

衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位の解析的評価

Analytical evaluation on maximum deflection responses of RC beams subjected to impact loadings

藤掛一典*, リー・ビン**, サム・スーン***
Kazunori Fujikake, Bing Li and Soeun Sam

*博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**Ph.D, ナンヤン工科大学准教授, 土木環境工学科 (639798 シンガポール共和国ナンヤン大通りブロック N1)

***防衛大学校理工学研究科前期学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

The aim of this study was to develop an analytical model to predict an important performance index (maximum midspan deflection) to evaluate the damage levels of RC beams subjected to impact loadings. In the analytical model, a perfectly plastic collision was assumed between the drop hammer and the RC beam. The maximum midspan deflection was calculated from the load-midspan deflection relationship evaluated by the nonlinear analysis proposed in this study, in which the loading rate effects were duly considered, following the law of conservation of energy after impact. The analytical model is a good agreement with the experimental midspan deflection when the RC beams exhibit only overall flexural failure.

Key Words: RC beam, impact loading, maximum deflection, overall flexural failure, load-deflection relationship, loading rate effect

キーワード: RC 梁, 衝撃荷重, 最大変位, 全体曲げ破壊, 荷重-変位関係, 載荷速度効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の中には, 落石・土石流などの自然的要因あるいは車両・船舶・航空機や重量物等の衝突事故や爆薬・火薬・ガス等の爆発事故などに起因する人為的要因によって発生する種々の衝撃荷重を考慮する必要があるものがある。近年, このような衝撃荷重を受ける RC 構造物の構造安全性を合理的に検討するために, 性能照査型の耐衝撃設計法を開発することが強く望まれている¹⁾。

衝撃荷重を受ける RC 構造部材の応答は, 図-1 に示すように動的効果を伴った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与した局所的な応答であり, もう一つは比較的長時間に渡る部材全体の弾塑性応答に関与した全体応答である²⁾。衝撃荷重を受けると, RC 版部材では貫入, 裏面剥離, 貫通, 押し抜きせん断等の局所的破壊が主に問題にされるのに対して³⁾⁻⁸⁾, RC 梁部材では全体破壊が問題になることが多い⁹⁾⁻¹³⁾。

また, RC 梁が衝撃荷重を受けると瞬時に高速度で

変形するために構成材料であるコンクリートや鉄筋には極めて大きなひずみ速度が発生することになる。このようにコンクリートや鉄筋に大きなひずみ速度が作用すると, それらの力学的特性が変化する, いわゆるひずみ速度効果と呼ばれる現象が生じることが知られている。¹⁴⁾⁻¹⁸⁾

既に著者らは衝撃荷重を受け, 全体変形する RC 梁の損傷の程度と最大応答変位の間には密接な相関があることを明らかにしている¹⁹⁾。したがって, 衝撃荷重を受ける RC 梁の構造安全性を適切に評価するためには, その曲げ耐力や重要な損傷指標としての最大応答変位を解析的に求めることが重要となる。

そこで本研究では, 衝撃荷重を受けて全体曲げ変形する RC 梁を対象として, 載荷速度の影響を考慮した RC 梁の曲げ耐力や終局変位を評価するための非線形解析方法を示すとともに, 衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位を求めるための解析モデルを提示することを目的とする。

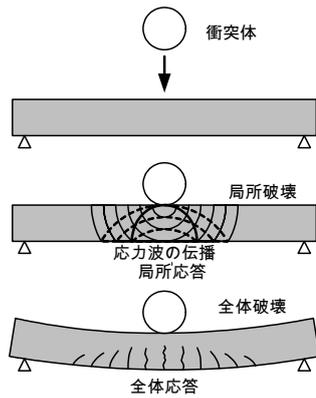


図-1 衝撃荷重を受ける RC 梁の応答

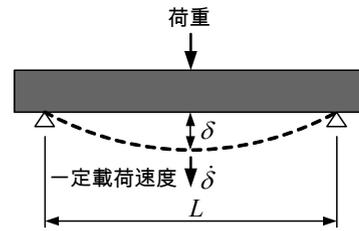


図-2 解析対象

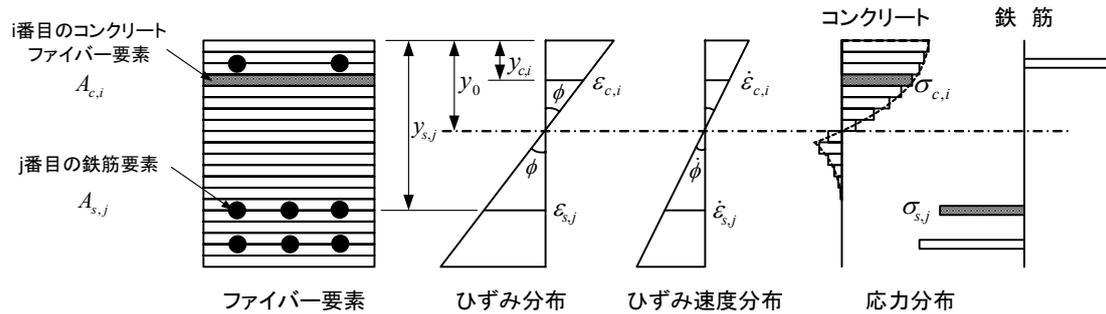


図-3 ひずみ速度分布を考慮した断面解析

2. 荷重速度の影響を考慮した RC 梁の荷重-変位解析

2.1 解析における基本的な仮定

RC 梁が衝撃荷重を受けると瞬時に高速度で変形するために、構成材料には極めて大きなひずみ速度が発生することになる²⁰⁾。したがって、衝撃荷重下における RC 梁の最大応答変位量を計算するためには、構成材料のひずみ速度効果^{14)-18), 21), 22)}を考慮した上で RC 梁の曲げ抵抗力と変位の関係を解析的に評価することが望ましいと考える。ここでは、図-2 に示すように支間長 L で単純支持された RC 梁の支間中央部に荷重を受け、梁中央部の載荷速度が一定値 $\dot{\delta}$ で変位する場合の RC 梁の荷重-変位関係を解析的に評価することにする。本解析方法は、①コンクリートおよび鉄筋のひずみ速度効果を考慮した断面解析による曲げモーメント-曲率関係の算定、および②その計算結果に基づく RC 梁の荷重-変位関係の算定から構成される。

