

高速载荷を受ける鉄筋コンクリートはりの 終局限界変形量の推定法

高橋芳彦*・大野友則**・太田俊昭***
・日野伸一****

本研究は、ひずみ速度の影響が無視できない動的载荷に対する RC はりの終局限界変形量を算定するため、まず载荷速度などを变化させた曲げ試験を行った。次に、RC 部材の曲げ解析に用いられている慣用の切断法を準用した解析法にひずみ速度の影響を導入することにより、動的载荷に対する RC はりの弾塑性挙動や終局限界変形量を簡便に算定する方法を提示した。

Keywords : RC beam, high-speed loading, limit states design, strain-rate effect, ultimate limit deformation, discrete elements method

1. 緒 言

コンクリート構造の設計に関する基本的な考え方が、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつある¹⁾。限界状態設計法では、使用限界、終局限界および疲労限界の3つの限界状態に対して安全性を照査することが規定されている。また地震荷重に対する安全性は、降伏変形以降の靱性の大きさも含めて検討すべきであることが明示されている。ところが、航空機、車両、船舶あるいは落石などの衝突によって構造物に作用する衝撃的な高速荷重に対しては、安全性の照査基準に関する具体的な規定はない。これは、衝撃的外乱の発生確率の問題や対象となる構造物の特殊性、あるいは衝撃現象が複雑で応答そのものが未解明であること、などの理由によるものと考えられる。衝撃的外乱の発生頻度を考慮すると、衝撃外力に対する安全性の照査も地震荷重と同様に部材の靱性を考慮した終局限界変形などを評価指標として行われる必要があると考える。しかしながら、静的外力に対する鉄筋コンクリート（以下、RC と呼ぶ）はりの終局限界変形などの評価法そのものについても研究段階にある^{2)~5)}。

本研究は、载荷速度が数 m 程度の動的载荷（ここでは、高速载荷と定義する）を受ける RC はりの終局限界変形などを評価する方法について基礎的に検討したものである。すなわち、まず静的および動的外力（载荷速度が数 m 以下）のそれぞれの場合に対する終局限界状態の意義について考察し、動的外力に対する終局限界状態の定義を明確にした。次に、終局限界変形量を算定するために、载荷速度などを变化させた RC はりの動的曲げ

試験を行って部材に生じた塑性域長さなどについて検討した。また、RC 断面の曲げ解析に用いられている慣用の切断法を準用した解析法にひずみ速度の影響を導入することにより、動的外力に対する RC はりの弾塑性挙動や終局限界変形量を簡便に算定する方法を提示した。最後に、計算値を試験結果と比較することにより、提示した算定法の適用性について調べている。なお、衝撃的外力の作用によって構造部材や材料に生じるひずみ速度の大きさは衝突体および構造物の特性によって異なるため、本算定法を用いる場合にはあらかじめ実験または応答解析などによりひずみ速度の大きさを推定する必要がある。

2. 動的終局限界状態

限界状態設計法では、静的载荷を受ける場合の RC 曲げ部材の終局限界状態は、一般に断面の破壊を基準として定められている。すなわち、部材の変形量とは無関係に部材断面が曲げ破壊する際の断面での応力のつり合いから求められる曲げ耐力の大きさを用いて検討される。したがって、終局限界変形に関しては、その定義や計算基準についての明示は行われていない。

大地震や物体の衝突によって生じる衝撃的外乱などは、発生確率がきわめて小さく作用時間も短い。また、その大きさが時刻とともに複雑に変動する。このような動的外力を受ける場合の安全性の検討は、静的外力に対するものとは基本的に異なるべきであると考えられる。

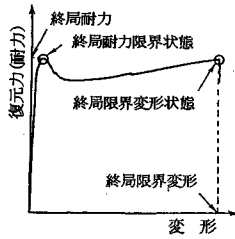
靱性が期待できる曲げ部材の復元力～変形関係は、一般に図-1 に示すようになる。図に示すように、断面の最大耐力力（終局耐力）の発揮時点を限界状態とみなす「終局耐力限界状態」と、それ以降の変形の増大によって最終的に耐力力を失う終局状態が存在する。本研究では、図-1 に示す関係において変形の増大に対して耐力力が急激に低下する時点を、耐力力を基準とする限界状態

* 正会員 工博 防衛大学校研究員 土木工学科
(〒239 横須賀市走水 1-10-20)

** 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学科

*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科



図一 復元力と変形の関係

に対応して「終局変形限界状態」と定義する。この状態における耐力の大きさは、部材の諸元や材料定数によって異なるが、終局耐力より大きくなる場合もある。本研究では、耐力と変形に関する2つの限界状態の定義から、耐力を基準とする終局耐力限界状態における耐力を便宜的に終局耐力と呼び、変形を基準とする終局変形限界状態における変形を終局限界変形と呼ぶ。

近年耐震工学の分野では、材料や部材の力学特性に対して載荷速度の影響が無視できる程度の動的外力を対象とした終局変形限界状態に関する研究^{2)~5)}が行われている。一方、構造材料やRC部材が衝撃的で高速度の荷重の作用を受けると、その力学特性は慣性力やひずみ速度の影響を受けて静的外力に対する場合と異なることが知られている。このため、動的載荷に対する材料や部材の力学特性を解明するためには慣性力やひずみ速度による影響を分離して評価する必要があるが、実験的研究においては試験装置や計測機器などの制約からまだ研究段階⁶⁾にある。このような現状から、載荷速度の影響を考慮した終局変形限界状態に至るまでの弾塑性挙動や終局限界変形などに関する研究は今のところ見当たらない。そこで本研究では、載荷速度が比較的大きい動的外力に対するRCはりの終局限界変形量などを定量的に評価することを目的として実験的および解析的な検討を行うものである。

