

論文 各種横荷重と軸方向引張力を同時に受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析

平井 友紀*1 ・ 二羽 淳一郎*2

要旨：土木学会コンクリート標準示方書におけるコンクリートはりのせん断耐荷力算定式には軸方向力の影響を考慮した項が含まれている。ただし、示方書改訂資料の中には、軸方向引張力の影響についての研究が極めて不足していることも指摘されている。本研究では、破壊力学に基づいた解析により、軸方向引張力および部材寸法がせん断強度に与える影響を明らかにするものである。横荷重として、集中荷重および分布荷重を受けるはりについて軸方向引張応力を最大3.0MPa、有効高さを0.1mから2.0mまで変化させ、解析値を算定式、実験式などと比較し、その破壊の特性についても考察した。

キーワード：軸方向引張力、寸法効果、仮想ひび割れモデル、破壊力学

1. はじめに

コンクリートはりのせん断破壊は極めて多くの要因によって影響を受ける複雑な現象であり、その破壊メカニズムを明らかにするために今日までに膨大な数の研究が蓄積されてきた。土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）には、コンクリートの強度、部材の有効高さ、鉄筋比、せん断スパン比、軸方向力を考慮したコンクリートはりのせん断耐荷力算定式が示されている。

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b \quad (1)$$

ここで、 β_d は部材高さに関する項、 β_p は鉄筋比に関する項、 β_n は軸方向力に関する項、 f_{vcd} はコンクリートの強度に関する項、 b_w は腹部の幅、 d は有効高さ、 γ_b は部材係数である。式(1)では、デコンプレッションモーメント M_o と終局モーメント M_u を用い、軸力の影響の項 β_n は軸方向力が圧縮力の場合には、 $\beta_n = 1 + 2M_o/M_u \leq 2$ 、引張力の場合には、 $\beta_n = 1 + 4M_o/M_u \geq 0$ と規定されている。しかしながら、示方書改訂資料[1]の中でも議論されているように、軸方向引張力の影響についての研究は極めて不足しており、軸方向引張力を受ける場合のせん断耐荷力評価方法の理論的な裏付けが十分ではない。

一般に外力によって軸方向引張力が発生することはまれであるが、部材の拘束条件やその変化、温度変化、乾燥収縮などによって軸方向引張力が作用する場合がある。このような軸方向引張力は、ひび割れ発生の原因にもなり、またコンクリート構造部材の耐荷力にも重大な影響をもたらすことは明らかである。田村らは、コンクリートはりのせん断強度について、軸方向引張力およびせん断スパン比を変化させて系統的な実験を行っており、貴重なデータを提示している[2]。

本研究では、軸方向引張力を受けるコンクリートはりのせん断強度特性を解析的に評価することを試みた。著者らは破壊力学に基づいたひび割れモデルを用いて、集中荷重を受けるはりのせん断強度を寸法効果を考慮して解析的に求める研究を行ってきた[3]。これは、コンクリートの引張軟化挙動やコンクリートの破壊エネルギーを考慮した破壊力学的なアプローチによって、コンクリート構造強度

*1 名古屋大学大学院 工学研究科地圏環境工学専攻（正会員）

*2 アジア工科大学院助教授 構造工学科、工博（正会員）

の寸法効果を解析的に評価していくことができ、この種の問題に非常に有効であると考えられるからである。本研究においても同様の解析手法を用いた。解析においては、横荷重として集中荷重、または等分布荷重を受ける双方の場合について、0.0MPa から 3.0MPa の軸方向引張応力の作用するせん断補強のない鉄筋コンクリートのはりのせん断強度を求める。また、有効高さ 0.1m から、実験的研究が非常に困難である、有効高さが 2.0m まで、はりの高さを変化させ、寸法効果についても解析的評価を与える。

2. 破壊力学に基づくひび割れモデル

2.1 モデルの概要

著者らは、コンクリートはりのせん断強度問題を解明するため、破壊力学における「仮想ひび割れモデル」をさらに発展させ、ひび割れ面にすべり抵抗を持たせるモデルを提案している[3]。その概要は以下の通りである。

