

論文

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の動的応答

荻山陽太郎*, 鍛冶哲理*, 藤山知加子**

*法政大学大学院デザイン工学研究科修士課程 (〒160-0843 東京都新宿区市谷田町 2 丁目)

** 博(工), 法政大学准教授, デザイン工学部 (〒160-0843 東京都新宿区市谷田町 2 丁目)

本研究では衝撃荷重が鉄筋コンクリート版の応答に及ぼす影響を検討した。荷重の載荷速度やコンクリートの材料条件をパラメータとし非線形有限要素解析を行った結果、荷重の載荷速度の増加に伴い鉄筋コンクリート版の剛性および耐荷力が上昇する傾向が確認された。一方、載荷速度一定で材料強度のみを増加させた場合、耐荷力は上昇するが、動的な荷重状態を考慮した場合と比較して破壊パターンに違いが見られることを指摘した。

キーワード：高速載荷，衝撃，RC 版，3次元非線形有限要素解析

1. はじめに

橋梁床版の設計において、衝撃的な荷重の影響は「衝撃係数」を用いて基本荷重を割り増す、すなわち作用力を増加させることで考慮されている¹⁾。衝撃荷重は、自動車が橋梁進入時に伸縮継手の段差部を走行した際に生じる鉛直方向の加速度や、自動車のサスペンション機構による上下振動から生じると考えられている。

一方、衝撃的な荷重が作用する際の応答側の変化については、高速載荷時の材料応答の変化に関しては、コンクリートの急速圧縮試験、急速引張試験などの材料実験により、ひずみ速度効果として多くの知見が得られている^{2,3)}にもかかわらず、現設計手法では明示的に考慮されていない。これは、構造物としての動的挙動は、載荷速度による材料応答の変化のみならず、拘束条件、配筋などの影響も受けるため、その検証が容易でないためと考えられる。これに対し、鉄筋コンクリート梁や鉄筋コンクリート版を対象として、ロックシェッド等を想定した重錘落下試験やその数値解析が行われ^{4,7)}、研究が進められているところである。

そこで本研究では、橋梁床版の設計においても必要と考えられる高速載荷時の鉄筋コンクリート版の基本的な挙動の変化を調べるため、矩形 RC 版を対象として、3次元非線形有限要素解析を行うものとした。まず既往の重錘落下実験で用いられた供試体を再現する FEM モデルを構築し、静的荷重下における挙動を把握した。次に衝撃荷重を模擬した高速載荷を施し、荷重の載荷速度による破壊パターンの違いについて検討を行った。さらに要素のひずみを抽出し、載荷速度によって局所的な材料の応答が受けた影響についても、検討を行った。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

本研究では、既往の研究で行われた RC 版の重錘落下試験の供試体⁷⁾を解析対象とした(図-1)。寸法は 2000×2000×180mm であり、D16 の鉄筋を 150mm 間隔で格子状に配置した単鉄筋 RC 版である。

構築した解析モデルを図-2に示す。モデルの分割は、文献⁸⁾を参考に要素が扁平にならないよう配慮した。床版内に配置されている鉄筋は、主鉄筋、配力鉄筋の両鉄筋を含む RC 要素としてモデル化した。材料諸元は実験値に従い、コンクリート圧縮強度 $f_c=26.6\text{N/mm}^2$ 、初期剛性 $E_c=28.0\text{kN/mm}^2$ 、鋼板の降伏点 345N/mm^2 とした。拘

