

# 修正圧縮場理論に基づく RC 梁の動的せん断耐力の評価方法

Elavuation method of dynamic shear resistance of RC beams based on modified compression field theory

ソムラート・アモンテップ\*, 藤掛一典\*\*  
Amornthep Somraj, Kazunori Fujikake

\*防衛大学校建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

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

Key Words: dynamic shear resistance, RC beam, modified compression field theory, loading rate effect

キーワード: 動的せん断耐力, RC 梁, 修正圧縮場理論, 載荷速度効果

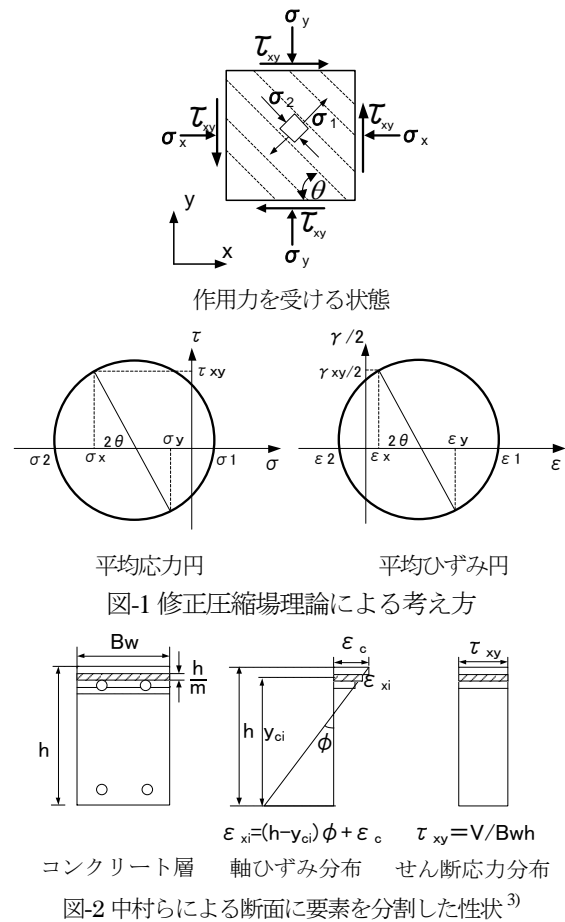
## 1. はじめに

落石, 車両, 船舶および航空機等の衝突や爆薬の爆発によって生じる衝撃荷重は, 作用時間は極めて短いものの非常に大きな荷重強度を有するという特徴を持っている。このような衝撃荷重の作用により鉄筋コンクリート (RC) 構造物は脆性的なせん断破壊を生じることが懸念される。したがって, そのような破壊を防止するためには鉄筋コンクリート部材の動的なせん断耐力の評価が重要となる。既に著者らは, せん断スパン比 2.5 以下のディープビームと呼ばれる RC 梁の動的せん断耐力の評価にストラット・タイモデルの適用が可能であることを示した<sup>1)</sup>。しかしながら, せん断スパン比が 2.5 以上の RC 梁の動的せん断耐力の評価方法に関する研究はほとんどなされていないのが現状である。そこで本研究では, 静的載荷に対して提案された修正圧縮場理論を動的載荷に拡張してせん断スパン比が 2.5 以上の RC 梁の動的せん断耐力の評価を試みた。

## 2. 修正圧縮場理論による動的せん断耐力の解析方法

修正圧縮場理論は Mitchell 及び Collins<sup>2)</sup>によって提案された RC 部材のせん断耐力を求めるための解析手法の一つである。この理論では, せん断力を受けるコンクリート要素は, 図-1 に示すように一様な斜めひび割れを生じるものとし, ひび割れに平行な圧縮応力  $\sigma_2$  ならびにひび割れに直行する引張応力  $\sigma_1$  によって外力に抵抗するものと基本的に考える。この基本的な考え方を踏まえるとともに力の釣合い, 変形の適合条件およびコンクリート・鉄筋の応力 - ひずみ関係を用いて RC 部材のせん断耐力を評価する。