コンクリートはりがせん断破壊を起こすとき、破壊時には大きな斜めひび割れが発生するが、他に複数の曲げひび割れも共存しているため、解析をより現実的なものとするためにせん断、曲げひび割れが共存しているようなモデルを考える。したがって、解析上、仮想せん断ひび割れと仮想曲げひび割れをはりに設けておく。仮想ひび割れ面上には 2 つの節点を設け、その間にひび割れ面に対して垂直、および平行に、直交するような 2 種類のロッド要素を配置する。すなわち、ひび割れ面に垂直にコンクリートの引張軟化特性を持つロッド要素を、平行となるようにせん断特性を持つロッド要素を与えるのである。コンクリートはりが破壊に至るまでの非線形性はこれらのひび割れ面に配置されたロッド要素のみによって表現され、その他のコンクリート要素は弾性体であると仮定する。

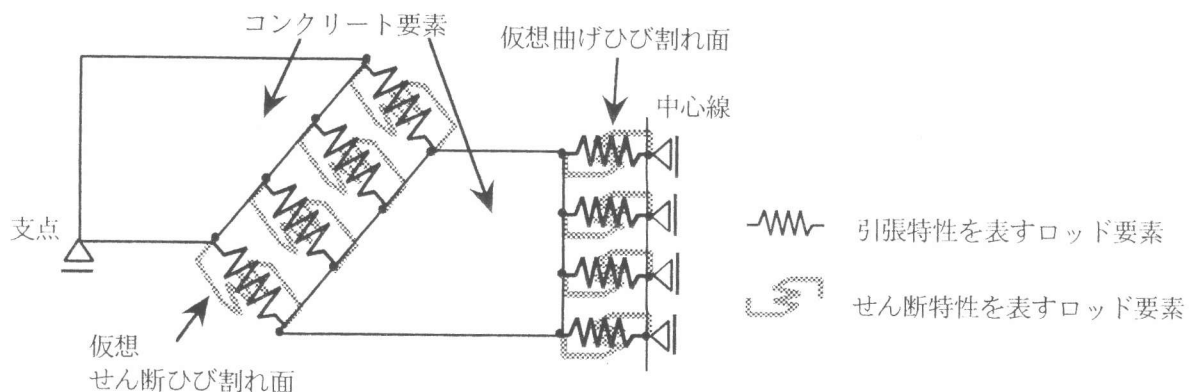


図-1 非線形ロッド要素配置の概念図

2.2 引張軟化挙動およびせん断剛性のモデル化

引張軟化曲線には、一般によく用いられる1/4モデルを用いた。コンクリートの破壊エネルギー G_F は実験的に求めることができ、また、 ε_1 と ε_0 の値は次のように決まる。

$$\varepsilon_1 = 0.75 G_F / (f_t l) \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = 5 G_F / (f_t l) \quad (3)$$

ここで、 f_t はコンクリートの引張強度(MPa)、 l はロッド要素の長さ(m)である。ひび割れ幅 w は、ロッド要素部分でのひずみ ε_f を用いて $w = \varepsilon_f l$ と表せる。解析においては、ロッド要素の長さ l を単位長さ（ここでは1cm）として与え、 ε_1 、 ε_0 を決定した。また、ひび割れ発生以前のロッド要素の弾性係数は

コンクリートの弾性係数 E_c と同一と仮定した。除荷再載荷パスの接線剛性はコンクリートの弾性係数 E_c に一致すると仮定した[4]。

以上をまとめると図-2のような応力-ひずみ関係となる。このような構成則を持つロッド要素を仮想ひび割れ面上の2節点間に垂直に配置することとした。

ひび割れ面でのすべりの破壊力学的特性については現在までのところあまり研究が進んでいない。そこで、簡単のため、図-3に示すようなモール・クーロンの破壊基準を用いることにした。そして、破壊線の内側にある場合には式(5)に示すような剛性 E_G を持つ弾性体であるとした。

$$E_G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

ここで、 E_c はコンクリートの弾性係数、 ν はポアソン比である。同じ点での垂直方向の応力が引張強度に達した場合、せん断抵抗はゼロになるものとした。また、破壊線の外に出た場合には、そこでの垂直方向の応力に対応する破壊線上のせん断抵抗を取るものとした。このようなロッド要素を仮想ひび割れ面に平行に配置した。これはできるだけ簡単なモデル化を行うことを意図したものである。