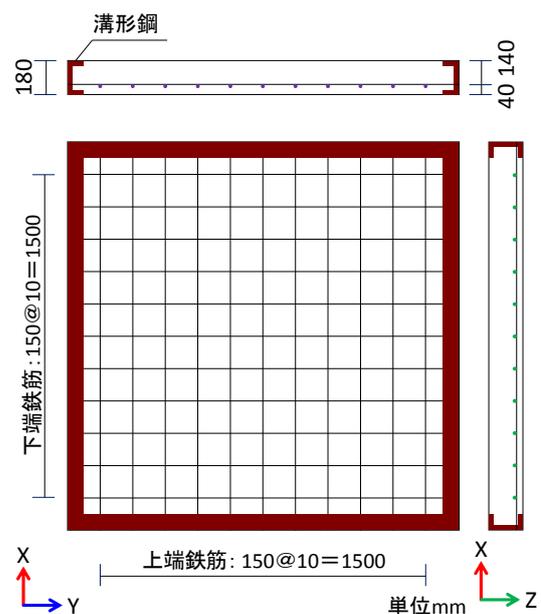


図-1 解析対象

束条件は4辺支持とした。

2.2 荷重条件

衝撃荷重を模擬するため、荷重速度をパラメータとして解析を行った。荷重ケースを表-1に示す。各荷重ステップの所要時間を短くすることで、動的な荷重状態を再現している。静的解析(1.6×10⁰kN/sec)を基準とし、荷重速度を10²倍から10⁶倍まで設定した。荷重位置は版中央の100mm×100mmとした。

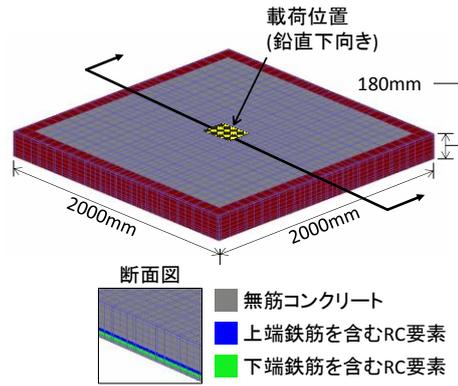


図-2 解析モデル

2.3 コンクリートおよびRCの構成則

コンクリートの構成則は、解析コード「COM3D」(東京大学コンクリート研究室開発)を用いて数値解析を行った。構成則には時間依存項が含まれており、構造物応答の時間依存特性を再現できることが示されている⁸⁾。

表-1 荷重ケース

ケース名	荷重速度(kN/sec)	倍率	静的 載荷 低速 載荷域
S(静的)	1.6 × 10 ⁰	× 1	静的 載荷 低速 載荷域
L3	1.6 × 10 ²	× 100	
L2	1.6 × 10 ³	× 1,000	
L1	1.6 × 10 ⁴	× 10,000	中速 載荷域
M2	1.6 × 10 ⁵	× 100,000	
M1	2.0 × 10 ⁵	× 125,000	高速 載荷域
H1	3.2 × 10 ⁵	× 200,000	
H2	4.0 × 10 ⁵	× 250,000	
H3	1.6 × 10 ⁶	× 1,000,000	

3. 解析結果

3.1 荷重—変位関係

図-3は、静的荷重載荷時のRC版下面中央における荷重—変位関係である。赤線部は既往の文献⁷⁾の実験値を示しており、本解析結果と比較した。この図から280kN程度で最大耐力に達し、急激に荷重が低下していることが確認できる。実験値と比較しても荷重—変位関係の挙動や最大耐力は良好に一致している。

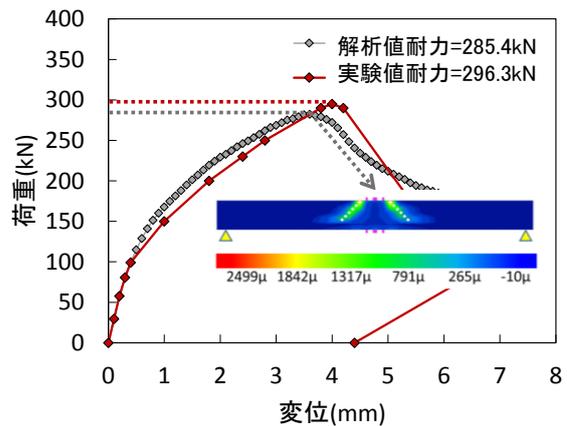


図-3 荷重—変位関係(静的解析)

また、図-3中に示したコンター図は、版中央断面の最大主ひずみ分布である。荷重位置から斜め下方向にひずみの集中領域が確認できる。これらの結果から、静的荷重下における本RC版の破壊形態は、押し抜きせん断破壊であると判断できる。これは実験でも確認された破壊形態であり、構築した解析モデルは、実験供試体を再現できていると言える。