ところで、RCはりの終局耐力や終局限界変形などを解析的に算定するためには、表一に示す材料の応力～ひずみ関係の仮定や用いる定数が適切なものでなければならない。終局耐力を特定するための破壊基準は、コンクリートの圧縮縁の終局ひずみ ($\epsilon_{cu} \approx 0.0035$) が一般に用いられている。この基準では、鉄筋に生じている引張ひずみは降伏ひずみを越えた降伏棚付近の大きさのひずみに対応している。したがって、終局耐力を算定する場合には、表一に示した材料等の力学特性の中で、コンクリートの最大応力以降の応力下降勾配の大きさや鉄筋のひずみ硬化、引張強度ならびに破断ひずみなどについては考慮する必要がない。また、RC断面の終局耐力限界状態における中立軸位置は一般に圧縮鉄筋の位置近傍に存在するため、圧縮鉄筋比（または複鉄筋比）の大

表一 終局限界特性に影響を及ぼすパラメーター

材料の力学特性	コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ○ 圧縮強度 ○ 応力～ひずみ関係形状 (・最大応力までの形状 ・最大応力以降の形状)
	鋼材	<ul style="list-style-type: none"> ○ 弾性係数 ○ 降伏点 ○ 引張強度 ○ 破断ひずみ
幾何学的条件	断面	<ul style="list-style-type: none"> ○ 幅 ○ 有効高さ ○ 引張鉄筋(鋼材)比 ○ 複鉄筋(鋼材)比(圧縮鉄筋比) ○ 圧縮側かぶりコンクリート厚さ
	部材	<ul style="list-style-type: none"> ○ 曲率分布

きさも終局耐力に対してあまり影響しない。さらに、終局耐力限界状態に至るまでのはり軸方向の曲げモーメント分布と曲率分布の関係は1対1に対応するので、載荷点に生ずる曲げモーメントの大きさが求めれば終局耐力限界状態時の載荷点のたわみが計算できる。

これに対し、終局限界変形を評価するためには、コンクリートの最大応力以降の応力下降勾配係数や鉄筋のひずみ硬化係数、引張強度ならびに破断ひずみの大きさについても考慮する必要がある。さらに、はり軸方向の曲率分布の状態についても検討しなければならない。本研究では、表一に示したパラメーターの中で、コンクリートの圧縮強度、応力～ひずみ曲線の最大応力までの形状および鉄筋の力学特性に関するひずみ速度効果の推定に用いる諸式は、著者らが行った高強度コンクリート⁷⁾および鋼材⁸⁾の高速載荷試験の結果に基づいて定式化した関係式を用いている。なお、はり軸方向の曲率分布およびコンクリートの最大応力以降の応力下降勾配係数については、RCはりの曲げ試験結果に基づいた値を用いて検討した。

3. RCはりの高速曲げ試験

(1) 試験概要

a) 試験体

静的外力を対象として行われたRCはりの終局限界変形に関する研究⁹⁾によると、終局限界変形の大きさは配置するスターラップ(横拘束筋)の諸元(拘束筋間隔、鉄筋の鋼種、径など)の影響を受けることが明らかにされている。そこで本研究では、図一2および表一2に示すように、形状・寸法およびコンクリート強度が異なる2種類の試験体(Type-AおよびType-B試験体)を用い、さらに拘束筋の影響を調べるために拘束筋諸元を3種類に変化させた合計6種類の試験体を作製した。

拘束筋によるRCはりの拘束効果の指標として、1組のスターラップ体積とそれに囲まれたコンクリート体積の比(拘束筋体積比と定義されている)が提案¹⁰⁾されている。またCorley¹¹⁾は、スターラップに加えて圧縮

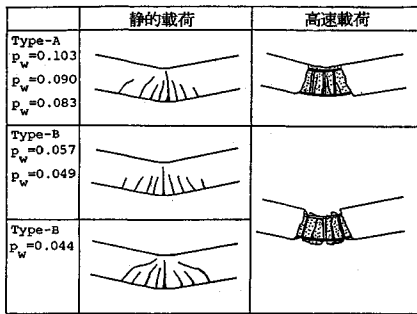


図-3 破壊状況

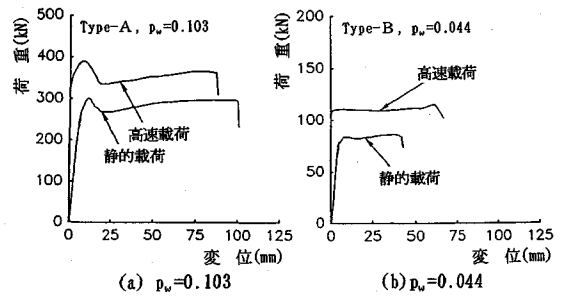


図-4 荷重～載荷点変位関係

表-4 試験結果の概要

Type	拘束筋体積比	載荷速度	終局耐力 (kN)	終局限界変形 (mm)
Type-A	0.103	高速	368	79.6
		低速	319	97.2
		静的	306	91.0
	0.090	高速	402	65.4
		低速	309	111.6
		静的	299	88.0
0.083	高速	392	67.8	
	低速	328	55.2	
	静的	304	75.2	
Type-B	0.057	高速	113	61.2
		低速	86	86.4
		静的	83	57.1
	0.049	高速	113	60.8
		低速	85	73.8
		静的	82	46.3
0.044	高速	110	57.0	
	低速	88	45.6	
		静的	84	40.1

る。なお、載荷体の寸法や形状によってははりの破壊形状が異なることが予想されるが、本研究においては1線集中載荷であり載荷体が破壊範囲の大きさに及ぼす影響は無視できると考える。