本断面解析では、図-3 に示すように RC 梁部材断面を微小なファイバー要素に分割し、a)変形前に平面であった部材断面は、変形後も平面を保つ、b)分割した各微小要素内における応力およびひずみは一定とする、c)せん断変形は考慮しない、d)鉄筋とコンクリートの付着は完全とするといった一般的な仮定²³⁾⁻²⁷⁾に加えて、載荷速度の影響を考慮するために、e)構成材料のひずみ速度効果を考慮した応力-ひずみ関係は既知とする、f)断面の曲率は一定曲率速度 $\dot{\phi}$ で変化するもの

とするという2つの仮定を新たに導入する。

2.2 ひずみ速度効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係

図-4 に模式的に示すように、任意のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ におけるコンクリートの圧縮領域の応力-ひずみ関係を、次式で与える¹⁸⁾。

$$\sigma = \frac{AX + (B-1)X^2}{1 + (A-2)X + BX^2} f'_{cd} \quad (1)$$

ここで、 A 、 B =定数、 X =無次元化ひずみ、 f'_{cd} =ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ における動的圧縮強度である。定数 A 、 B および無次元化ひずみ X は表-1 のように与えるものとする¹⁸⁾。式(1)による関係は初期弾性係数 E_{0d} 、動的圧縮強度 f'_{cd} ならびに動的圧縮強度時のひずみ ϵ'_{cd} の三つのパラメータによって完全に記述される。これらのパラメータはひずみ速度の関数として次のように与える¹⁶⁾。

$$E_{0d} = E_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)^{0.002 \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right) \right]^{1.12}} \quad (2)$$

$$f'_{cd} = f'_c \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006 \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right) \right]^{1.05}} \quad (3)$$

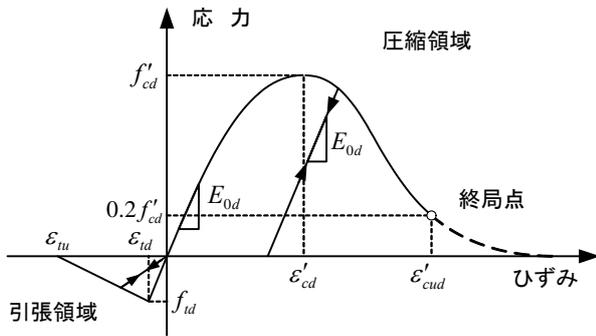


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

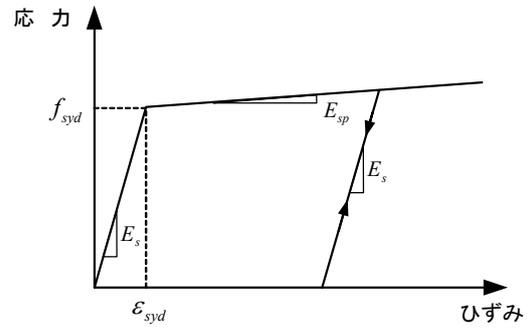


図-5 鉄筋の応力-ひずみ関係

表-1 定数 A , B および無次元化ひずみ X

応力の上昇域 ($\varepsilon \leq \varepsilon'_{cd}$)	応力の下降域 ($\varepsilon > \varepsilon'_{cd}$)
$A = E_{0d} \varepsilon'_{cd} / f'_{cd}$,	$A = E_{0d} \varepsilon'_{cd} / f'_{cd}$, $B = 1$,
$B = (A - 1)^2 / 0.55 \geq 1 - A$, $X = \varepsilon / \varepsilon'_{cd}$	$X = (\varepsilon / \varepsilon'_{cd})^m$ ここで, $m = 1.04 + 2 \times (f'_{cd} / 100)^2$

$$\varepsilon'_{cd} = \varepsilon'_c \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{\left[-0.036 + 0.01 \text{Log} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right) \right]} \quad (4)$$

ここで, E_0 =静的荷重における初期弾性係数, $\dot{\varepsilon}_{sc}=1.2 \times 10^{-5}$ (1/sec), f'_c =静的圧縮強度, ε'_c =静的圧縮強度時のひずみであり, $\dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_{sc}$ の場合には, $E_{0d} = E_0$, $f'_{cd} = f'_c$, $\varepsilon'_{cd} = \varepsilon'_c$ とする. 圧縮領域における除荷および再荷重は, 図-4 に示すように初期弾性係数 E_{0d} と同じ勾配を有する直線経路をたどるものと仮定する. なお本研究では, コンクリートにある程度圧壊が生じることを許容する軟化領域における動的圧縮強度の20%に相当する点を終局状態と定義する.

一方, 図-4 に示すように引張領域におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を次式で与える²⁸⁾.

$$\sigma = E_{0d} \varepsilon \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_{id}) \quad (5a)$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{nu}}{\varepsilon_{nu} - \varepsilon_{id}} f_{id} \quad (\varepsilon_{id} > \varepsilon \geq \varepsilon_{nu}) \quad (5b)$$

$$\sigma = 0 \quad (\varepsilon < \varepsilon_{nu}) \quad (5c)$$

ここで, f_{id} =ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に対応する動的引張強度, ε_{id} =動的引張強度時のひずみ($= f_{id} / E_{0d}$), $\varepsilon_{nu} = -4.0 \times 10^{-4}$ である. なお, 動的引張強度 f_{id} は Ross らによって提案された次式で与える²¹⁾.

$$f_{id} = f_t \exp \left[0.00126 \left(\text{Log}_{10} \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{st}} \right)^{3.373} \right] \quad (6)$$

ここで, $\dot{\varepsilon}_{st} = 1.0 \times 10^{-7}$, f_t = 静的引張強度

($f_t = -0.23 f'_c{}^{2/3}$ ²⁹⁾) である. なお, $\dot{\varepsilon} < \dot{\varepsilon}_{st}$ の場合には $f_{id} = f_t$ とする. ひび割れが生じた後の除荷ならびに再荷重は, 図-4 に示すように弾性剛性の低下を考慮した直線経路に従うものとした²⁸⁾.

