は異なる場合があることが確認された。本実験では、終局破壊形式の相違は主鉄筋降伏後に生じており、鉄筋が降伏してからのせん断耐力の低減する程度は動的による方が大きくなることが主な原因であると考えられる。

本研究を行うにあたって、山梨大学助教授檜貝先生から貴重なご助言を頂いた。また当時埼玉大学卒論生であった、小野、市川両君に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。本研究は昭和58年度文部省科学研究費(課題番号58550320)を受けて行われたものである。

(参考文献)

- (1) 最上達雄・小林淳: 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力と変形に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和54年9月
- (2) 竹田仁一・立川博之・岡村功三: 鉄筋コンクリート梁高速せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和45年9月
- (3) 遠藤孝夫他: 鉄筋コンクリート柱部材の動的特性に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983.6
- (4) 岩崎敏男他: 鉄筋コンクリート構脚の動的耐力に関する実験的研究, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集, 1982.12
- (5) 陸好宏史・町田篤彦: 鉄筋コンクリート構脚モデルの動的特性に関する研究, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集, 1982.12
- (6) 岩井哲他: 構造部材の挙動に及ぼす荷重速度の影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, No. 314, 昭和57年4月
- (7) Okamura, H. and Higai, T.: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement, Proc. of J.S.C.E., 1980, Aug.
- (8) E. vos and H.W. Reinhardt: Influence of Loading Rate on Bond Behavior of Reinforced Steel and Prestressing Strands, Materials and Structures, Vol.15, No.85, 1982, Jan./Feb.