なお、各ロッド要素の断面積は、それぞれが代表するコンクリートの断面積に等しくしてある。

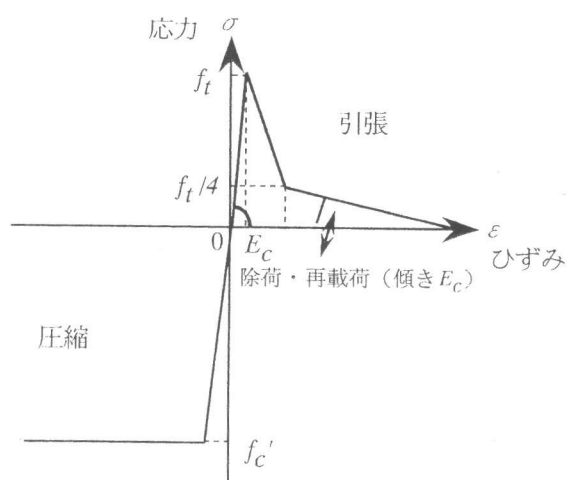


図-2 ひび割れ面に垂直なロッド要素の応力ひずみ関係

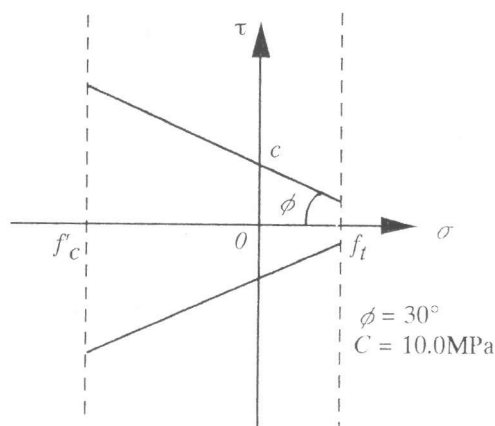


図-3 モールクーロンの破壊線

3. 解析の概要

2点集中荷重または等分布荷重を受けるコンクリートはり計算の対象とした。集中荷重の場合、斜め引張破壊が起こるせん断スパン比 a/d は通常 2.5 から 3.0 以上である。したがって、集中荷重を受けるはりの a/d は 3.0 とした。分布荷重については、Kani の考え方を参考にした井畔らの方法[5]と同様に、載荷スパン L と有効高さ d の比を $L/d = 12.0$ とする。これは、等分布荷重の場合、せん断スパン a をスパン L の $1/4$ と等価であると仮定すれば、 $a/d = 3.0$ に対応する L/d は 12.0 となり、斜め引張破壊が想定できるからである。

供試体はせん断補強されていない単純支持されたはりである。ひび割れは 1 直線形にモデル化した。図-4に解析を行ったコンクリートはりの模式図および各種パラメータを示す。

はりの幅 b は 0.1m と一定にし、軸方向引張応力 σ_N を 0.0、0.5、1.0、2.0、3.0 MPa、また、有効高さを 0.1、0.2、0.4、1.0、2.0 m と変化させ、数値解析を行った。いずれの場合も、横荷重として 2 点集中荷重および等分布荷重の双方について解析している。コンクリートの破壊エネルギー G_d は 100N/m、引張強度 f_t は 3.1MPa、弾性係数 E_c は 3.1×10^4 MPa とした。

せん断ひび割れの発生位置は、載荷状態、はりの支持方法、補強材の付着特性や定着状態、コンクリートの強度などさまざまな条件によって変動するため、このひび割れの位置を解析に先立って適切に定めておく必要がある。そこで、有効高さ0.2mで軸力のない、2点集中荷重または等分布荷重を受ける場合について、それぞれの大きさの軸方向引張力ごとに最小せん断強度を与えるようなせん断ひび割れ位置をあらかじめ決定し、これを終局ひび割れとした。図-4に示すように、ひび割れは1直線形にモデル化しているため、位置の決定に必要なパラメータは、支点から斜めひび割れが鉄筋と交わる場所までの距離 x と斜めひび割れとはりの底面のなす角度 θ となる。斜めひび割れの位置を決定する予備計算の結果、支点から斜めひび割れが鉄筋と交わる場所までの距離 x と有効高さの比 x/d とひび割れの角度 θ は、それぞれ集中荷重の場合、 $\sigma_N=0.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=43^\circ$ 、 $\sigma_N=0.5\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=43^\circ$ 、 $\sigma_N=1.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=43^\circ$ 、 $\sigma_N=2.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=44^\circ$ 、 $\sigma_N=3.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=45^\circ$ 、等分布荷重の場合、 $\sigma_N=0.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.8$ 、 $\theta=35^\circ$ 、 $\sigma_N=0.5\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.8$ 、 $\theta=35^\circ$ 、 $\sigma_N=1.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=35^\circ$ 、 $\sigma_N=2.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.7$ 、 $\theta=36^\circ$ 、 $\sigma_N=3.0\text{MPa}$ のとき、 $x/d=1.4$ 、 $\theta=37^\circ$ となった。軸方向引張力による解析上のひび割れ位置の変化は非常に大きいものではなく、軸方向引張力が大きくなるほどやや支点側に移動し、ひび割れの角度は大きくなる傾向にある。