一方、高速載荷に対する破壊状況を調べると、拘束筋体積比が小さい Type-B 試験体 ($p_w=0.044\sim0.057$) は、載荷点近傍のスターラップと主鉄筋で囲まれた部分のコンクリートがブロック状になって落下し、押抜きせん断的な破壊状況を示している。また、載荷点近傍の15～25 cm の範囲の圧縮部コンクリートが圧壊するとともに、この範囲にある全周のかぶりコンクリートが剥落している。拘束筋体積比が大きい Type-A 試験体 ($p_w=0.083\sim0.103$) もかぶりコンクリートが剥落しているが、その範囲は Type-B に比較してやや小さく載荷点を中心として12～20 cm 程度である。この範囲を塑性域とみなせば、静的載荷に対する塑性域長さとはほぼ同程度であるとみなすことができる。すなわち、本試験で対象とした載荷速度に対しては、塑性域の広がりも静的載荷の場合と同様に載荷点からそれぞれ支点方向に約 $d/2$ の範囲であるといえる。

b) 弾塑性挙動および終局限界特性

図-4に、Type-A および Type-B 試験体それぞれの荷重～載荷点変位関係の一例を示す。図から明らかなように、試験体のタイプの違いや載荷速度の大小にかかわらず降伏以降も大きな変形能力を有している。なお、Type-A 試験体は高強度コンクリートを使用しているため、載荷点変位が10 mm 程度の時点で終局耐力が顕著に生じている¹²⁾。この荷重の極値は、終局耐力限界状態に対応するものである。また、載荷速度が大きい高速載荷の方が静的載荷に比べて約30% 大きな荷重値を示している。

一方、荷重が急激に低下する終局変形限界状態での変形(終局限界変形)は、拘束筋体積比が小さい($p_w=0.044$, Type-B) 試験体の場合は高速載荷の方が静的載荷に対する終局限界変形より大きくなるが、拘束筋体積比が大きい($p_w=0.103$, Type-A) 試験体の場合は静的載荷

の方が大きな値を示している。拘束筋体積比および載荷速度が終局限界変形の大きさに及ぼす影響については、後に考察する。試験で得られた各特性値(平均値)を表-4に示す。

4. RC はりの曲げ解析

(1) 断面分割法による解析

a) 解析法の概要

本研究では、動的な曲げを受けるRC はりの力学特性を基本的に検討することを目的としている。このため、解析法は簡便でしかも力学上の問題が明確な形で表現できることが望ましい。この観点から、RC はり断面の静的曲げ解析手法の中で Park ら¹³⁾ によって提案された切断法の考え方を準用する。すなわち、Park らは全断面を水平で等間隔なエレメントに切断する方法を用いているが、本研究では正負の交替載荷やコンクリートの引張力を考慮していないので、中立軸から圧縮縁までの圧縮部コンクリート断面だけをいくつかの水平エレメントに分割する方法を用いた。エレメントの数を減少することにより、効率的な計算が可能である。本解析法(便宜的に断面分割法と呼ぶ)は、曲率を逐次増分させながら断面内での力のつり合いを求めていく方法であり、①任意

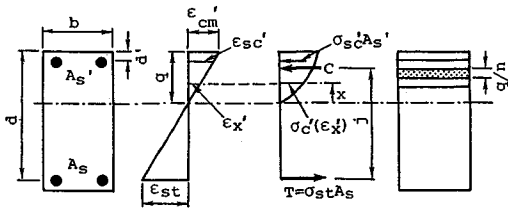


図-5 断面内の応力およびひずみ分布

形状の非線形なコンクリートの応力～ひずみ関係を用いることができる、および②コンクリートの最大応力以降の応力低下域の挙動も追跡できるので大変形に至る弾塑性挙動を比較的簡便に解析できる、という特徴を有している。以下に、断面分割法の概要を述べる。

図-5は、RCはり断面内の応力とひずみの分布を表したものである。解析手順は、まず曲率 ϕ_j に対応する中立軸を仮定する。次に、コンクリートの引張応力を無視して、中立軸から圧縮縁までのコンクリートを n 個の水平エレメントに切断する。圧縮縁から i 番目のコンクリートの幅は、その高さにおける断面の幅 b_i とする。仮定した中立軸から圧縮縁までの距離を q_i とすれば、1 個のエレメントの高さは q_i/n である。ここで、断面の曲率を ϕ_j とすると、仮定した中立軸に対する圧縮縁のひずみ ϵ_{cm}' は次式で与えられる。

$$\epsilon_{cm}' = \phi_j \cdot q_i \dots\dots\dots (2)$$

また、圧縮縁から i 番目のエレメントの平均ひずみ ϵ_{ci}' は次のようになる。

$$\epsilon_{ci}' = \epsilon_{cm}' \{1 - (i-0.5)/n\} \dots\dots\dots (3)$$

i 番目のコンクリートエレメントに生じている圧縮応力 σ_{ci}' は、任意の非線形なコンクリートの応力～ひずみ関係モデルから次式で与えられる。

$$\sigma_{ci}' = f(\epsilon_{ci}') \dots\dots\dots (4)$$

したがって、 i 番目のコンクリートエレメントの圧縮力 C_{ci} は、エレメントの中心に作用すると仮定すれば次式から求められる。

$$C_{ci} = b_i \cdot (q_i/n) \cdot \sigma_{ci}' \dots\dots\dots (5)$$

断面全体でのコンクリートの圧縮合力は、各コンクリートエレメントの圧縮力 C_{ci} の総和として与えられる。一方、圧縮鉄筋および引張鉄筋の合力も、仮定した中立軸に対して同様に求められる。以上の式から求められたコンクリートおよび圧縮鉄筋による圧縮合力 C と引張鉄筋による引張合力 T との力のつり合いを次式で調べる。

$$C - T = 0 \dots\dots\dots (6)$$

式(6)の条件が成立しなければ、仮定した中立軸の位置が正しくないことを意味する。そこで、中立軸の位置を修正して、式(6)が成り立つまで計算を繰り返す。つり合い条件が満足すれば、設定した曲率 ϕ_j に対応す