中村ら<sup>3)</sup>はこの手法の適用は一様なせん断力を受ける



RC 部材に限られ, 曲げモーメントとせん断力を同時に受ける RC 梁に適用することは困難であると指摘し, その点を改善した修正圧縮場理論を提案している。

中村らは, 図-2 に示すように RC 梁断面を薄層要素に分割し, 曲げモーメントの作用による軸方向ひずみ分布ならびにせん断力の作用によるせん断応力分布を仮定することにより, 各薄層要素に修正圧縮場理論を適用し RC 梁のせん断耐力を評価している。

本研究では、中村らによって提案された修正圧縮場理論を基本として、図-3に示すようにコンクリートの圧縮強度・引張強度ならびに鉄筋の降伏強度に荷重速度が及ぼす影響を考慮することにより動的荷重に拡張する。図-4に示すように単純支持されたRC梁が中央荷重によってせん断変形をすると仮定すると、せん断ひずみ速度( $\dot{\gamma}$ )と変位速度( $\dot{\delta}$ )には次の関係がある。

$$\dot{\gamma} = 2\dot{\delta}/L \quad (1)$$

また、式(1)と主ひずみ速度とせん断ひずみ速度の関係より次の関係を得る。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\delta}/L \quad (2)$$

ここでは、式(2)で表される主ひずみ速度( $\dot{\epsilon}$ )を用いてコンクリートや鉄筋の動的強度を次式により評価する。コンクリートの動的圧縮強度( $f'_{cd}$ )<sup>4)</sup>

$$f'_{cd} = f'_c \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006} \left[ \text{Log}_{10} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right) \right]^{1.05} \quad (3)$$

コンクリートの動的引張強度( $f_{td}$ )<sup>5)</sup>

$$f_{td} = f_{ts} \exp \left[ 0.00126 \left( \text{Log}_{10} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)^{3.373} \right] \quad (4)$$

鉄筋の動的降伏強度( $f_{syd}$ )<sup>4)</sup>

$$f_{syd} = f_{sys} (1.202 + 0.040 \times \log_{10} \dot{\epsilon}) \geq f_{sys} \quad (5)$$

図-5に動的修正圧縮場理論の計算フローを示す。本計算では、曲率を徐々に大きくしながら計算を行いRC梁の動的な終局耐力を求める。本計算における破壊モードの判定は、中村らと同様に次のように定義した。1)最終的に断面が軸力に対する釣合いを満足した状態で各断面要素の少なくとも一つが釣合いを満足する解を持たない場合をせん断破壊とする。一方、2)圧縮側の最大ひずみがコンクリートの最大圧縮強度に対応するひずみ(-0.002)を越えた場合を曲げ破壊とする。

### 3. 動的修正圧縮場理論の妥当性の検討

動的荷重に拡張した修正圧縮場理論モデルの妥当性を検討するために、図-6に示すようにRC梁の急速荷重試験を行った。図-7にRC梁試験体実験の概要を示す。RC梁試験体は、幅120mm高さ220mm、長さ1,500mmを有している。主鉄筋にはD19(SD345)を、せん断補強筋にはD6(SD295A)をそれぞれ使用した。RC梁のせん断補強筋比は、0.35、及び0.70%の3種類(S0, S35, S70)とし