2.3 ひずみ速度効果を考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係

ひずみ速度効果を考慮した鉄筋の応力-ひずみ関係には図-5 に示すバイリニア型の関係を用いる. ここでは, 弾性係数(E_s)および降伏後の塑性硬化係数(E_{sp})は荷重速度によらず一定とする. ただし, 降伏強度(f_{syd})はひずみ速度の影響を受けるものとし, 高橋によって提案された次式で与える²⁰⁾.

$$f_{syd} = f_{sys} (1.202 + 0.040 \times \log_{10} \dot{\varepsilon}) \geq f_{sys} \quad (7)$$

ここで, f_{sys} =静的荷重における降伏強度である. 鉄筋の応力-ひずみ関係は次式で与える.

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon \quad (\varepsilon \leq \varepsilon_{syd}) \quad (8a)$$

$$\sigma = f_{syd} + E_{sp} (\varepsilon - \varepsilon_{syd}) \quad (\varepsilon > \varepsilon_{syd}) \quad (8b)$$

ここで, ε_{syd} =動的降伏強度時のひずみ($= f_{syd} / E_s$)である. また, 除荷ならびに再荷重は弾性係数 E_s と同じ勾配を有する直線経路をたどるものとした.

2.4 RC 梁の荷重速度と断面の曲率速度の関係

図-2 に模式的に示すように, 単純支持された RC 梁の中央に集中荷重が作用して, 荷重速度 $\dot{\delta}$ で変形する梁の断面解析を行う場合, 梁の荷重速度($\dot{\delta}$)と断面

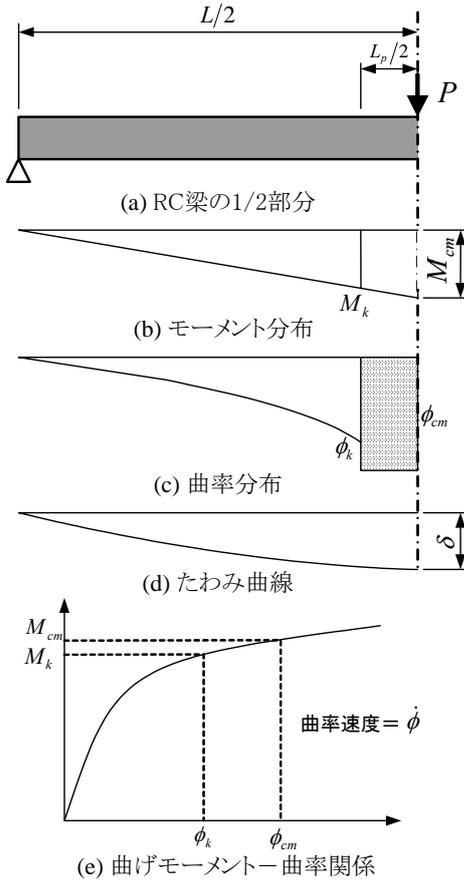


図-6 荷重-変位関係のための解析方法

の曲率速度($\dot{\phi}$)の関係が必要になる。図-2に示す単純支持された梁の中央部のたわみ(δ)と曲率(ϕ)の間には、線形弾性を仮定すると次の関係がある³⁰⁾。

$$\phi = \frac{M}{EI} = \frac{12}{L^2} \delta \quad (9)$$

本研究では、曲率速度($\dot{\phi}$)と梁の荷重速度($\dot{\delta}$)の間にも、同様に次の関係が成り立つものと仮定する。

$$\dot{\phi} = \frac{12}{L^2} \dot{\delta} \quad (10)$$

一般的にコンクリートや鉄筋の力学的特性にひずみ速度が及ぼす影響は、式(2)~(4)、(6)、(7)で与えられるようにひずみ速度の対数関数として表される。すなわち、ひずみ速度が2~3倍異なった場合でも力学的特性にひずみ速度が及ぼす影響はわずかであるといえる。したがって、式(10)のような仮定もある程度妥当であると考えられる。

2.5 曲率速度の影響を考慮した断面解析

図-3に示すように、RC梁断面を n 個のファイバー要素に分割すると、断面に作用する軸力と曲げモーメントは次式により得られる。

$$N = \int_A \sigma dA = \sum_{i=1}^n \sigma_{c,i} A_{c,i} + \sum_{j=1}^m \sigma_{s,j} A_{s,j} \quad (11)$$

$$M = \int_A \sigma y dA = \sum_{i=1}^n \sigma_{c,i} y_{c,i} A_{c,i} + \sum_{j=1}^m \sigma_{s,j} y_{s,j} A_{s,j} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma_{c,i}$: i 番目のコンクリートファイバー要素に働く応力、 $A_{c,i}$: i 番目のコンクリートファイバー要素の面積、 $\sigma_{s,j}$: j 番目の鉄筋要素の応力、 $A_{s,j}$: j 番目の鉄筋要素の断面積、 $y_{c,i}$: 圧縮縁から i 番目のコンクリートファイバー要素までの距離、 $y_{s,j}$: 圧縮縁から j 番目の鉄筋要素までの距離である。なお、本研究で対象としている梁部材の場合、断面に軸力は作用していないので常に $N = 0$ を満足する必要がある。