る曲げモーメント M_j が求められる。曲率の増分ごと ($\phi_{j+1} = \phi_j + \Delta\phi$) に中立軸の位置を逐次変化させ、以上の手順を繰り返すことにより終局状態までの $M \sim \phi$ 関係が得られる。

b) 終局変形限界状態の判定指標

RC 曲げ部材の終局変形限界状態を判定する指標に関して、これまで種々の研究が行われている。森田ら²⁾は、コンクリートの応力～ひずみ関係の状態を表現するストレスブロック係数 k_1, k_2, k_3 を用いて、 $k_2/(k_1 \cdot k_3)$ の値が最小となる時点、六車ら³⁾は、 $k_1 \cdot k_3$ の値が最大となる時点を終局変形限界状態とすることを提案している。しかしながら、両者とも引張鉄筋量や圧縮鉄筋量の大きさによって、断面の曲げモーメント～曲率関係における降伏モーメントや最大曲げモーメントなどの位置関係が変化するため、この指標を終局変形限界状態の判定に用いるには不十分であることが指摘されている⁴⁾。一方、鈴木ら⁴⁾ および小柳ら⁵⁾は、圧縮合力と引張合力の力のつり合いから、曲率(または圧縮縁ひずみ)が増大するにもかかわらず引張鉄筋のひずみが減少に転ずるときの曲率、または引張鉄筋が破断する時点における曲率のうち小さい方に至った時点を終局変形限界状態と判定することを提案している。なお、曲率が増大するにもかかわらず引張鉄筋のひずみが減少に転ずるときの曲率を、鈴木らは「終局限界点 [C=T] max 点」、また小柳らは「降伏終了点」と定義している(以下、本研究では降伏終了点と呼ぶ)。

著者らが行ったRCはりの曲げ試験において、載荷終了時に引張鉄筋が破断する結果がいくつか認められた。また同時に行った別途の解析¹²⁾から、鈴木らおよび小柳らが提案した指標を用いると、その破壊性状を比較的良好にシミュレートできることが認められた。そこで、本研究でも、終局変形限界状態の判定は鈴木らおよび小柳らが提案した指標を用いて行う。

c) 塑性域長さの仮定

載荷点位置の断面における荷重～変位関係を曲げモーメント～曲率関係から求めるためには、はり軸方向の曲率分布を設定する必要がある。載荷点に生じている曲げモーメントが終局耐力限界状態における曲げモーメントに達するまで、すなわち最大曲げモーメントに達するまでは、曲げモーメント分布と曲率分布の関係が1対1に対応する。したがって、曲率分布を軸方向に積分すれば荷重の大きさに対応するはりの変形を算定することができる。しかしながら、終局耐力限界状態以降は、軸方向のモーメント分布と曲率分布の関係は1対1に対応せず、また塑性域での曲率分布の状態を定めることが困難なため、塑性域部分の軸方向の曲率分布を仮定する必要がある。本研究では、終局耐力限界状態に達した以降は、Corley¹¹⁾の研究結果および前述したRCはりの曲げ試

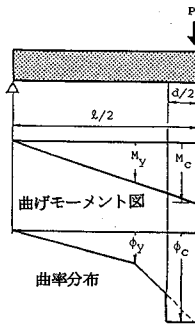


図-6 最大曲げモーメント以降の曲げモーメントおよび曲率分布

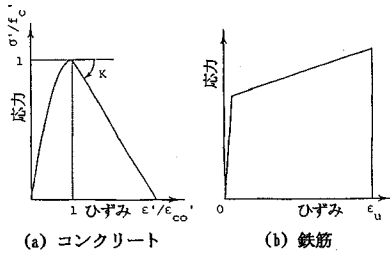


図-7 応力～ひずみ関係モデル

験結果に基づいて、図-6に示すように载荷点から両支点方向に有効高さ d の $1/2$ の長さに相当する範囲の曲率分布は一樣であると仮定した。

d) コンクリートおよび鉄筋の応力～ひずみ関係

解析には、図-7 (a) および式 (7) に示すコンクリートの応力～ひずみ関係を用いた。すなわち、著者らが行ったコンクリート試験体に対する高速载荷試験結果⁷⁾と既往の研究結果を参照することにより、最大応力 f_c' までは高強度および普通強度の材料特性を良好に表現できると考えられる Popovics¹⁴⁾ 式を用いた。最大応力以降の応力の低下割合は、コンクリートの拘束状態や部材の境界条件などにより複雑に変化するため、その大きさを特定することは実験的な方法を用いても容易ではない。本研究では、最大応力以降の関係を便宜上最も単純な1次関数で与え、その下り勾配の大きさを応力低下の割合(下降勾配係数と呼ぶ)を表すものとする。また下降勾配係数 K は、圧縮強度 f_c' および最大応力時のひずみ $\epsilon_{c'o}$ で無次元化した応力～ひずみ関係における下降勾配の値で与える。したがって、 K が大きい場合は応力の下降勾配が急であることを表し、コンクリートは脆性的な挙動を示すことになる。なお、かぶり部分のコンクリートの最大応力以降の応力下降勾配係数 K は、プレーン・コンクリートに対して得られる平均的な値として $K=0.5$ を用いた。