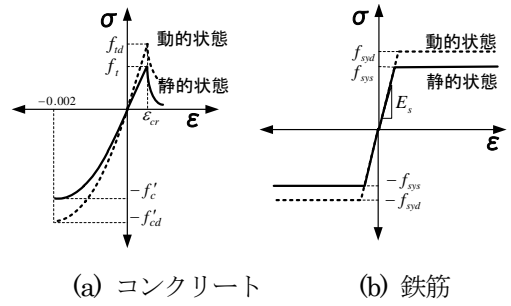


図-3 コンクリート及び鉄筋の応力ひずみ関係

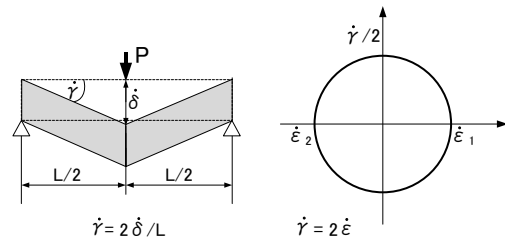


図-4 純せん断状態

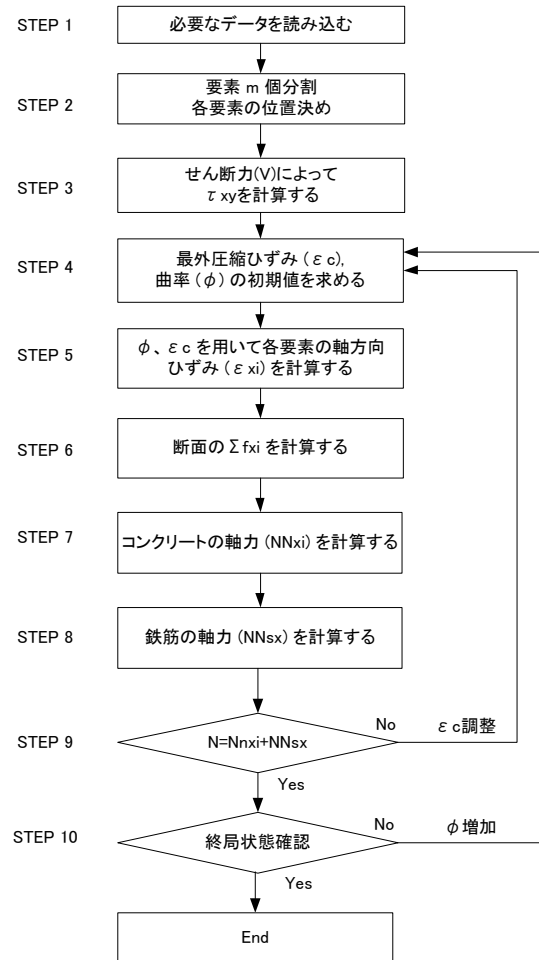


図-5 動的修正圧縮場理論の計算フローチャート

た。材料特性に関しては、コンクリート圧縮強度は30MPaで、鉄筋の降伏強度は主鉄筋及びせん断補強筋がそれぞれ366MPa、316MPaである。本急速荷重試験

では、支間長 1.2m で単純支持された RC 梁の中央に所定の変位速度で荷重を載荷した。荷重速度については  $4.0 \times 10^{-4}(S)$ ,  $4.0 \times 10^{-2}(L)$ ,  $4.0 \times 10^{-1}(M)$ ,  $2(H)$  [m/s] の 4 段階とした。

急速荷重試験で得られた RC 梁の破壊性状に関しては図-8 に示すように、せん断補強筋量を増加することに従い、破壊挙動は延性から脆性に変化し S0, S35 梁はせん断破壊、S70 梁は曲げ破壊となった。なお、荷重速度の違いによる破壊モードの相違は認められなかった。

急速荷重試験では、荷重速度が大きくなるとロードセルで計測された荷重値には慣性力の影響が顕著になることが知られている。そこで本研究では、既往の研究と同様にロードセルで計測された荷重から慣性力の影響を取り除いて RC 梁の動的耐力の評価を行うことにした。

図-9~11 にせん断補強筋比ごとに荷重速度の影響を考慮した動的修正圧縮場理論により求めたせん断スパン比と最大耐力の関係を示す。また、図中には実験結果を表示するとともに動的効果を考慮した曲げ耐力の評価式、ならびに静的荷重する場合は二羽らによって提案されたせん断耐力の評価式<sup>9)</sup>も併せて示している。図-9 に示すせん断補強筋比を配置していない場合の本解析結果は、低速度、低せん断スパン比の領域では二羽らにほぼ一致してせん断破壊と評価される。これに対して、荷重速度、せん断スパン比が大きくなるにしたがい曲げ耐力式に一致する傾向を示すことがわかる。また、図-10 及び図-11 に示すせん断補強筋比 0.35, 0.70% の場合の本解析結果は概ね曲げ耐力式に一致することがわかる。本解析結果は、実験と比較すると低速度側で安全側の評価を与えるものの全体的には概ねよい評価を与えていることがわかる。ただし、せん断補強筋比 0.35% に関しては、解析では曲げ破壊と評価されるのに対して、実験では曲げ降伏後にせん断破壊している。これは、せん断補強筋の設置間隔が 150mm と大きかったために実験では曲げ破壊に至る前にせん断破壊したためと考えられる。