平面保持の仮定に従うと i 番目のコンクリート要素のひずみ($\varepsilon_{c,i}$)ならびに j 番目の鉄筋要素のひずみ($\varepsilon_{s,j}$)は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{c,i} = (y_0 - y_{c,i}) \cdot \phi \quad (13)$$

$$\varepsilon_{s,j} = (y_0 - y_{s,j}) \cdot \phi \quad (14)$$

ここで、 y_0 : 圧縮縁から中立軸までの距離、 ϕ : 断面の曲率である。また、断面の曲率速度を $\dot{\phi}$ とするとコンクリート要素ならびに鉄筋要素のひずみ速度($\dot{\varepsilon}_{c,i}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{s,j}$)は次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{c,i} = |(y_0 - y_{c,i})| \cdot \dot{\phi} \quad (15)$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,j} = |(y_0 - y_{s,j})| \cdot \dot{\phi} \quad (16)$$

したがって、コンクリート要素ならびに鉄筋要素の応力($\sigma_{c,i}$ 、 $\sigma_{s,j}$)は、各要素のひずみ($\varepsilon_{c,i}$ 、 $\varepsilon_{s,j}$)とひずみ速度($\dot{\varepsilon}_{c,i}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{s,j}$)を用いて、式(1)~(8)によって計算される。

2.6 RC梁の荷重-変位関係

急速曲げ荷重を受け、荷重速度 $\dot{\delta}$ で変形するRC梁の荷重-変位関係は、式(10)から計算される曲率速度 $\dot{\phi}$ における断面解析から得られる曲げモーメント-曲率関係から計算することができる。RC梁中央部の変位は、図-6に示すようにRC梁の1/2部分に対する曲率分布を積分することによって与えることができ、その曲率分布は作用荷重に応じた曲げモーメント分布から決定することができる。また計算では、塑性ヒンジ領域における塑性変形を表すために長さ L_p の一定曲率領域をRC梁中央部に設けた。塑性ヒンジ領域長 L_p は次式で表わされるMattockの式によって与える³¹⁾。

$$L_p = d + 0.05L \quad (17)$$

ここで、 d : 有効高さ、 L : 支間長である。



写真-1 RC梁の急速曲げ載荷実験

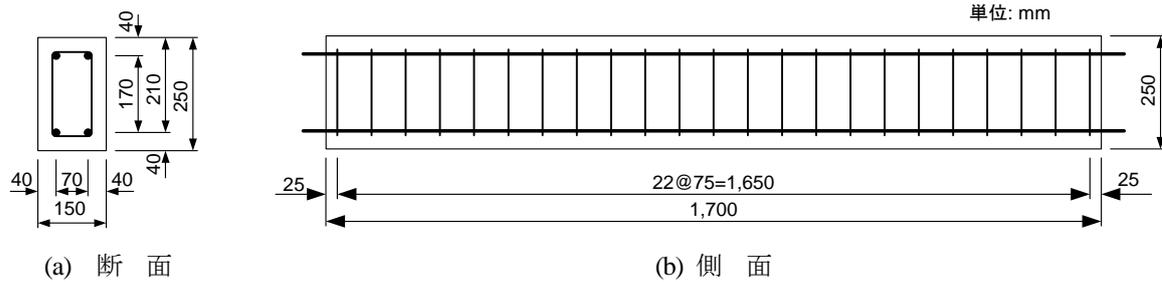


図-7 RC梁試験体の形状寸法および配筋

表-2 軸方向鉄筋の配置状況

試験体名	圧縮鉄筋		引張鉄筋	
	鉄筋径	本数	鉄筋径	本数
S1616	D16	2	D16	2
S2222	D22	2	D22	2
S1322	D13	2	D22	2

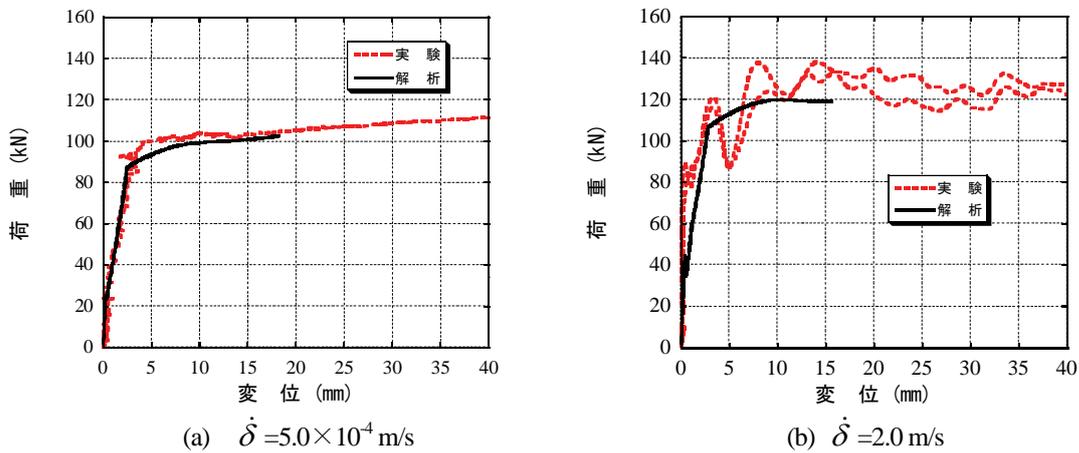


図-8 S1616試験体の荷重-梁中央の変位関係

2.7 解析方法の妥当性に関する検討

本解析方法の妥当性を検討するために、RC梁の急速曲げ載荷実験(写真-1)を行った³²⁾。実験で使用したRC試験体は、図-7に示すように幅150mm、高さ250mm、長さ1,700mmであり、表-2に示すように軸方向鉄筋量の異なる3種類の断面配筋(S1616, S2222, およびS1322)を有している。コンクリートの圧縮強度

は42.0MPa、実験で使用した異形鉄筋D13, D16, D22の降伏強度はそれぞれ397, 426, 418MPaであった。実験では支間長1,400mmで単純支持されたRC梁の中央部に荷重を加え、 5.0×10^{-4} m/sならびに2 m/sの2種類の載荷速度で載荷した。また、実験は各載荷速度で2回実施した。