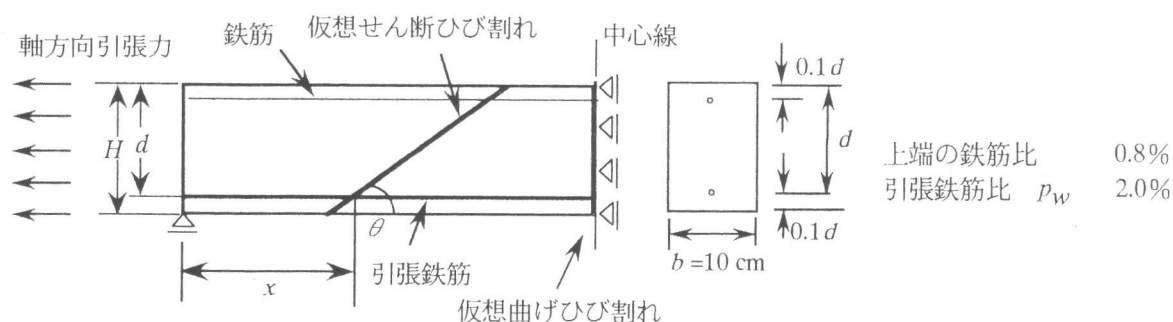


図-4 コンクリートはりの模式図および各種パラメータ

4 解析結果によるせん断強度式の検討

4.1 軸方向引張力の影響

はじめに、解析結果の妥当性を示すために、軸方向引張力がない場合の解析結果と次のせん断強度評価式(5) [6]とを比較した(図-5)。

$$f_v = 0.20(p_w f'_c)^{1/3} d^{-1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) \quad (5)$$

ここで、 P_w は主筋比(%)、 f'_c は圧縮強度(MPa)、 d は有効高さ(m)、 a/d はせん断スパン比である。2点集中荷重および等分布荷重を受けるはりの解析結果は、有効高さが1mを越えるまでは、式(5)とよく一致していると言える。有効高さがそれ以上になった場合には、解析結果では横荷重によらず寸法効果は消失し一定値に収束する傾向にあるのに対し、算定式では有効高さが非常に大きい場合にも寸法効果は存在し続けるため、両者は一致しなくなる。

次に軸方向引張力を受ける場合について、図-6においてデコンプレッションモーメント M_o を用いたパラメータ M_o/M_u を横軸に、 β_n を縦軸に取り、有効高さ0.1mについての解析結果を田村らによる実験式ならびに示方書に規定されている算定式と比較した。田村らによる実験式と比べ、本解析値は低い値をとるが、示方書に規定されている算定式($\beta_n=1+4M_o/M_u$)の値よりは大きく、むしろ縮側の算定

方法 ($\beta_n=1+2M_o/M_u$) に近い解析結果となった。解析結果によれば、示方書に規定されている算定式から得られる β_n は軸方向引張力を受ける場合には安全側となっていることが認められる。図-7には、横軸に軸方向引張応力、縦軸に公称せん断強度をとり、集中および等分布荷重を受けるはりについて解析結果をプロットした。多少のばらつきはあるが、有効高さによって軸方向引張力による影響が著しく異なる様子は見られず、曲線の傾きはどれも類似している。軸方向引張力の大きさによって寸法効果の程度はほとんど変化しないと言ってよい。さらに、軸方向引張力が大きいほどせん断強度は小さくなり、また軸方向引張力が大きいほど曲線の負の傾きがやや大きくなるような解析結果を得た。