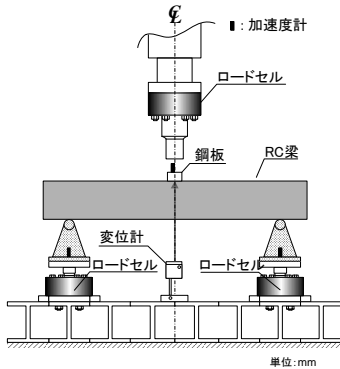


図-6 RC 梁の急速荷重試験

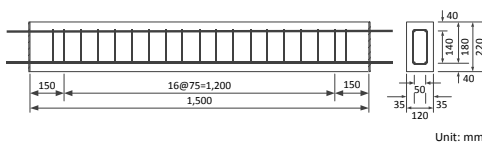


図-7 試験体の概要(S70)

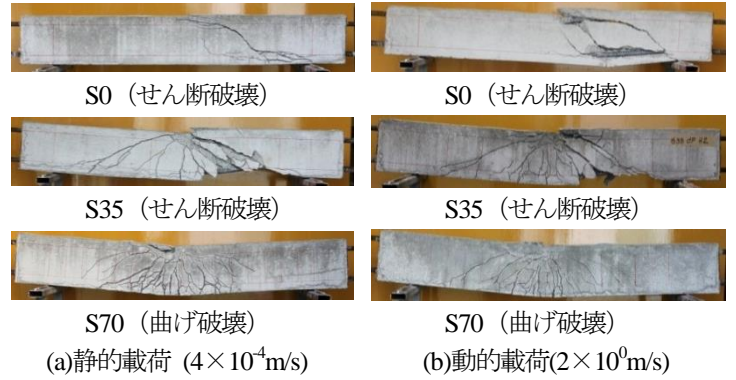
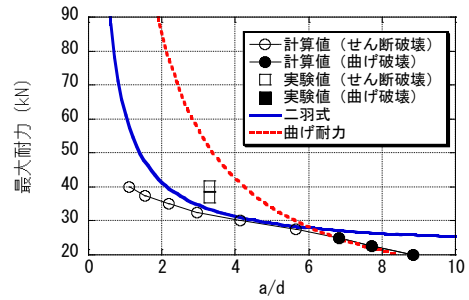
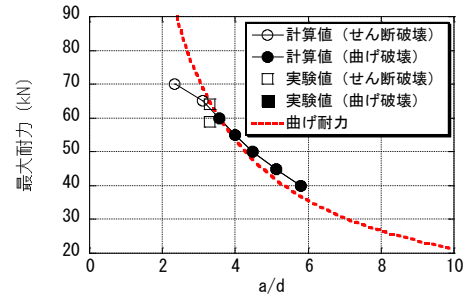


図-8 急速荷重を受けた RC 梁の破壊性状

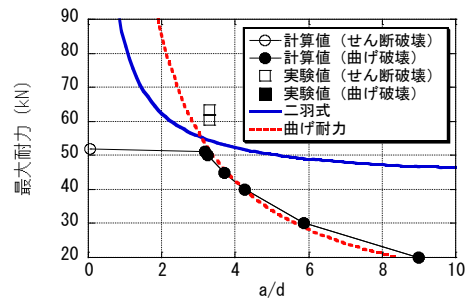


(a) 荷重速度  $4 \times 10^{-4}$  m/s

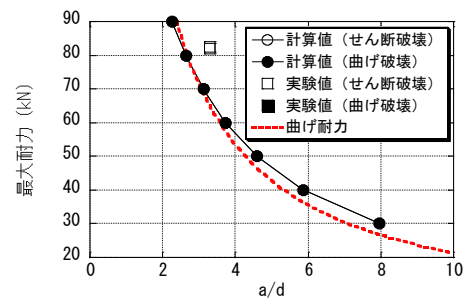


(b) 荷重速度  $2 \times 10^0$  m/s

図-9 せん断補強筋が無い梁 (S0)



(a) 荷重速度  $4 \times 10^{-4}$  m/s



(b) 荷重速度  $2 \times 10^0$  m/s

図-10 せん断補強筋を有する梁 (S35)

#### 4. 荷速度が破壊モードに及ぼす影響

本急速荷試験では、荷速度を大きくしても RC 梁試験体の破壊モードの変化は見られなかった。しかしながら、図-9 に示したせん断補強筋のない RC 梁の解析結果によれば、荷速度が  $4.0 \times 10^{-4}$  (m/s) の時にはせん断スパン比 6 程度までせん断破壊するが、荷速度が速くなるとせん断破壊領域は低せん断スパン比側に移行するのがわかる。すなわち、せん断スパン比によっては静的荷でせん断破壊していたものが高速で荷した場合に曲げ破壊することを表している。