図-8~10に実験ならびに解析によって得られた荷

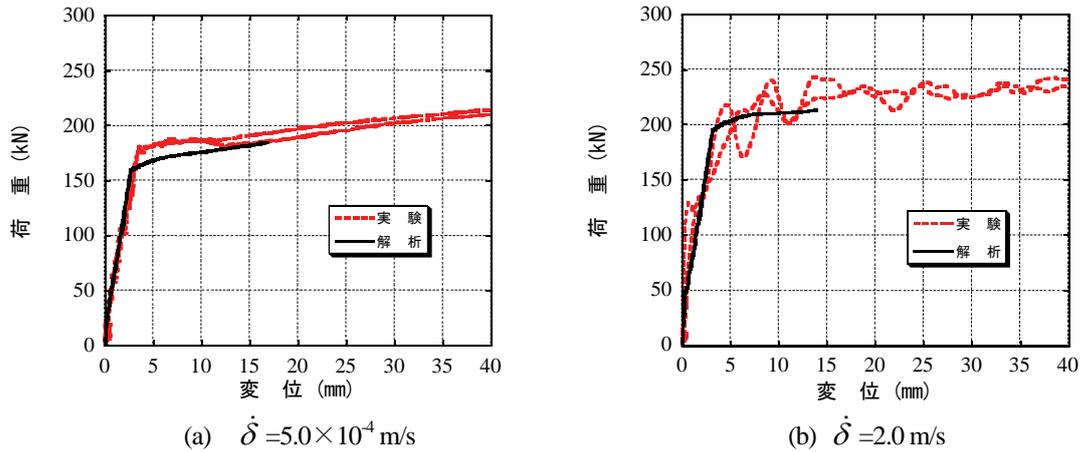


図-9 S2222 試験体の荷重-梁中央の変位関係

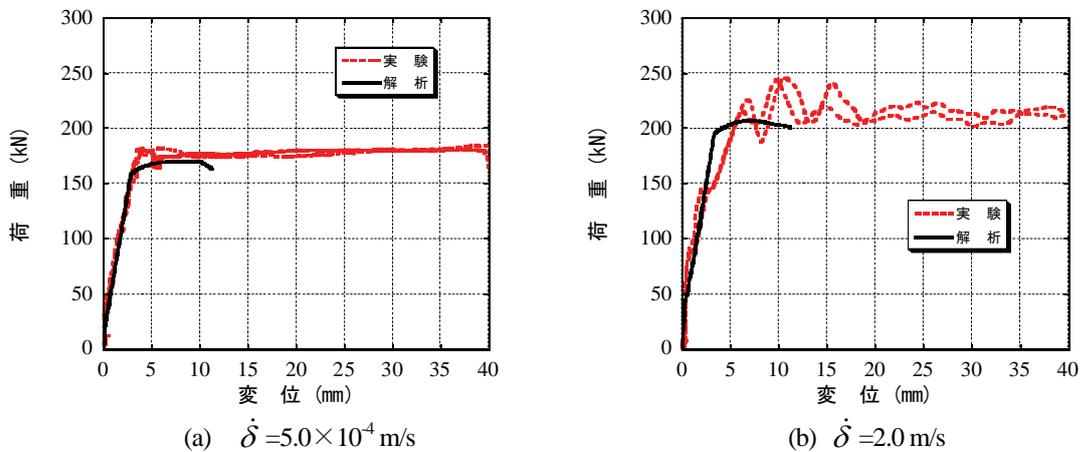


図-10 S1322 試験体の荷重-梁中央の変位関係

重-変位関係を示す。なお、解析では RC 断面を十分細かなファイバー要素に分割(100 要素)して計算を行うとともに、RC 梁が終局状態に達した時点で終了した。ここで終局状態とは、2.2 で定義したように圧縮縁のコンクリートが軟化領域における動的圧縮強度の 20% に相当する応力に達した状態をいう。載荷速度 2.0m/s の急速載荷試験では RC 梁を静止している状態から極めて短時間内に一定速度(2.0m/s)まで加速するために、実験で得られた荷重-変位関係中には、3 次以上の高次の振動モードの影響が認められる。しかしながら、すべてのケースにおいて、解析結果は実験結果の平均と概ね良い一致を示していることから、本解析方法を用いて急速曲げ載荷を受ける RC 梁の荷重-変位関係を評価できるといえる。一方、各図中の載荷速度 $5.0 \times 10^4 \text{ m/s}$ と 2 m/s の解析で得られた荷重-変位関係を比較すると、約 20% 程度降伏耐力や終局耐力が異なることがわかる。これらは構成材料のひずみ速度効果を解析で考慮した結果生じた差異であるといえる。また、実験で得られた荷重-変位関係によれば RC 梁中央部の変位が 30~40mm に達した後でも十分な耐力を有していることから、本解析で評価される終局変

位は妥当であると考えられる。

3. 衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位の解析的評価方法

3.1 解析モデル

RC 梁中央部において重錘衝撃を受けて全体曲げ変形する RC 梁の応答は、図-11 に模式的に示す等価な 1 自由度系モデルによって求めることができると考える。ばね定数 k は載荷速度の影響を考慮した RC 梁の荷重-変形関係を表しており、前章で示した非線形解析によって求めることができる。重錘が衝突速度 v_{ib} で RC 梁に衝突した場合、ここでは完全塑性衝突を仮定し、重錘と RC 梁は一体となって同じ速度 v_{ia} で変位するものとする。運動量保存の法則から速度 v_{ia} は次式で与えることができる。

$$v_{ia} = \frac{m_h}{m_h + m_b} v_{ib} \quad (18)$$

ここで、 m_h : 重錘の質量、 m_b : RC 梁の等価質量

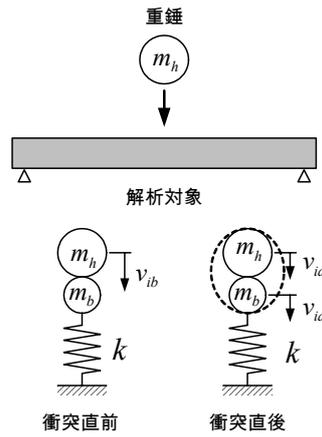
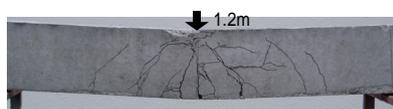