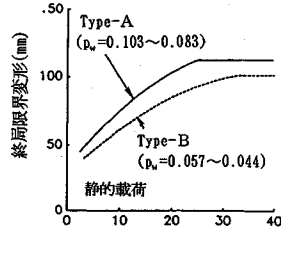


図-8 終局限界変形～応力下降勾配係数関係

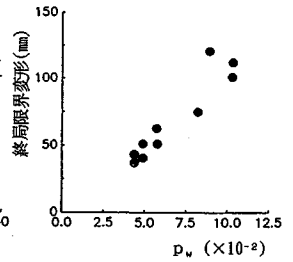


図-9 終局限界変形～拘束筋体積比関係

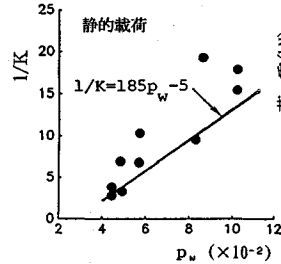


図-10 応力下降勾配係数～拘束筋体積比関係

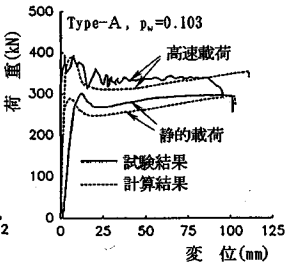


図-11 荷重～載荷点変位関係に及ぼす載荷速度の影響(応力下降勾配係数：一定)

$$\left. \begin{aligned} \sigma' &= f_c' \frac{\epsilon'}{\epsilon_{c'o}} \frac{n}{(n-1) + (\epsilon'/\epsilon_{c'o})^n} : \epsilon' \leq \epsilon_{c'o}' \\ \sigma' &= f_c' \cdot \{1 + K(1 - \epsilon'/\epsilon_{c'o})\} : \epsilon' > \epsilon_{c'o}' \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

ただし、 $n = (0.57 \times 10^{-2} \times f_c') + 1$

$$\epsilon_{c'o}' = 4.29 \times 10^{-4} \times \sqrt{f_c'}$$

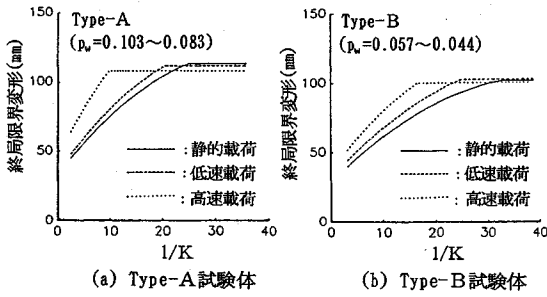
また、鉄筋の応力～ひずみ関係は、図-7 (b) に示す単純なひずみ硬化型とした。なお、鉄筋は引張強度に達した時点で破断すると仮定している。

(2) コンクリートの応力下降勾配係数

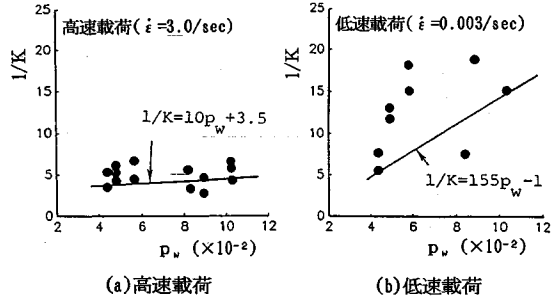
a) 応力下降勾配係数に及ぼす拘束筋の影響

式 (7) 中のコンクリートの応力下降勾配係数 K をパラメーターとした解析を行い、 K と終局限界変形との関係を求めた。図-8に、その結果を示す。横軸は、応力下降勾配係数の逆数 $1/K$ である。図中の実線は、Type-A 試験体を対象とした解析の結果であり、破線は Type-B 試験体に対する結果である。

一方、RC はりの静的曲げ試験で得られた終局限界変形と拘束筋体積比 ρ_w の関係を、図-9に示す。図-9に示した終局限界変形～拘束筋体積比関係と図-8に示した終局限界変形～応力下降勾配係数関係の両者から、コンクリートの応力下降勾配係数 K と拘束筋体積比 ρ_w の関係を求めると、図-10のようになる。図中の●印は、試験結果を表す。図-10から、データのばらつきはあるが、拘束筋体積比が増加するにつれて $1/K$ の値が増



図一12 終局限界変形～応力下降勾配係数関係



図一13 応力下降勾配係数～拘束筋体積比関係

加する傾向が認められる。そこで、拘束筋体積比と $1/K$ の関係を 1 次式で仮定し、さらにデータのばらつきを考慮して本試験で得られた $1/K$ の下限値となるように両者の近似関係を求めると式 (8) (図一10 中の実線) を得る。

$$1/K = 185 \rho_w - 5 \dots\dots\dots (8)$$

b) 応力下降勾配係数に及ぼす載荷速度の影響

RC はりが高速度の載荷を受ける場合、載荷速度すなわちひずみ速度がコンクリートの応力下降勾配係数の大きさに及ぼす影響について検討する。まず、コンクリートの応力下降勾配係数の大きさがひずみ速度の影響を受けないと仮定して式 (8) を用い、そのほかの材料特性については著者らが行ったコンクリートおよび鉄筋の高速載荷試験^{7),8)} に基づいて定式化したひずみ速度の影響を考慮した特性式 (式 (9)～(13)) を用いて解析を行う。

$$f_u/f_y = 1.24 + 0.06 \cdot (\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (9)$$

$$f_u/sf_u = 1.14 + 0.03 \cdot (\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (10)$$

$$a\epsilon_u/s\epsilon_u = 1.06 + 0.02 \cdot (\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (11)$$

$$f_c'/sfc' = 1.49 + 0.27 \cdot (\log \dot{\epsilon}) + 0.04 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2 \dots\dots (12)$$

$$a\epsilon_{co}'/s\epsilon_{co}' = 1.24 + 0.05 \cdot (\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 f_y , f_u , ϵ_u , f_c' および ϵ_{co}' は、それぞれ鉄筋の降伏点、鉄筋の引張強度、鉄筋の破断ひずみ、コンクリートの圧縮強度およびコンクリートの最大応力時のひずみを表す。 $\dot{\epsilon}$ は、ひずみ速度 (1/s) を表す。添字 d および s は、それぞれ動的載荷および静的載荷を表す。

