

論文 コンクリート構造物の局所的圧縮破壊に関する解析的研究

三木 朋広^{*1}・Manakan LERTSAMATTIYAKUL^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}・濱田 譲^{*4}

要旨: 格子モデルは、鉄筋コンクリート部材の斜めひび割れの発生、せん断補強筋の降伏、ウェブコンクリートの破壊までの一連の耐荷機構の変化を表現し、かつマクロ的な耐荷機構モデルの構築に役立つ簡易な解析手法である。本研究では、格子モデルを一般的なはり理論の適用できない、応力分布が一樣でない領域(D-領域)に対して適用することを試み、その例として RC ディープビームを取り上げて解析を行った。このとき、コンクリートの圧縮部材に対して、圧縮破壊に要するエネルギーを一定にするように圧縮応力-ひずみ関係を変えることで、局所的な圧縮破壊を表現した。

キーワード: 格子モデル, D-領域, RC ディープビーム, 局所的圧縮破壊

1. はじめに

集中荷重付近,あるいは断面形状が幾何学的に急変する付近の領域(D-領域)では、ひずみの分布が非線形となり、一般的なはり理論が適用できない¹⁾。本研究では、鉄筋コンクリート部材を離散的にモデル化し、簡易でかつ客観的な後処理が可能であり、またせん断耐荷機構を妥当な精度で表現できる手法である格子モデルを用いて、その解析結果と RC ディープビームのせん断実験の結果を比較した。

2. 解析モデル

2.1 格子モデルの概要

本研究で用いた格子モデル²⁾の構成要素として、図-1に示すように、コンクリートは曲げ圧縮部材、曲げ引張部材、斜め圧縮部材、斜め引張部材、端部垂直部材、アーチ部材に分割した。また、補強筋は水平部材、垂直部材(スターラップ)に分割した。

コンクリートの斜め圧縮部材と斜め引張部材を、45度と135度方向に規則的に配置し、さらに端部節点以外で変形が独立な細長い部材で

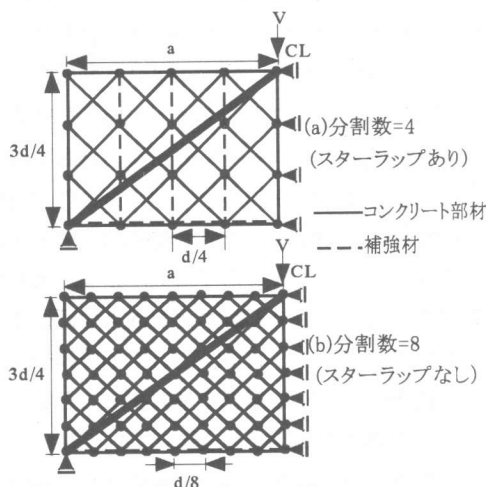


図-1 格子モデルの概念図

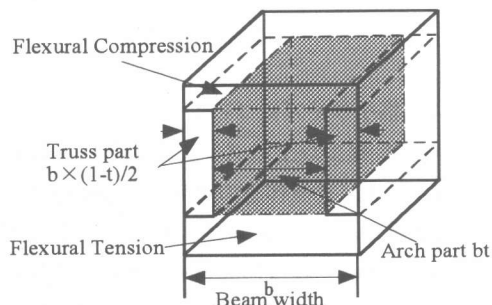


図-2 格子モデルにおける断面区分の概念図

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学 工学部土木工学科

*3 東京工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 ドービー建設工業(株) 工修 (正会員)

あるアーチ部材を組み込むことにより、斜めひび割れ発生後、マクロ的な圧縮力の方向の変化に対応させることができる。

2.2 各要素のモデル化

図-2は、格子モデルにおけるはり断面の区分の概念図である。ウェブコンクリート部分を図-2に示すように、トラス部分とアーチ部分に区分する。それぞれの要素の幅は、アーチ部分は bt 、トラス部分は $b(1-t)$ ($0 < t < 1$) となる。このとき、 t 値は、はりの初期状態における微小な強制変位に対する、部材全体のポテンシャルエネルギーが最小となるように定める。

a/d が 2.5 程度以上のスレンダービームでは、従来、格子モデルの高さを供試体の有効高さ d と一致させていた。しかし、 $a/d=1.0$ 程度のディープビームでは、コンクリートの曲げ圧縮応力分布を等価応力ブロックと仮定し、終局時の力のつり合い条件から求めた圧縮合力の作用位置と、軸方向鉄筋の中心位置との距離は $3d/4$ 程度であり、有効高さ d を格子モデルの高さとして近似することは、せん断耐力を過大に評価することになると考えられる。従って、圧縮合力の作用位置に曲げ圧縮部材を配置することとし、モデルの高さを $3d/4$ とした。