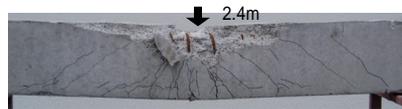
図-11 等価1自由度系モデル



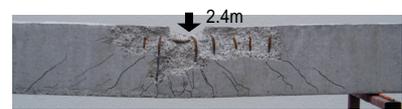
写真-2 RC梁の衝撃载荷実験



(a) S1616 試験体 (落下高さ 1.2m)



(b) S2222 試験体 (落下高さ 2.4m)



(c) S1322 試験体 (落下高さ 2.4m)

写真-3 代表的な破壊状況

($=17\rho A_c L/35$: ρ =RC 梁の密度, A_c =RC 梁の断面積).

衝突後の重錘と RC 梁の速度は, RC 梁の曲げ抵抗力によって減速され, RC 梁が最大変形 δ_{\max} に達したとき零になる. したがって, 図-11 に示す 1 自由度系モデルは, 次のエネルギー保存則を満足しなければならない.

$$\frac{1}{2}(m_h + m_b)v_{ia}^2 + (m_h + m_b)g\delta_{\max} = \int_0^{\delta_{\max}} P(\delta)d\delta \quad (19)$$

ここで, g : 重力加速度, $P(\delta)$: ばね k の荷重(P) - 変位(δ)関係である.

衝撃载荷による RC 梁の载荷速度は重錘の衝突直後に最大(v_{ia})となり, 最大変形時に零となる. したがって, RC 梁の中央部の载荷速度は連続的に変化することになる. しかしながら, 本研究では, 衝突直後の载荷速度 v_{ia} のまま RC 梁が変形するものと仮定して RC

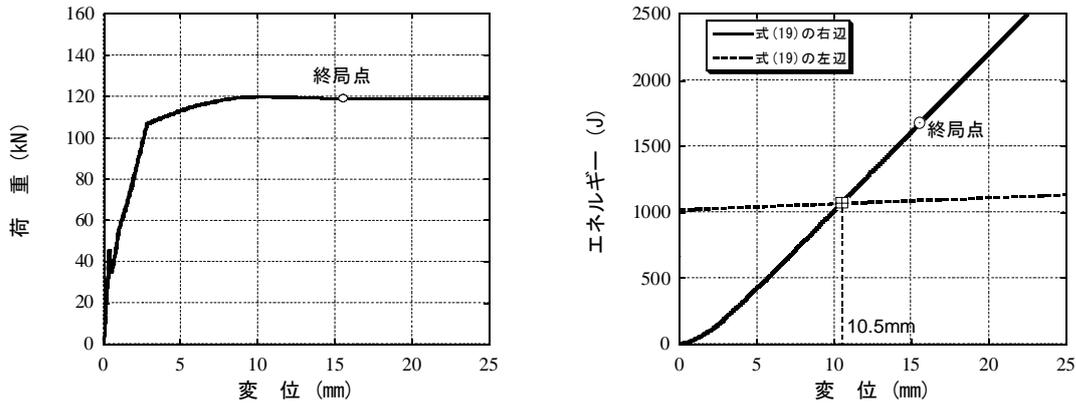
梁の荷重-変位関係を評価するものとした.

3.2 解析モデルの妥当性の検討

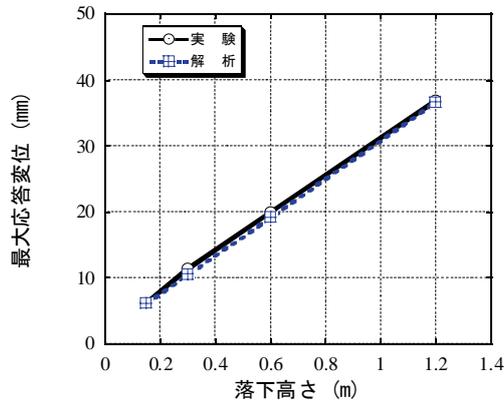
(1) 衝撃载荷実験

解析モデルの妥当性を検討するために, RC 梁の重錘落下衝撃载荷実験(写真-2)を行った³³⁾. 実験では, 2.7 の急速曲げ载荷実験で用いたものと同じ, 図-7 および表-2 に詳細を示す RC 梁試験体(S1616, S1322 および S2222 試験体)を用いた. 支間長 1,400mm で単純支持された RC 梁の中央部に質量 400kg の重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させて衝突させた. 落下高さは, S1616 試験体に対しては 0.15, 0.3, 0.6, 1.2m の 4 ケース, S1322 および S2222 試験体に対しては 0.3, 0.6, 1.2, 2.4m の 4 ケースとした.