図一11 に、荷重～載荷点変位関係について試験結果と解析結果の比較の一例を示す。なお、解析に用いたひずみ速度は載荷点直下の引張鉄筋のひずみが降伏ひずみに至るまでの実測平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^0/s$ である。図一11 をみると、静的載荷に対する解析結果は試験結果よりも弾性時剛性が大きく、終局耐力限界状態に対応する変形が小さくなっている。この相違は、解析に用いた材料の応力～ひずみ関係のモデル化やはりの曲率分布の仮定による誤差が一因と考えられる。なお、終局耐力の大きさや破壊に至るまでの弾塑性挙動は高速載荷に対しても試験で得られた結果をおおむね良好にシミュレ

ートしていることが認められる。しかしながら、高速載荷の場合の終局限界変形は解析結果の方が試験結果よりも大きくなり、危険側の値を与えている。すなわち、高速載荷の場合の解析結果と試験結果の相違は、解析において応力下降勾配係数 K にひずみ速度の影響を考慮していないことによるものと考えられる。

そこで、高速載荷に対する応力下降勾配係数と拘束筋体積比の関係を前項 a) と同じ手順で求めてみる。図一12 は、応力下降勾配係数をパラメーターとした解析から求められた終局限界変形と応力下降勾配係数の関係を、高速、低速および静的載荷に対して示している。高速および低速載荷におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は実測値を用いており、それぞれ $\dot{\epsilon} = 3.0/s$ および $\dot{\epsilon} = 0.003/s$ である。図をみると、ひずみ速度の影響は拘束筋体積比の大きさによって異なるが、ある変形量に着目するとひずみ速度が増大するにつれて下降勾配は大きくなるのがわかる。また同一の K に対しては、終局限界変形はひずみ速度が大きい場合の方が大きいことがわかる。ここで、前述と同様の方法で高速および低速載荷を受ける場合について、応力下降勾配係数と拘束筋体積比の関係を、拘束筋体積比に対する終局限界変形の試験結果と図一12 の関係を対応させて求めると、図一13 に示す結果が得られる。低速載荷に対する試験結果にかなりばらつきがあるが、いずれのひずみ速度に対しても拘束筋体積比の増大に伴って応力下降勾配係数の逆数 $1/K$ が増加する傾向が認められる。この結果に対し、前述した静的載荷の場合と同様の考え方に基づいて $1/K$ と拘束筋体積比の関係を線形と仮定すれば、高速および低速載荷に対し次式の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 1/K &= 10 \rho_w + 3.5 : \text{高速載荷} (\dot{\epsilon} = 3.0/s) \\ 1/K &= 155 \rho_w - 1.0 : \text{低速載荷} (\dot{\epsilon} = 0.003/s) \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

式 (8) および (14) 中の右辺第 1 項の係数はひずみ速度が増大すると減少し、第 2 項の係数は逆にひずみ速度が増大すると増加する傾向がある。そこで、各係数とひずみ速度の対数値の間の関係に対して 1 次式を仮定して、いずれのひずみ速度および拘束筋体積比に対しても

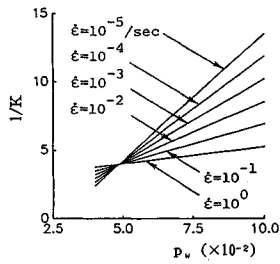


図-14 応力下降勾配係数～拘束筋体積比関係に及ぼすひずみ速度の影響

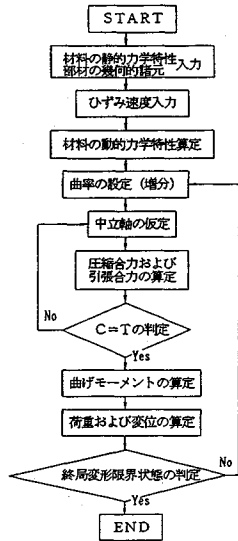


図-15 動的終局限界変形の解析手順

1/Kが下限値となるような関係を求めれば次式が得られる。

$$1/K = \{25 - 32(\log \dot{\epsilon})\} p_w + \{2.76 + 1.55(\log \dot{\epsilon})\} \quad (15)$$

図-14に、式(15)を用いて算定した応力下降勾配係数の逆数と拘束筋体積比の関係をひずみ速度をパラメーターとして示す。図から、静的载荷(ε-dot=10⁻⁵/s)に対しては、拘束筋体積比の増大に伴って応力下降勾配係数が小さく(逆数1/Kが増加する)なるが、ひずみ速度が増大するにつれて応力下降勾配係数の大きさの変動は小さくなるのがわかる。ひずみ速度がε-dot=10⁰/s程度(本研究で行った高速载荷(約3m/s)に対応する)の場合は、拘束筋体積比の大小の影響は顕著でなく1/Kはほぼ一定値を示す。これは、ひずみ速度が増大すると拘束筋によるコンクリートの拘束効果が小さくなることを示している。