コンクリートの水平部材の断面積は、曲げ圧縮部材、曲げ引張部材それぞれかぶりの2倍に部材の幅 b を乗じたものとした。

2.3 格子サイズについて

$a/d=2.5$ 程度以上のスレンダービームに対しては、従来、垂直部材の水平方向間隔を水平部材間距離 (= はりの有効高さ d) の $1/2$ としていたが²⁾、 $a/d=1.0$ 程度のディープビームに対してこの手法を用いると、相対的に粗い要素分割となるため水平方向間隔を $d/4$ または $d/8$ (図-1) として解析を行った。図-3に示すように、せん断補強筋のない場合の RC ディープビームの荷重-載荷点変位の関係より、垂直部材の水平方向間隔を $d/4$ 、 $d/8$ とした時の要素寸法依存性

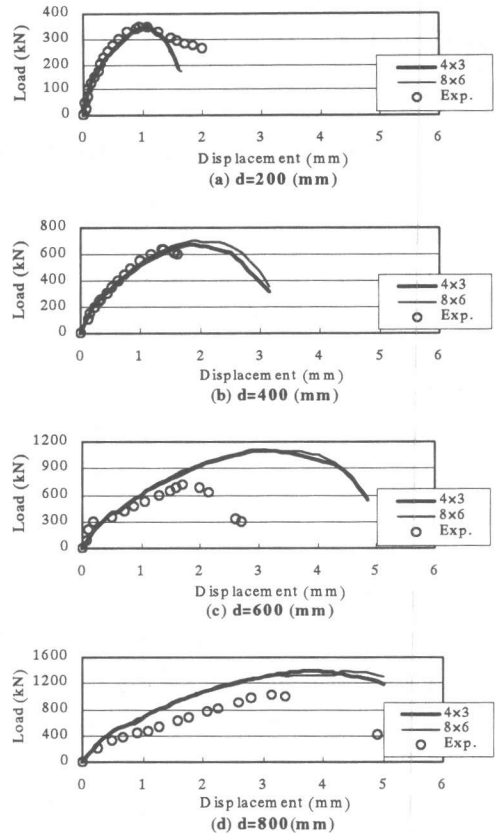


図-3 荷重-載荷点変位の関係

は無視できると判断できるので、以後の解析モデルでは、垂直部材の水平方向間隔を $d/4$ とすることにした。これより、はり側面から見たコンクリートの斜材の幅は、 $d/4 \cdot \sin 45^\circ$ となる。また、アーチ部材の傾斜角を θ とすると、コンクリートのアーチ部材の幅は、 $d \cdot \sin \theta$ となる。

2.4 材料モデル

(1) コンクリート圧縮部材

コンクリートの圧縮部材には以下のモデルを用いた。Collins らの実験的な研究³⁾によると、ひび割れたコンクリートでは、引張ひずみ ϵ_t の増加に伴い、その直交方向の圧縮強度が低下することが知られており、その軟化の程度を式(1)で評価している。その概要を図-4に示す。

$$\eta = 1.0 / \{0.8 - 0.34(\epsilon_t / \epsilon'_0)\} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon'_0 = -0.002$