図-4は、荷重速度を変化させ載荷した、RC版下面中央の荷重—変位関係である。ここでは差異が顕著な荷重ケースのみ示している。この図から、荷重速度の上昇に伴い、RC版の初期剛性の増加が確認できた。この傾向は、本研究の対象以外の重錘落下試験についても、定性的に確認されている⁹⁾。また、Case L3~L1程度の荷重速度では大きな変化はないが、Case M2以降の荷重速度から荷重—変位曲線の挙動が変化する結果となった。従って、RC版に影響を及ぼす荷重速度は、1.6×10⁵(kN/sec)以上の高速載荷域であると考えられる。

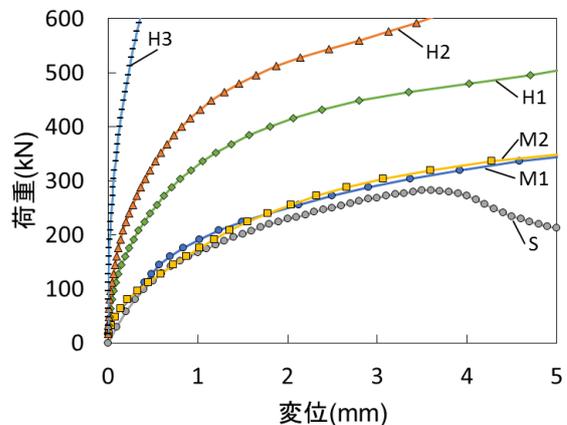


図-4 荷重—変位関係(衝撃応答解析)

3.2 RC版の変形性状、たわみ分布

ここでRC版の変形を詳細に把握するため、中央断面のたわみ(節点の鉛直方向変位)分布を、図-5、6に示す。対称性を考慮し1/2断面のみ示しており、斜線部は荷重位置である。ここでは静的解析で最大耐力に至った変位3.6mm付近までの推移に着目した。

低速載荷域(図-5(a)~(c))においては、たわみ分布が直線的な挙動を示しながら推移している。4辺単純支持の

拘束条件であるため、局所的な変形はなく、RC 版全体がたわむような曲げ変形をしている。しかしながら、版中央変位が約 5mm に達すると、載荷位置周辺が周囲の変形と比較して凹むように変形していることがわかる。従って最終的には押し抜きせん断破壊に至ったと言える。

一方、高速載荷域(図-6(b), (c))では、低速載荷域とは明らかに異なる。端部ではほぼたわみが発生していない事に対し、版中央部では端部と比較して大きくたわんでいる。また、中速載荷域である Case M2(図-6(a))は、比較的荷重が小さい間は低速載荷域での変形性状に近いが、荷重 480kN で支間中央のたわみが周囲に比べて増加しており、低速載荷域と高速載荷域の中間の様相を呈していると言える。つまり、載荷速度が増加するに伴い傾向は顕著に表れていた。なお、このような載荷速度による変形性状の変化は、既往の実験研究⁵⁾においても同様に確認されている。

これらの結果から、低速載荷時においては、載荷初期では曲げ作用が支配的となり版全体が一様に変形していくが、最終的には押し抜きせん断破壊の形態に移行していく。それに対し高速載荷を受ける RC 版は、載荷初期からせん断破壊モードとして破壊が進行し、押し抜きせん断破壊に至っていると考えられる。従って、載荷速度は版が押し抜きせん断破壊に至るまでの破壊過程に影響を及ぼし、RC 版は載荷速度によって異なる変形性状を示すと言える。

3.3 着目要素のひずみの推移

さらに、版内部コンクリートの破壊進展過程について考察するため要素のひずみを抽出した。RC 版が押し抜きせん断破壊に至るまでの過程において、着目要素で支配的なひずみの成分を分析することを目的としている。ここでは図-7 に示した、せん断ひび割れが発生する載荷位置の斜め下付近(SH)、版圧縮縁(LC)、載荷直下の版引張縁(LT)の3要素に注目した。

a) せん断ひび割れ位置(要素 SH)