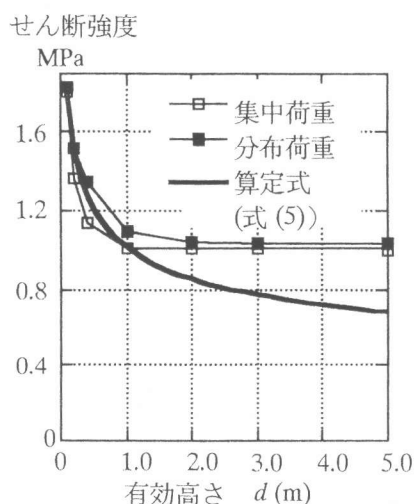


図-5 寸法効果解析結果

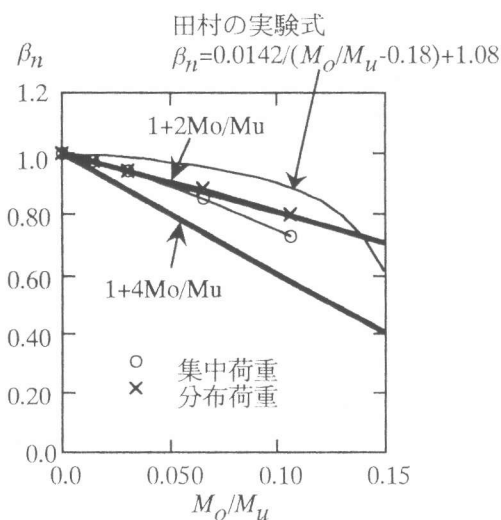
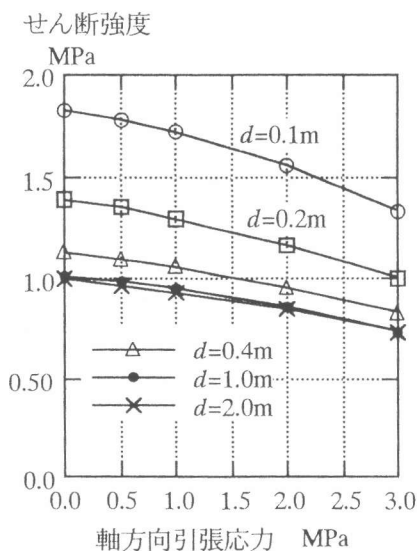
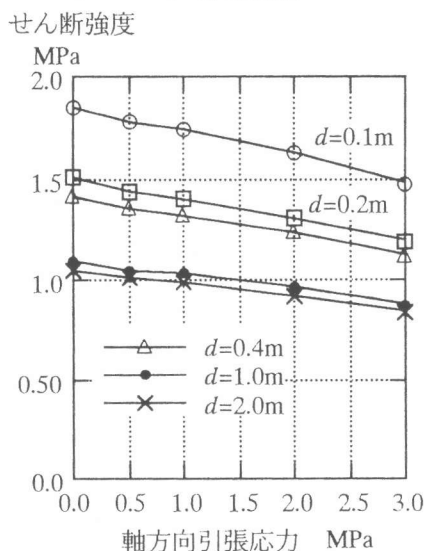


図-6 示方書の算定式、実験式と解析結果 ($d=0.1\text{m}$) との比較



(a)集中荷重を受けるはり



(b)分布荷重を受けるはり

図-7 軸方向引張力とせん断強度の関係

4.2 軸方向引張力を受けるはりの破壊特性

集中荷重および等分布荷重を受ける有効高さが 0.1m のはりについて、作用せん断力と仮想せん断ひび割れ面上ではりの底面から有効高さの $3/10$ 程度の高さに垂直に配置されたロッド要素のひずみの関係を図-8に示した。これは作用せん断応力とせん断ひび割れの開き具合の関係と同じであると考えることができる。

図-8によれば、軸方向引張応力の増加とともにひび割れが開き始める荷重（ひび割れ発生荷重）は

低下していくことが確認される。これは軸方向引張力がはりに働くと、はりの中立軸が上部へ移動することから容易に理解できる。解析では終局時のひずみは軸方向引張力によって変化するが、破壊直前のせん断力に対するひずみの増分が大きいいため、終局荷重の違いとしては現れていない。また、ひび割れの発生荷重が異なってもひび割れが開き始めた後の曲線の傾きは、どれもほぼ平行であると言える。つまり、作用せん断力の増分に対するひび割れ幅の増分は、軸方向引張力によらずほぼ同じであるということが示された。