また、コンクリートの圧縮部材の材料モデルには、式(2)の Collins らの提案する応力-ひず

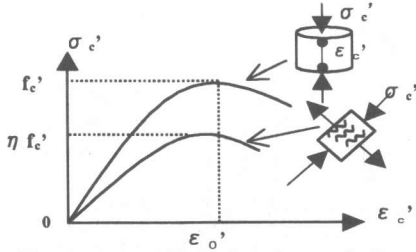


図-4 ひび割れの生じたコンクリートの

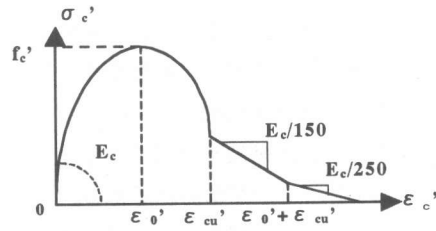


図-5 コンクリートの圧縮モデル

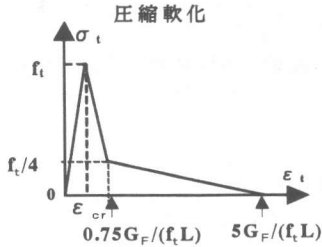


図-6 1/4-モデル

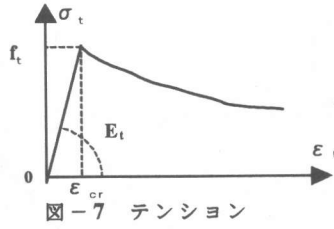


図-7 テンション

スティフニングモデル

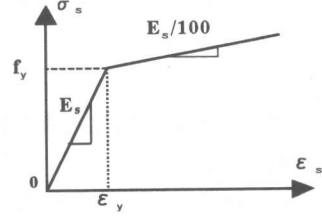


図-8 鉄筋(バイリニアモデル)

表-1 実験データの諸元

供試体	b (mm)	h (mm)	d (mm)	a/d	主鉄筋	f'_c (N/mm ²)
A1	150	250	200	1.0	3-D19	24.4
A2	150	450	400	1.0	4-D25	24.4
A3	150	650	600	1.0	4-D29	27.1
A4	150	900	800	1.0	6-D29	27.1

み関係を用いた。その概形を図-5に示す。

$$\sigma'_c = -\eta \cdot f'_c \left\{ 2 \left(\frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_0} \right) - \left(\frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_0} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、軟化係数の決定に用いる引張ひずみ ϵ_t は、斜め圧縮部材では直交する斜め引張部材の引張ひずみを、アーチ部材では、代表的な値として載荷点付近のコンクリート斜め引張部材の引張ひずみを用いた。

終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu} 以後の圧縮応力は、 $\epsilon'_0 + \epsilon'_{cu}$ までは初期勾配 E_c の 1/150 で、それ以降は E_c の 1/250 で直線的に減少させ、終局圧縮ひずみ到達以後も各圧縮部材で圧縮力を負担するようにした。

(2) コンクリート斜め引張部材

コンクリート斜め引張部材には、1/4 モデル(図-6)を用いた。このとき、コンクリートの破壊エネルギー G_F は、0.1N/mm とした。

(3) コンクリート曲げ引張部材

コンクリート曲げ引張部材には、コンクリートと鉄筋の付着を考慮してテンションスティフニングモデル(図-7)を用いた。ひび割れ開始ひずみ ϵ_{cr} は 0.0001 とし、ひび割れ発生後の応

力-ひずみ関係には式(3)を用いた。

$$\sigma_t = f_t \left(\epsilon_{cr} / \epsilon_t \right)^{0.4} \quad (3)$$

ここで、 f_t : コンクリートの引張強度

(4) 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係(図-8)は、バイリニアモデルとし、降伏後の勾配は、初期勾配 E_s の 1/100 とした。

3. 解析結果

3.1 せん断補強筋のない場合のRCディープビームの解析

表-1 に解析の対象とした RC ディープビームの供試体の概要^{4),5)}を示す。図-3 に示した荷重と載荷点変位の関係を見れば、 $d=200\text{mm}$ のケースでは、せん断耐力に関して、実験値と計算値でよい一致が見られるが、部材寸法が大きくなるにつれて実験値と計算値の差が顕著になる。また、図-10、図-11 に、引張軟化特性のみを考慮した結果を Tens.soft として示しているが、計算結果には、部材寸法が大きくなるにつれてせん断強度が低下する、いわゆる寸法効果が実

験結果ほど見られない。このことより、圧縮破壊が局所化することで終局状態に至る破壊モードの場合、コンクリートの引張軟化特性のみではなく、コンクリートの圧縮破壊の局所化現象も計算に取り入れていくべきであると考え。そこで、コンクリートの圧縮部材に対して、以下のように圧縮の局所化特性を仮定し、解析を行うことにした。