まず、せん断ひび割れ発生位置のコンクリート要素におけるひずみの推移を図-8 に示す。低速載荷域である Case L3~L1(図-8(a)~(c))において、載荷 100kN 付近から X 方向ひずみが急増しており、曲げ作用を受けている事がわかる。せん断ひずみは載荷初期から増加しており、150kN 付近から急増している。よって低速載荷域では、荷重 100kN 以降曲げ、せん断の両方の力が共存していると判断できる。また、Case L3~L1(図-8(a)~(c))でひずみの挙動に大きな変化は見られない。

対して高速載荷時(図-8(d)~(f))では、200kN 付近まで X 方向ひずみはほとんど増加していないことがわかる。特に最も早い載荷状態である Case H3(図-8(f))では載荷 250kN 以降も X 方向ひずみの増加はほとんど確認できない。一方せん断ひずみは低速載荷時(図-8(a)~(c))とほぼ

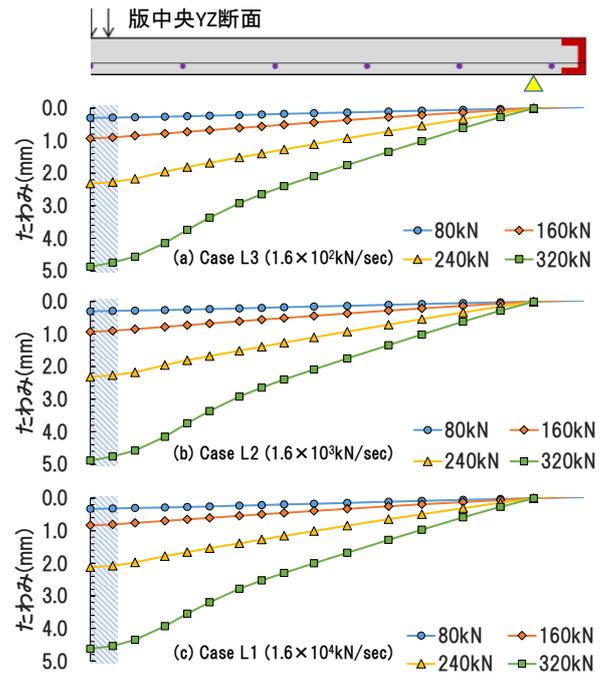


図-5 たわみ分布(低速載荷域)

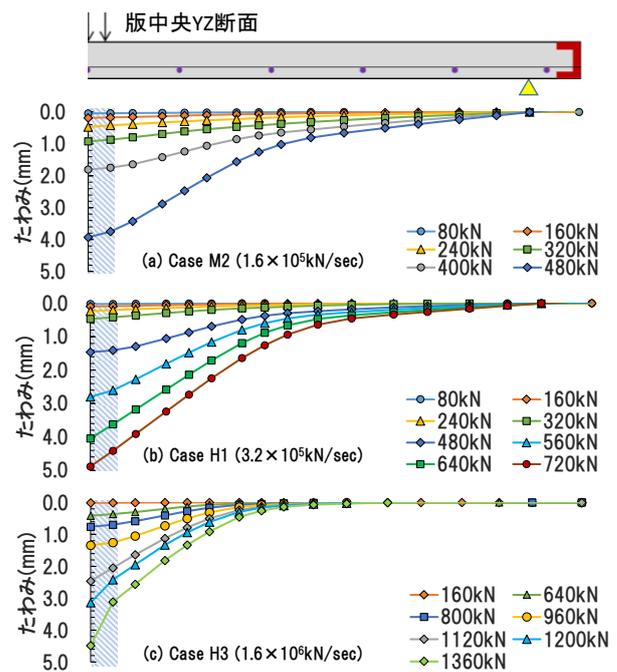


図-6 たわみ分布(中速載荷～高速載荷域)