(3) 動的終局限界変形の算定手順

動的終局限界変形を算定するための解析手順を、図-

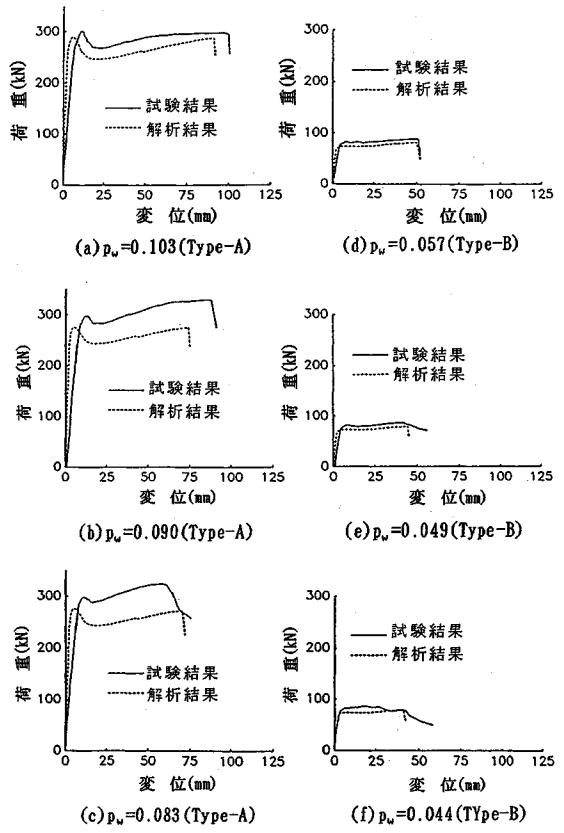


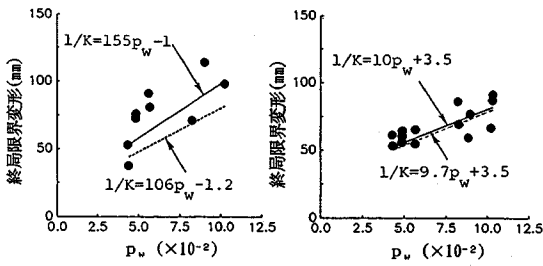
図-16 静的载荷に対する荷重～載荷点変位関係

15に示す。まず、静的载荷に対するコンクリートおよび鉄筋の材料の力学特性、部材や断面の諸元(支間長、断面寸法、主鉄筋比、有効高さ、かぶり厚さ)およびスターラップ(横拘束筋)に関する諸元(間隔、鉄筋径、降伏点など)を入力する。次に、ひずみ速度の大きさを設定して式(9)~(13)、(15)に代入し、コンクリートの動的圧縮強度や応力下降勾配係数などを算定する。これらの諸元を、断面分割法に導入する。解析は、静的解析の手順と全く同様であり、載荷点の曲率φを逐次増分させて繰り返し計算を行い、載荷荷重および載荷点変位量を算定する。この際、終局耐力限界状態以降は、図-6の仮定した曲率分布を用いて載荷点変位を算定する。終局変形限界状態の判定は、先に述べた降伏終了点または鉄筋の破断のいずれか小さい曲率とし、計算を終了させる。

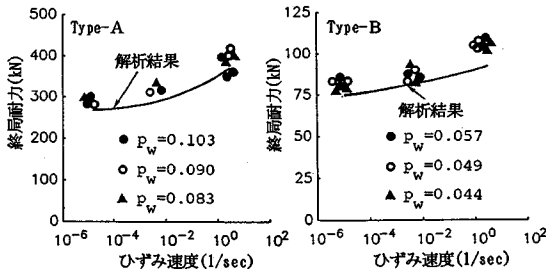
5. 解析結果および考察

(1) 静的载荷に対する結果

図-16に、式(8)で算定した応力下降勾配係数Kを用いた解析結果と試験結果の比較を示す。図から、弾性時剛性は解析結果の方が大きめの値を示すが、解析で



(a) 低速載荷 (b) 高速載荷
 図—17 終局限界変形～拘束筋体積比関係



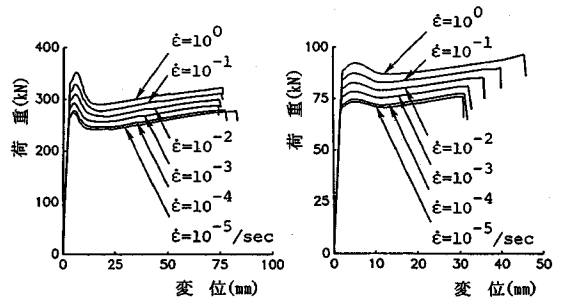
(a) Type-A 試験体 (b) Type-B 試験体
 図—18 終局耐力～ひずみ速度関係

求めた終局変形限界状態に至るまでの弾塑性挙動と試験結果は比較的良好に一致することが認められる。特に、終局耐力の値は試験結果とほぼ等しい結果を与える。さらに、終局限界変形は解析結果が試験結果に対して多少小さく、安全側の評価を与えることが認められる。つまり、断面分割法による解析手法にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を入力し、さらに式(8)で求められるコンクリートの応力下降勾配係数 K を導入することにより、静的荷重を受ける RC はりの弾塑性挙動および終局限界変形の概略値を推定することが可能である。

(2) 動的荷重に対する結果

図—17に、動的荷重に対する終局限界変形と拘束筋体積比の関係について、試験結果と解析結果の比較を示す。図中の実線は、低速および高速載荷について式(14)を用いて算定した結果である。破線は、式(15)を用いて算定した結果である。図から、低速載荷の場合に式(15)による結果が小さめの値を与えるが、高速載荷の場合はいずれの式を用いても大差なくおおむね良好に試験結果と一致することが認められる。

次に、動的荷重に対する終局耐力について試験結果と解析結果を比較すると、図—18のようになる。図から、解析および試験結果のいずれもひずみ速度の増大に伴って終局耐力の大きさが増加する傾向が認められる。また、解析結果は試験結果と比較的良好に一致しており、動的荷重に対する終局耐力の概略の大きさを本研究で示した手法を用いることにより変形と同様に推定することが可