3.2 圧縮破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係の仮定

部材の圧縮破壊は、部材寸法が大きくなっても、ある特定の領域に局所化すると仮定する。このとき圧縮破壊領域と部材全体が一致するケースとして、図-3 よりせん断耐力とピークまでの挙動が、実験値と計算値でよい一致が見られる $d=200\text{mm}$ の場合を取り上げる。つまり、 $d=200\text{mm}$ の場合において、各コンクリート圧縮部材と圧縮破壊領域が一致し、各圧縮部材の長さが圧縮破壊領域長さ L_p と等しいと仮定する。これより、有効高さ $d=400, 600, 800\text{mm}$ の各圧縮部材の長さは、それぞれ仮定した圧縮破壊領域長さ L_p の2倍、3倍、4倍となる。

各構成要素内では、それぞれ平均応力-平均ひずみ関係で挙動を記述している。従って、局所的な圧縮破壊に要するエネルギーを部材寸法によらず一定とするため、圧縮応力-ひずみ関係を変えることにする。ここで、

(圧縮破壊領域) = (断面積 A_c) × (圧縮破壊領域長さ L_p)

と定義する。 A_c は部材断面積であり、 L_p はある特定の長さで、 L_p より部材の長さが小さいものは全領域で破壊すると仮定する。

部材の長さが L_p より長くなると、圧縮応力-ひずみの関係はより脆性的になる。本研究では図-9 に示すように、 $d=200\text{mm}$ の場合を基準として、 $d=400, 600, 800\text{mm}$ におけるピーク後のひずみを、それぞれ $1/2, 1/3, 1/4$ に減ずることにした。例えば、図-9 中に示す $d=200\text{mm}$ での ϵ_{cu} は、 $d=400, 600, 800\text{mm}$ の各ケースに対し

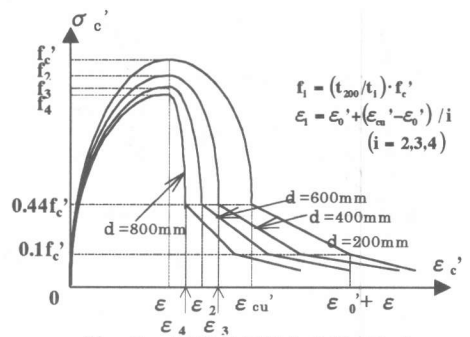
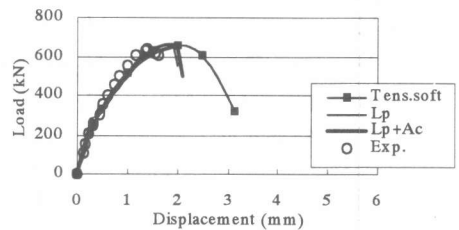
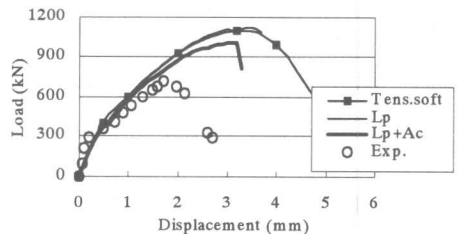


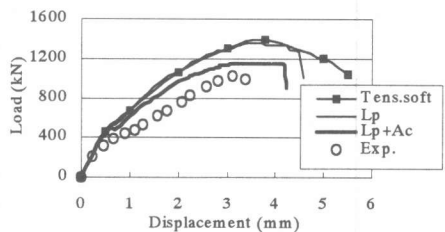
図-9 圧縮の局所化を考慮したコンクリートの圧縮モデル



(a) $d=400\text{mm}$



(b) $d=600\text{mm}$



(c) $d=800\text{mm}$

図-10 荷重-載荷点変位の関係

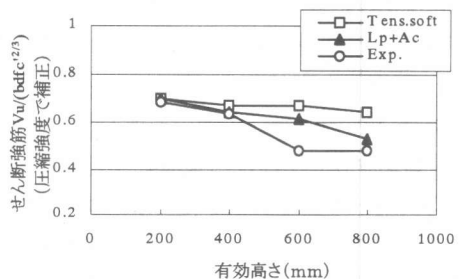


図-11 せん断強度-有効高さ (せん断補強筋なし)