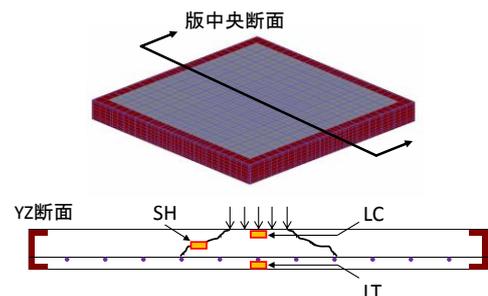


図-7 版中央断面における着目要素

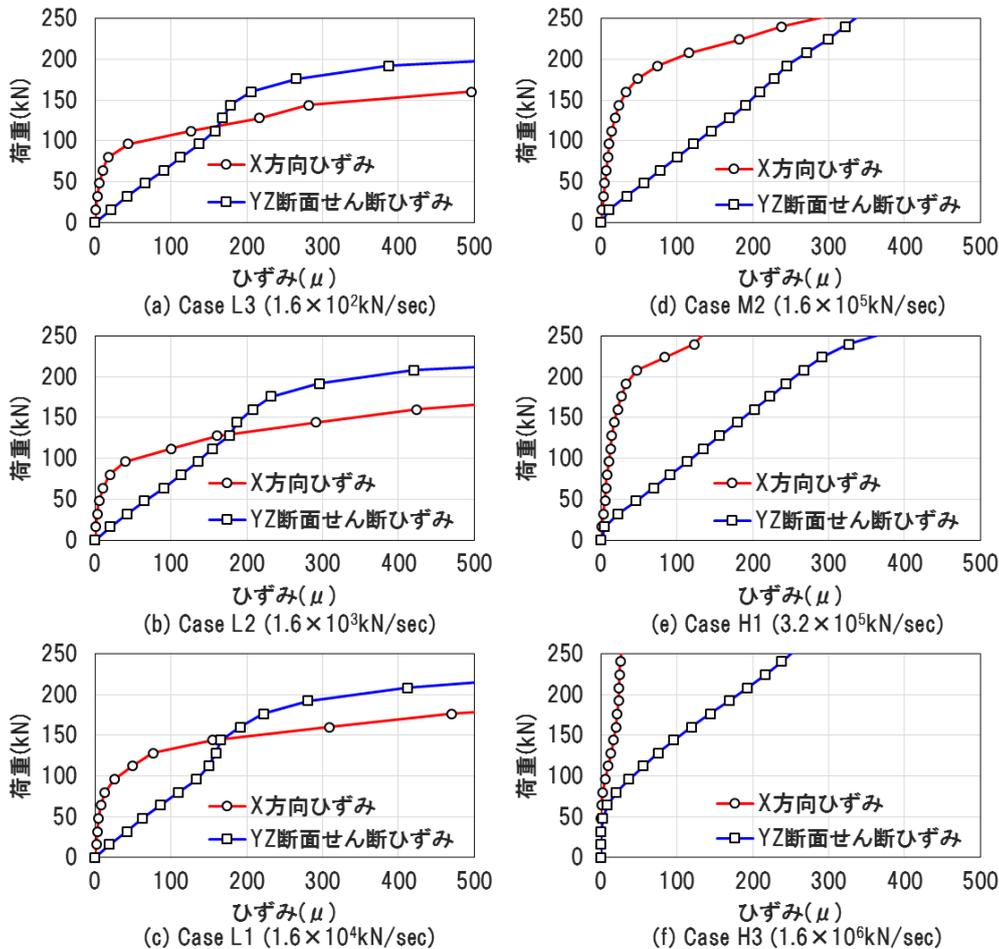


図-8 着目要素 SH におけるひずみの推移

同様の挙動で増加しており、X 方向ひずみが増加し始める 200kN から 250kN の区間までは、せん断成分が支配的な状態となっている。従って、載荷初期からせん断ひび割れが発生していたと考えられる。

b) 版圧縮縁(要素 LC)

図-9 は版圧縮縁のコンクリート要素における圧縮ひずみの推移を示したものである。低速載荷、高速載荷ともにピーク値までひずみが単調に増加している。また、全体的に低速載荷域のケースに比べて高速載荷のケースは直線的な挙動を示している。ここで、載荷した荷重と着目要素の圧縮ひずみの傾き(以下、着目要素圧縮特性と呼ぶ)に着目すると、載荷速度の増加に従い、着目要素圧縮特性は増大する傾向にある事がわかる。