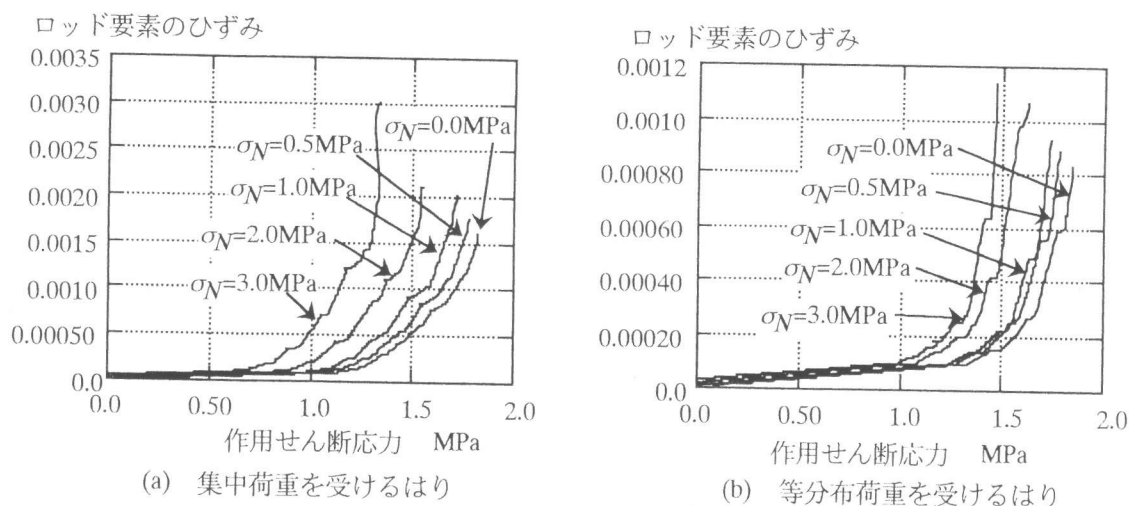


図-8 作用せん断力とせん断ひび割れ面の非線形ロッド要素のひずみの関係 ($d=0.1m$)

5 結論

本研究の結果、次の結論を得た。

- 1) 破壊力学に基づいたモデルを用いて集中荷重を受けるはり、等分布荷重を受けるはり共に、せん断強度の寸法効果解析を行った。その結果、寸法の小さい範囲では、既往のせん断強度算定式とよく一致する解を得た。
- 2) 軸方向引張力を受けるはりについての田村らによる実験式ならびに示方書に規定されている算定式と本解析結果を比較した。田村らによる実験式と比べ、解析値は低い値をとるが、示方書算定式による値よりは大きくなった。示方書の算定式は安全側の近似と言える。なお、有効高さによって軸方向引張力の影響はあまりかわらない。
- 3) 軸方向引張力を受けるはりは、軸方向引張力のない場合に比べて、せん断ひび割れ発生荷重および終局強度は低い値を取り、また、作用せん断力の増分に対するひび割れ幅の増分は、軸方向引張力によらずほぼ同じであるということが解析的に示された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書改訂資料、コンクリート・ライブラリー、第61号、1986、pp.163-166
- 2) 田村隆弘、重松恒美、原 隆、中野修治：軸方向引張り力を受けるRC梁のせん断耐荷力に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.22 No.2、pp. 153 -160、1994.4
- 3) 二羽淳一郎、Nasra ZAREEN、田邊忠顕：破壊力学に基づくコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析、土木学会論文集、No. 508 / V-26、pp.45 - 53、1995. 2
- 4) Rots, J.G : Computational Case Studies of Size Shape and Boundary Effect in Concrete Structures, E & FN SPON, pp. 335-350, 1994
- 5) 井畔瑞人、塩屋俊幸、野尻陽一、秋山 暉：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文集、No.348/V-1、1984.8
- 6) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村 甫：せん断補強を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集 No. 372 / V-5、pp. 167-176、1986.8
- 7) 平井友紀、二羽淳一郎、田邊忠顕：軸方向引張力を受けるコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析、コンクリート工学年次論文報告集、第17巻、第2号、1995、pp.797-802