て、それぞれ ϵ_i ($i=2,3,4$)と表すことができる。

また、アーチ部材に関しては、断面積が大きくなるにつれて、見かけの圧縮強度が低下すると仮定し、その低下の程度に、アーチ部材の相対幅を表す t 値を用いてモデル化した。つまり、各供試体寸法に対して t_d (d :有効高さ)とすると、 $d=200\text{mm}$ のケースの t_{200} を基準として、圧縮応力に t_{200}/t_d ($d=400, 600, 800\text{mm}$)を乗ずることによって圧縮強度の最大値を低減させた。

以上の圧縮の局所化現象を考慮した圧縮応力-ひずみ関係の概念図を図-9に示す。

3.3 解析結果

仮定した圧縮応力-ひずみ関係を用いて、格子モデル解析を行った。実験値と計算値を比較するために、荷重と載荷点変位の関係を図-10に示す。図中の計算結果は、引張軟化特性のみを考慮した結果 (Tens.soft) を点線で、部材長さによる影響を考慮した結果 (L_p) を実線 (太) で、圧縮破壊領域を考慮した結果 (L_p+A_c) を実線 (細) で示している。図-10より、部材長さを考慮した場合 (L_p)、部材が長くなるに伴い、コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係をより脆性的なものとするることにより、ピーク後の部材の変形性能が低下していくことが分かる。この結果は、部材寸法が大きくなると破壊がより脆性的になる実際の現象と一致している。

図-11は、各実験ケースに対するせん断強度と有効高さの関係を示したものであり、引張軟化特性のみを考慮した結果 (Tens.soft) と、本研究で仮定した圧縮破壊領域を考慮した結果 (L_p+A_c) とを比較した。なお、せん断強度は圧縮強度の影響を考慮して、 $f_c^{2/3}$ で除して補正している。図-11より、圧縮破壊の局所化現象を考慮した結果の方が、より実現象に近い結果となっていることが分かる。つまり、圧縮破壊の局所化現象を考慮すると、コンクリート構造物全体の挙動が脆性的になり、部材寸法の増大に伴うせん断強度の低下、いわゆる寸法効果を表現することができる。

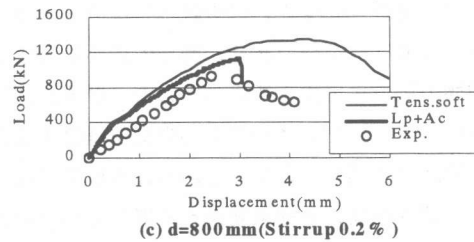
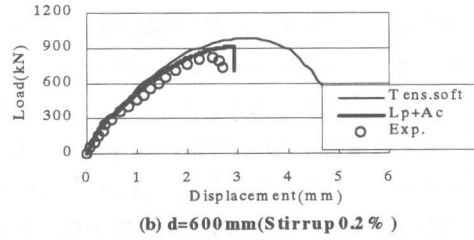
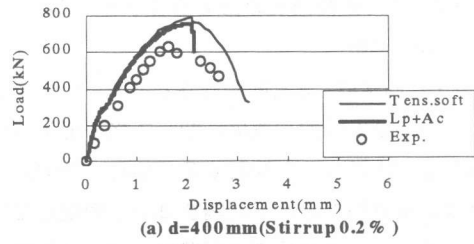


図-12 荷重-載荷点変位の関係

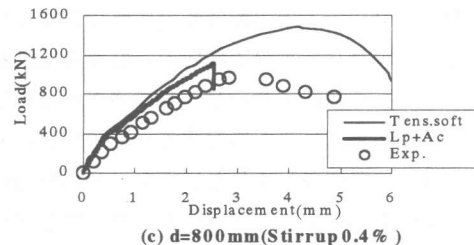
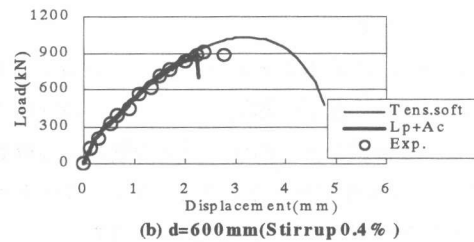
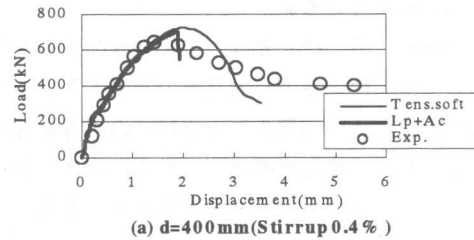