次に、着目要素の圧縮ひずみのピークに着目すると、低速載荷域では約 -2300μ であるが、高速載荷域である Case H1 では -1200μ 、Case H3 では -950μ でピークに至っている事が確認できる。さらに、ピークに至る荷重は、Case L3、Case L1 では 300kN 付近であるのに対し、Case H1 では 400kN、Case H3 では 650kN である。載荷速度の増加に伴いコンクリートの圧縮剛性が増加する「ひずみ

速度効果」はよく知られている^{2,3)}が、本研究での最大耐荷力記録時(ピーク時)の着目要素圧縮ひずみ値の減少は、この効果の範囲を超えるものであった。これより、載荷速度による版の変形性状や破壊モードの変化は、個々の要素のひずみ速度効果だけではなく、いくつかの要素の急激な状態の変化が版全体の応力再分配機構に影響を与えたことも、原因として考えられる。

以上、載荷速度の増加はコンクリートの着目要素圧縮特性及び版全体の耐荷力に影響を与えており、載荷速度の増加に伴いそれらも増加すること分かった。また、荷重-変位関係と同様に、変形挙動に大きく影響を及ぼすのは Case M1 以降の高速載荷域である事がわかった。

c) 版引張縁(要素 LT)

図-10 は版引張縁のコンクリート要素におけるひずみの推移を示したものである。低速載荷域のケースは載荷直後から引張ひずみが増加し、50kN 以降は大きく伸びている事が確認できる。このことから、50kN 付近で版下面に曲げひび割れが発生している。それに対し高速載荷域である Case H3 は、100kN 付近からひずみが増加している。その後ひずみは伸びていき、200kN 付近から急激に

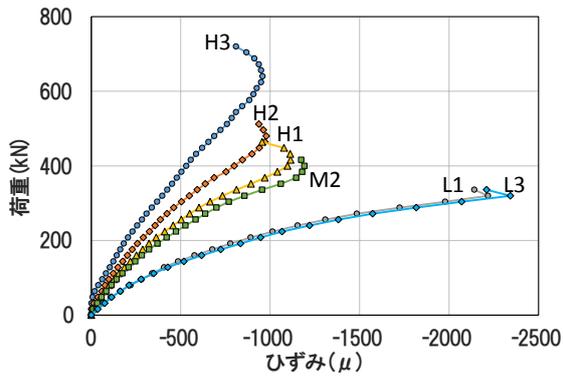


図-9 着目要素 LC におけるひずみの推移

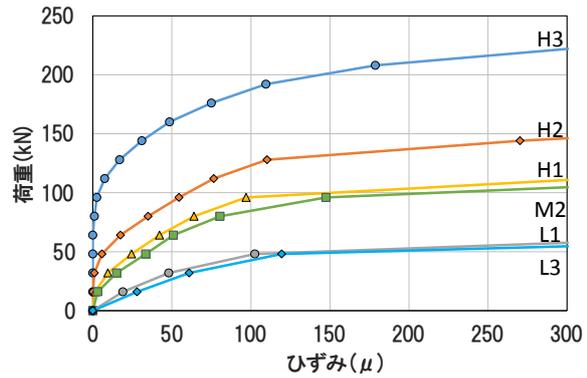


図-10 着目要素 LT におけるひずみの推移

表-2 解析条件

ケース名	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
fc50	50.0	2.0
fc100	100.0	2.0
ft4	26.6	4.0
ft8	26.6	8.0