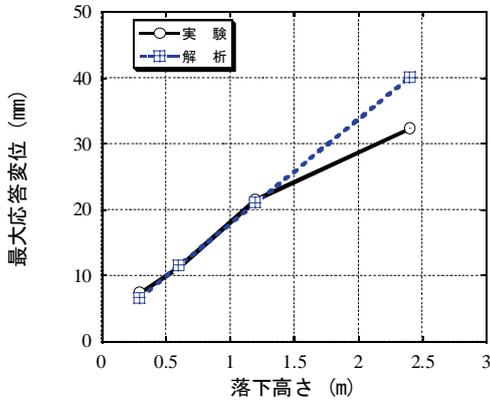
S1616 試験体は, すべての落下高さで写真-3(a)に示すように全体曲げ破壊を生じた. S1322 および S2222 試験体では, 落下高さ 0.6m 以下では全体曲げ破壊の



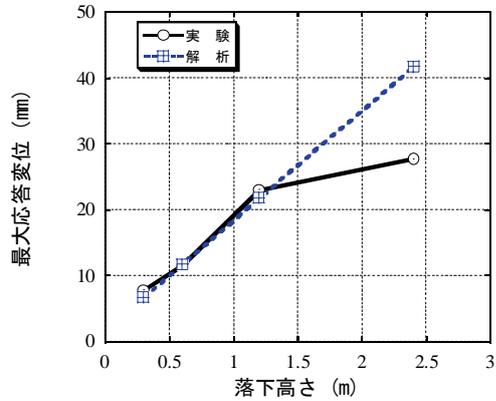
(a) $\delta = 2.11\text{m/s}$ における荷重－変位関係 (b) 最大応答変位の決定方法
 図－12 最大応答変位の計算方法の一例（落下高さ 0.3m における S1616 試験体）



(a) S1616 試験体



(b) S2222 試験体



(c) S1322 試験体

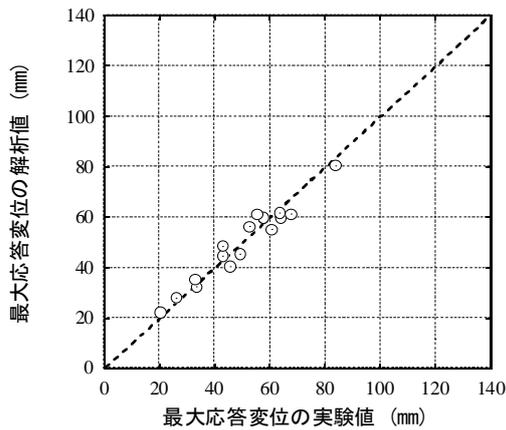
図－13 実験結果と解析結果の比較

みが生じたものの、落下高さ 1.2m 以上では写真－3(b), (c)に示すように全体曲げ破壊に加えて載荷点近傍の局所破壊が生じた。また、その局所破壊の程度は、落下高さ 1.2m よりも 2.4m の場合の方が大きくなることが観察された。S1322, S2222 試験体の引張鉄筋比は 2.46% であり、釣り合い鉄筋比(4.28%)の約 57% 程度であるが、比較的大きな衝撃エネルギー入力を行うと、載荷点近傍の局所的破壊が生じるという点には注意を払う必要がある。ちなみに、全体曲げ破壊を生じた S1616 試験体の引張鉄筋比は 1.26% であり、釣り合い

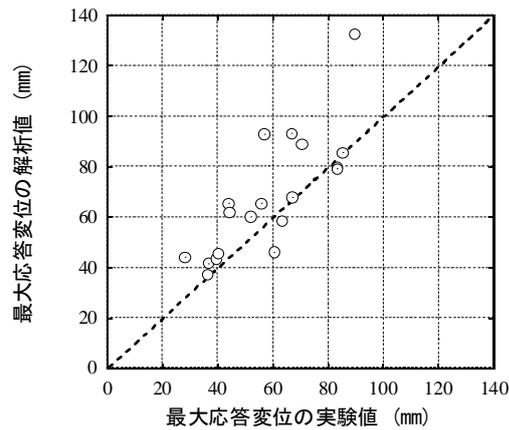
鉄筋比の約 29% であった。

(2) 衝撃実験結果との比較

ここでは、まず一例として S1616 試験体の落下高さ 0.3m の場合の最大応答変位を求める具体的な方法を示す。落下高さ 0.3m の場合の重錘の衝突速度は 2.43m/s であり、衝突直後の重錘および RC 梁試験体の速度は式(18)より 2.11m/s と計算される。RC 梁が 2.11m/s の速度で変形すると仮定して計算した荷重－変位中央の変位関係を図－12(a)に示す。また、図－12(b)に式(19)の右辺で表わされるひずみエネルギー、なら



(a) 最大応答変位の解析値 \leq 終局変位の場合



(b) 最大応答変位の解析値 $>$ 終局変位の場合

図-14 岸らの実験結果と本解析結果の比較

びに式(19)の左辺で表わされる運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの変化分をあわせて示す。なお、終局変位を超えて RC 梁によって蓄えられるひずみエネルギーを計算する際には、荷重は終局荷重を維持するものと仮定した。ここで終局変位とは、2.2 で定義したように圧縮縁のコンクリートが軟化領域における動的圧縮強度の20%に相当する応力に達した終局状態に対応する変位をいう。式(19)を満足する最大応答変位は、図-12(b)に示すように二直線の交点として与えられる。この場合の最大応答変位は 10.5mm と計算される。

実験ならびに式(19)によって計算される最大応答変位をあわせて図-13に示す。試験体が全体曲げ破壊のみ生じる場合には、計算結果と実験結果は良い一致を示している。しかしながら、S1322 および S2222 試験体の落下高さ 2.4m の場合、計算結果と実験結果には大きな違いが認められる。これらの試験体では、全体曲げ破壊に加えて載荷点近傍の局所的な破壊が生じている。この局所破壊は、重錘衝突直後の RC 梁の全体変形が生じる前の極短時間内に形成されたと考える。したがって、入力衝撃エネルギーの大部分が局所破壊を形成するために使われた結果、実験で得られた最大応答変位は計算で得られたものと比較して小さくなったと考えられる。以上の点を踏まえると、本解析モデルは全体曲げ破壊のみを生じる RC 梁の最大応答変位の計算には有効であるといえる。