図-13 荷重-載荷点変位の関係

3.4 セン断補強筋のある場合のRCディープビームの解析

3.3と同様に、せん断補強されたRCディープビームのせん断耐荷機構に関して格子モデルの適用可能性について検討する。部材のモデル化では、垂直部材の水平間隔を $d/4$ と固定しているため、せん断補強筋の配置は実際とは異なっているが、モデルのせん断補強筋の断面積を変えることでせん断補強筋比を一致させている。

せん断補強されたRCディープビームについて、せん断補強筋比が0.2%、0.4%に対する、それぞれのケースの荷重と載荷点変位の関係⁴⁾、⁵⁾を図-12、図-13に示す。せん断補強されていない場合と同様に、引張軟化特性のみ考慮しただけでは不十分であり、図-9に示した圧縮破壊の局所化現象を考慮した応力-ひずみ関係を用いることで、ピークまでの変位挙動を妥当な精度で予測している。しかし、本研究では、せん断補強筋の横拘束効果を考慮していないため、ピーク後の挙動は、実験結果より脆性的なものとなっている。

図-14、図-15に示す、圧縮強度の影響を考慮したせん断強度と有効高さの関係より、引張軟化特性と圧縮破壊の局所化特性の両方を考慮することで、せん断補強されたRCディープビームの寸法効果も説明できることがわかる。

4. まとめ

(1) $a/d=1.0$ のRCディープビームの格子モデル解析では、曲げ圧縮側コンクリートの圧縮合力の中心位置から、曲げ引張側鉄筋の中心位置までを $3d/4$ 程度とすることで、コンクリートはりのせん断耐力の適切な評価ができた。

(2)コンクリートの圧縮破壊の局所化現象を考慮し、コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係を仮定した。これにより、せん断補強されていないRCディープビームに対する、格子モデル解析の適用可能性が示された。また、せん断補強されているRCディープビームに対しても同様に適用可能であった。

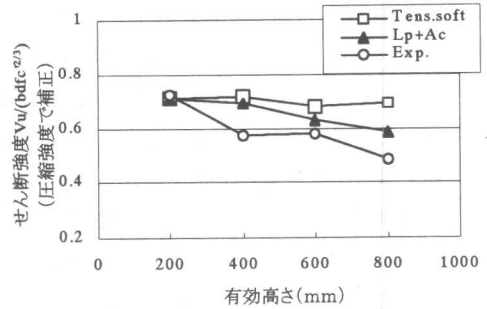


図-14 セン断強度-有効高さ (せん断補強筋比=0.2%)

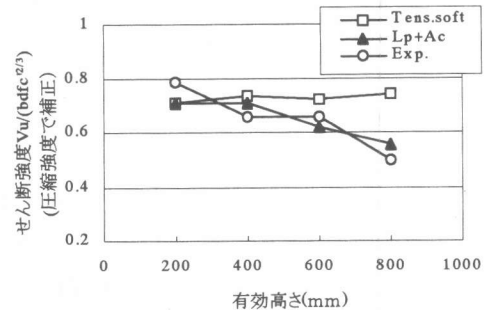


図-15 セン断強度-有効高さ (せん断補強筋比=0.4%)

参考文献

- Schlaich, J., Schäfer, I., and Jennewein, M.: Towards a consistent design of structural concrete, PCI Journal, Vol.21, No.3, pp.74-150, May-June, 1987
- 二羽 淳一郎・崔 益暢・田邊 忠顕: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.508/V-26, pp.79-88, 1995.2
- Vecchio, F. J., 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
- 田村信吾: RCディープビームのせん断強度の寸法効果に関する実験的研究, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, V-283, pp.586-587, 1999.9
- Vo Thanh Hung: Size effect in RC deep beam with shear reinforcement, Proceedings of First International Summer Symposium, JSCE, pp.279-282, Aug. 1999