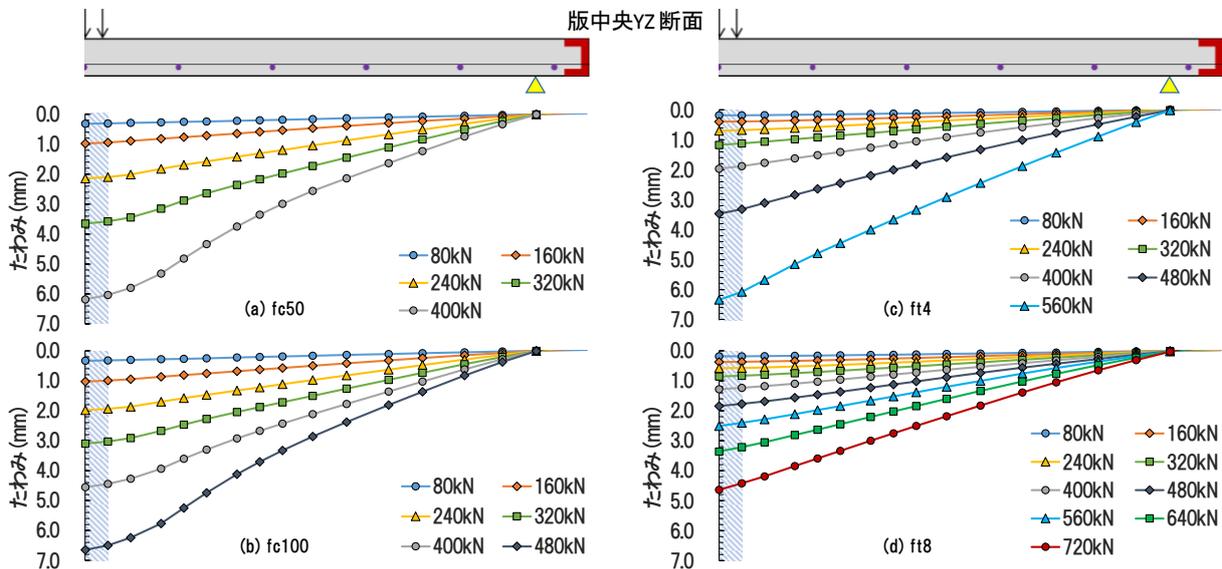


図-11 たわみ分布

増加している. 従って, Case H3 において曲げひび割れが発生したのは 200kN 以降であると推測され, 低速載荷時と比較して, 高速載荷時のひび割れ進展過程が異なることが予見される.

以上より, 載荷速度によって RC 版の破壊性状が異なることは, 既往の実験研究⁵⁾だけでなく本研究の数値解析によっても示すことができた. また, 本検討は試験体レベルに留まるものであるため, 今後実橋レベルの検討が必要であると考えられる.

4. 材料強度をパラメータとした解析

4.1 解析条件

前節までの結果から, 載荷速度を増加させると, RC 版の変形と破壊性状が異なることがわかったが, 材料要因

(ひずみ速度効果)と, 構造要因(版の応力分配の変化)との寄与をそれぞれ考察するには至っていない. そこで, 材料要因(ひずみ速度効果)のみの影響を調べるため, 材料強度のみをパラメータとした解析を実施し, 前節の解析結果と比較することとした.

表-2 に解析ケースを示す. 本検討ではコンクリートの速度依存性に注目しているため, 圧縮強度, 引張強度について静的材料試験で得られる物性値よりも大きな値を設定し, それぞれ fc シリーズ, ft シリーズとした. 載荷速度は表-1 の静的載荷に相当する $1.6 \times 10^6 \text{ kN/sec}$ を全ての解析ケースに適用した.

4.2 たわみ分布

変形性状, 破壊パターンを比較するため, 前節と同様に, RC 版のたわみ分布の推移を調べた. 図-11 に各解

析ケースのたわみ分布を示す。この図から、全ての解析ケースにおいて、荷重が 240kN 程度以下の場合にはたわみ分布が直線的な挙動を示しながら推移していることがわかる。この段階までは、RC 版は全体的にたわむような変形していると考えられる。

この後、圧縮強度を増加させた fc シリーズ(図-11(a), (b))では、それぞれ 400kN, 480kN 載荷時に載荷位置付近でたわみ分布の傾きが変化し、陥没するような分布を示している。これは、最終的に版中央部が押し抜きせん断破壊に至っているものと推測される。一方、引張強度を増加させた ft シリーズ(図-11(c), (d))では、400kN 以降もたわみ分布の傾きの変化は確認できない。これは、高い引張強度を用いたためひび割れが発生しにくく、全体が弾性的な挙動を示したままであったためである。