(a) $p_w=0.103$ (Type-A) (b) $p_w=0.044$ (Type-B)
 図—19 荷重～載荷点変位関係に及ぼすひずみ速度の影響

能であるとする。

図—19に、本試験で用いた試験体のうち拘束筋体積比が最大 ($p_w=0.103$, Type-A) の試験体および最小 ($p_w=0.044$, Type-B) の試験体の諸元を用い、ひずみ速度をパラメーターとした解析結果を示す。図—19(a)から、拘束筋体積比が大きい場合は、ひずみ速度の増大に伴って終局限界変形量が減少する傾向が認められる。これは、図—4(a)の試験結果と同様の傾向である。また、拘束筋体積比が小さい場合は、ひずみ速度の増大に伴い逆に終局限界変形量が増大する傾向にあり、これも図—4(b)に示した試験結果と一致する。すなわち図—14に示したように、拘束筋体積比が小さい場合はコンクリートの応力下降勾配係数はひずみ速度の影響をあまり受けないのに対し、式(9)~(13)に示したコンクリートや鉄筋の圧縮強度や破断ひずみなどの大きさがひずみ速度の影響を大きく受けるため、ひずみ速度の増大に伴って結果的に終局限界変形量は大きくなったものと考えられる。これに対し、拘束筋体積比が大きい場合は、ひずみ速度は圧縮強度や破断ひずみに対してよりも応力下降勾配係数の大きさに強く影響を及ぼすため、ひずみ速度が増大すると終局限界変形量が減少することになる。

6. 結 言

本研究は、荷重速度が比較的大きい動的荷重(高速載荷)に対するRCはりの終局限界性能を定量的に評価する方法について検討したものである。本研究で得られた成果は、以下のように要約できる。

(1) RC断面の曲げ解析手法である断面分割法に、終局耐力限界状態のはり軸方向の曲率分布および終局変形限界状態の判定指標を導入することにより、静的荷重に対する終局変形限界状態までの荷重～載荷点変位関係が概略推定できる。

(2) コンクリートの最大応力以降の応力下降勾配係数の大きさを推定するために、これに影響を及ぼすと考えられる拘束筋体積比およびひずみ速度の両方の効果を

同時に考慮した式 (15) の関係式を提案した。

(3) ひずみ速度効果を考慮したコンクリートおよび鉄筋の材料力学特性およびコンクリートの応力下降勾配係数を静的な曲げ解析手法である断面分割法に単純に導入することにより、動的載荷に対する RC はりの終局限界変形状態までの弾塑性挙動や終局限界変形の概略値を定量的に評価することが可能である。

なお、本研究では複鉄筋比 $A_s'/A_s=1.0$ で支間長 120 cm の RC はりのみを対象としており、さらに種々の条件に対しても検討を行う必要があるものと考ええる。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，1986.11.
- 2) 森田司郎・足立直行：曲げ材圧縮部におけるコンクリートの性質，材料，1971.1.
- 3) 六車 照：鉄筋コンクリート断面の破壊時コンクリート圧縮縁ひずみに関する研究，材料，1975.5.
- 4) 鈴木計夫・中塚 信・阿波野昌幸：コンクリートはり部材断面の曲げ終局限界点に関する研究（その1）各種終局域指標点と提案する曲げ終局限界点の存在メカニズム，日本建築学会構造系論文報告集，第383号，pp.49～56，1988.1.
- 5) 小柳 治・六郷恵哲・岩瀬裕之：RC はりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響，土木学会論文集，第348号/V-1，pp.153～162，1984.8.
- 6) たとえば，竹田仁一・立川博之・藤本一男：コンクリートと衝撃—衝撃を受けるコンクリートの性状と実験—，コンクリート工学，Vol.15，No.4，pp.1～11，1977.4.
- 7) 山田俊二・高橋芳彦・大野友則・内田 孝：高速載荷に対する高強度コンクリートの動的応力～ひずみ関係，土木学会第45回年次学術講演会概要集第1部，pp.484～485，1990.10.
- 8) 首藤誠志・松本憲幸・高橋芳彦・大野友則：高速載荷を受ける鋼材の動的応力～ひずみ関係モデル，土木学会第45回年次学術講演会概要集第1部，pp.486～487，1990.10.
- 9) 井上・藤井・小林・宮川・服部：横拘束筋のコンクリートはり部材への適用，第43回セメント技術大会講演集，pp.462～467，1989.5.
- 10) 松本公典：RC，PCおよびPRC部材のモーメント～曲率の関係とその応用，土木学会論文報告集，第331号，pp.155～165，1983.3.
- 11) Corley, W.G.: Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, Proc. of ASCE, Vol.92, ST5, pp.121～146, 1966.10.
- 12) 高橋芳彦・太田俊昭・日野伸一・大野友則：高強度コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成版型部材の静的弾塑性挙動と終局限界性能，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1245～1258，1989.3.
- 13) Park, R., Kent, D.C. and Sampson, R.A.: Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Proc. of ASCE, ST7, July 1972.
- 14) Popovics, S.: Factors Affecting the Elastic Deformations of Concrete, Proc. of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol.IV, Kyoto, pp.172～183, 1971.8.

(1990.10.15 受付)

METHOD FOR ESTIMATING ULTIMATE LIMIT DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER HIGH SPEED LOADINGS

Yoshihiko TAKAHASHI, Tomonori OHNO,
Toshiaki OHTA and Shin-ichi HINO

Based on the idea of limit states design, the dynamic elasto-plastic behaviors and ultimate limit deformation capacity of structural members should be estimated quantitatively to ensure the structural safety against such dynamic loads induced from impact by aircraft, vehicles, ships and falling rocks etc..

This study is to present the computational procedure for estimating the ultimate limit capacities of RC members under high strain-rates of dynamic loads. In the experiment, in order to investigate the effects of both strain-rate and confinement on the amount of ultimate limit capacities, RC beam specimens having different lateral reinforcements were tested under three types of loadings. Then the common method of flexural analysis, named the discrete elements method, is developed by introducing the effects of strain-rates on the material properties of concrete and reinforcing bars.