(3) 岸らの実験データとの比較

岸らは、断面寸法、軸方向鉄筋量、支間長、重錘質量、衝突速度をパラメータとする 36 体の RC 梁試験体を用いた重錘落下衝撃載荷実験を行っている³⁴⁾。ここでは、これらの実験結果に対する本解析モデルの適用性について検討した。図-14に岸らの実験ならびに本解析モデルで計算された最大応答変位の関係を示す。ただし、それらの関係は、最大応答変位の解析値が終局変位を超える場合と超えない場合に分けて表示する。

ここで、終局変位に達すると圧縮縁コンクリートに圧壊が生じるものと考えられる。図-14(b)に示すように最大応答変位の解析値が終局変位を超える場合には、最大応答変位の解析値が実験値と比較してやや大きく評価される傾向にあるものの、図-14(a)に示すように最大応答変位の解析値が終局変位よりも小さい場合には、最大応答変位の解析値と実験値は良い一致を示している。したがって、最大応答変位の解析値が終局変位よりも小さい場合には、本解析モデルを用いて概ね重錘衝突を受ける RC 梁の最大応答変位を計算することができる。また、最大応答変位の解析値が終局変位を超える場合に、最大応答変位の解析値が実験値と比較してやや大きく評価されるのは、前項における検討結果を踏まえると、実験において載荷点近傍の RC 梁に局所破壊が生じたことが原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究は、衝撃荷重を受ける RC 梁の損傷レベルを評価する上で重要となる最大応答変位を求める解析モデルを定式化したものである。本研究の範囲内において得られた結果を、まとめて以下に示す。

- (1) 載荷速度の影響を考慮した RC 梁の荷重-変位関係を求めるための非線形解析方法を開発した。また、急速曲げ載荷実験結果との比較を行い、本解析方法の妥当性を示した。
- (2) 衝撃荷重を受ける RC 梁の最大応答変位を評価するための解析モデルを開発した。広範囲に渡る重錘落下衝撃載荷実験結果との比較から、本解析モデルは全体曲げ破壊のみを生じる RC 梁に対して有効であることを示した。また、全体曲げ破壊に加えて局所破壊を伴う場合には、本解析モデルによる最大応答変位は実験結果と比較して過大に評価されることを示した。

- (3) 釣り合い鉄筋比の57%程度の引張鉄筋比を有するRC梁断面の場合、比較的大きな衝撃エネルギーを加えると、載荷点近傍の局所破壊が全体曲げ破壊に先行して生じる。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学技術シリーズ No.52 性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，2007.10.
- 2) Norwegian Defence Construction Service：Precision testing in support of computer code validation and verification, Workshop Report, 1996.
- 3) Miyamoto, A., King, M. W., and Fujii, M.：Analysis of failure modes for reinforced concrete slabs under impulsive loads, ACI Structural Journal, 88 (5), pp.538-545, 1991.
- 4) Agardh, L., and Laine, L.：3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs, International Journal of Impact Engineering, 22, pp.911-922, 1999.
- 5) Dancygier, A. N.：Scaling of non-proportional non-deforming projectiles impacting reinforced concrete barriers.” International Journal of Impact Engineering, 24, pp.33-55, 2000.
- 6) Li, Q. M., and Chen, X. W.：Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile.” International Journal of Impact Engineering, 28, pp.93-116, 2003.
- 7) Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., and Chew, C. W.：Resistance of high-strength concrete to projectile impact, International Journal of Impact Engineering, 31, pp.825-841, 2005.
- 8) Dancygier, A. N., Yankelevsky, D. Z., and Jaegermann, C.：Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles.” International Journal of Impact Engineering, 34, pp.1768-1779, 2007.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤：急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83-95, 1998.5.
- 15) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤：急速一軸圧縮载荷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, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8.
- 16) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤：ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.2.
- 17) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦：ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.125-134, 2001.2.
- 18) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤：高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.135-148, 2001.2.
- 19) Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T., and Katagiri, M.：Study on impact responses of reactive powder concrete beam and its analytical model, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 4, No.1, pp.99-108, 2006.
- 20) 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，1993.
- 21) Ross, C. A., Thompson, P. Y., and Tedesco, J. W.：Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Materials Journal, 86 (5), pp.475-481, 1989.
- 22) Bischoff, P. H. and Perry, S. H.：Compressive behaviour of concrete at high strain rates, Materials and Structures, 24, pp.425-450, 1991.
- 23) Park, R. and Paulay, T.：Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1975.
- 24) Poston, R. W., Breen, J. E. and Roesset, J. M.：Analysis of Nonprismatic or Hollow Slender Concrete Bridge

- Piers, ACI Journal, V.82, No.5, 731-739, 1985.
- 25) Krauthammer, T., Shahriar, S. and Shanaa, H. M., : Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Severe Concentrated Loads, ACI Structural Journal, V.87, No.6, 473-480, 1987.
- 26) 池田尚治, 山口隆裕, 後藤康之 : 鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第1号, pp.51-59, 1990.
- 27) 鈴木基行, 市川賀寿男, 佐藤潤一, 尾坂芳夫 : RC部材の曲げ変位解析および最小引張鉄筋比評価に関する研究, コンクリート工学論文集, 第5巻, 第1号, pp.51-63, 1994.
- 28) Mao, M. and Taylor, C. A. : Non-linear Seismic Cracking Analysis of Medium-height Concrete Gravity Dams, Computers & Structures, Vol. 64, No. 5/6, pp. 1197-1204, 1997.
- 29) 土木学会 : コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
- 30) Gere, J. M. : Mechanics of Materials, 6th Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 2003.
- 31) Mattock, A. H. : Discussion of "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 93, No. ST2, 519-522, 1967.
- 32) 増田佳代, 萩島圭太, 藤掛一典 : 急速載荷を受ける鉄筋コンクリート梁の挙動とその解析的評価, 第34回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2007.3.
- 33) 萩島圭太, 増田佳代, 藤掛一典 : 鉄筋コンクリート梁の重錘落下衝撃実験とその解析的評価, 第34回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2007.3.
- 34) 岸 徳光, 三上 浩 : 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, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1251-1260, 2007.

(2008年9月18日受付)