また、図-3 で示した静的解析において最大耐力 280kN を記録した際の変位は 3.6mm であるが、図-11 の各ケースで同程度のたわみを有するのに要した荷重の大きさを調べると、いずれのケースにおいても 300kN を超えていた。つまり、材料強度の変更により、同程度のひずみを得るのに必要な荷重は大きくなり、結果として高い耐力を示すことは確認できたが、前節の高速載荷時のような明確な破壊パターンの変化は得られなかった。

本解析結果より、衝撃的な高速荷重を受ける鉄筋コンクリートの挙動を考える際に、材料の「ひずみ速度効果」を見込むように各要素の応答特性(応力-ひずみ関係)を一様に割り増すだけでは、変形性状や破壊モードの変化といった実際の挙動を再現するのは難しいことがわかった。

5. 結論

本研究では、矩形 RC 版を対象とし、載荷速度と材料強度をパラメータとして、3 次元非線形有限要素解析を実施した。RC 版の動的応答に関して以下の知見を得た。

1. 載荷速度を変えることによって衝撃荷重を模擬した数値解析を実施した結果、載荷速度の上昇に伴い、RC 版の初期剛性の増加が再現された。
2. RC 版の変形性状を調べた結果、載荷速度によって破壊パターンに違いが確認された。低速載荷時には曲げ作用が先行し下面にひび割れが発生した後、せん断モードに移行し押し抜きせん断破壊に至った。一方高速載荷時は、載荷初期からせん断ひび割れが発生し、押し抜きせん断破壊に至った。
3. RC 版のコンクリート要素に着目し、ひずみの推移を追跡した。せん断ひび割れ位置のひずみの推移を調べた結果、高速載荷になるにつれて曲げひずみが発生せず、せん断ひずみが卓越していた。載荷初期からせん断ひび割れが進展していたと考えられる。

4. 圧縮縁、引張縁のひずみの推移に着目すると、載荷速度が増加するに従い、版全体の耐力に対して記録されるひずみの数値が小さくなる傾向が確認された。すなわち、載荷速度による版の変形性状や破壊モードの変化は、個々の要素のひずみ速度効果だけではなく、いくつかの要素の急激な状態の変化が版全体の応力再分配機構に影響を与えた可能性がある。
5. ひずみ速度効果のみを検証するため材料強度を増加させ一定の載荷速度で解析を行った結果、高速載荷時のような明確な破壊パターンの変化は得られなかった。つまり、単純に荷重や強度を割り増すだけでは、動的な応答を再現することは難しいと考えられる。

現在の橋梁床版の設計では、衝撃係数によって作用を割り増すが、応答側の変化は直接的には考慮されていない。これに対し、本検討では、高速載荷を受ける構造物の動的応答特性の変化が、変形性状や破壊モードといった全体挙動にさまざまな影響を及ぼすことを定量的に示すことができた。今後さらに知見を蓄積していきたい。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説, I 共通編, pp.27-31, 2011
- 2) P. H. Bischoff and S. H. Perry: Compressive behaviour of concrete at high strain rates, *Material and Construction* 24, pp. 425-450, 1991
- 3) 森孝二, 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 佐藤紘志: 高ひずみ速度下におけるコンクリートの圧縮および引張強度特性に及ぼす含水率の影響, *構造工学論文集* Vol. 47A, pp. 1673-1681, 2001
- 4) Satadru Das Adhikary, Bing Li, Kazunori Fujikake: Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading condition, *Nuclear Engineering and Design* 259, pp.14-28, 2013
- 5) Ayaho Miyamoto, Michael W. Ling, Manabu Fuji: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, *ACI Structural Journal*, No. 88-S55, 1991
- 6) 三上浩, 岸徳光, 今野久志, 岡田慎哉: RC 版の静的・衝撃押し抜きせん断性状に与える上端鉄筋の影響 *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 29, No. 3, pp. 745-750, 2007
- 7) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: 支持条件の異なる RC 版の静的及び衝撃荷重載荷実験, *構造工学論文集*, Vol. 56A, pp. 1160-1168, 2010
- 8) Koichi Maekawa, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi: Multi-scale Modeling of Structural Concrete, *Taylor & Francis*, pp. 426-491, 2009