#### 5. 荷速度が最大耐力の増加率に及ぼす影響

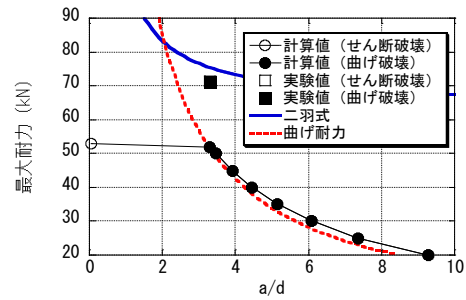
せん断スパン比 3.3 を有する RC 梁の動的修正圧縮場理論により得られた最大耐力を対応する静的荷における最大耐力で除したものを動的耐力の増加率と定義する。図-12 に各せん断補強筋比に対する動的耐力の増加率と荷速度の関係を示す。この図から、せん断補強筋量が大きくなるほど荷速度による耐力増加率が小さくなる傾向が確認できる。このような解析によって得られた傾向は、既に実験においても確認されている<sup>7)</sup>。

#### 6. まとめ

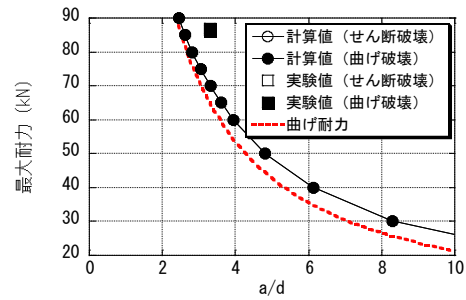
- 1) 静的荷に対して提案された修正圧縮場理論をコンクリートの圧縮強度、引張強度、鉄筋の降伏強度に動的効果を考慮することにより動的荷に拡張した。また、実験結果との比較により動的修正圧縮場理論の妥当性を示すことができた。
- 2) 本解析結果から、せん断スパン比によっては荷速度が大きくなるに従いせん断破壊から曲げ破壊に変わって行く可能性があることがわかった。
- 3) 動的修正圧縮場理論の解析結果からせん断補強筋比は RC 梁の動的耐力の増加率に影響を及ぼすことがわかった。せん断補強筋比が大きくなるに従い RC 梁の動的耐力の増加率は低下する。

#### 参考文献

- 1) Amornthep, S., Kazunori, F. and Bing, L. : Influence of Loading Rate on Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams, International Journal of Protective Structure, Vol.4, No.4, pp.521-543, 2013.
- 2) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.
- 3) 中村光, 檜貝勇 : 拡張した修正圧縮場理論による RC 梁断面のせん断耐荷力評価, 土木学会論文集, Vol.23, No.490, pp.157-166, 1994.



(a) 荷速度  $4 \times 10^{-4}$  m/s



(b) 荷速度  $2 \times 10^0$  m/s

図-11 せん断補強筋を有する梁 (S70)

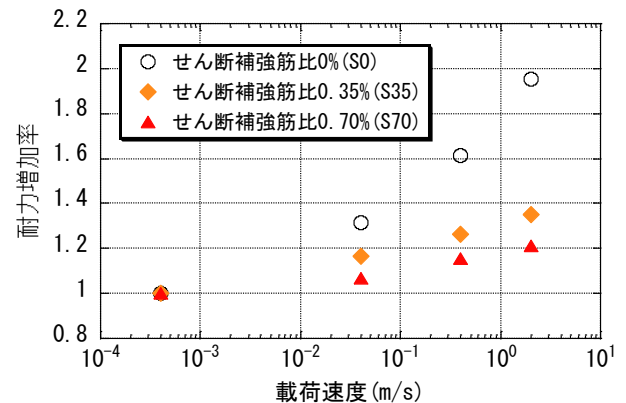


図-12 MCFT 解析によるせん断補強筋比の影響

- 4) Kazunori, F., Bing, L. and Sam, S. : Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation, Journal of Structure Engineering, ASCE, pp.938-950, 2009.
- 5) 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.
- 6) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村浦 : せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, Vol.5, No.372, pp.167-176, 1986.
- 7) 讃岐正太郎, 藤掛一典 : 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, 土木学会第 10 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2010.