

論文 斜張力が支配的な RC 梁の剪断応力伝達に関する有限要素解析

後藤康明<sup>\*1</sup> ・ 城 攻<sup>\*2</sup>

**要旨:**斜張力が支配的な場での剪断伝達機構の解明を目的として、過去に行った RC 梁の加力実験を対象に、2次元非線形有限要素解析を行った。その結果、引張力で剪断力が入力される場合でも剪断スパンの対角線上にコンクリート圧縮束が形成されることがわかった。また、従来の剪断加力方式である圧縮力で入力される場合に比べ、剪断補強筋の負担割合が増加すること、引張加力の場合に剪断補強筋量を増大しても、補強筋の負担割合は増大するが、耐力は比例的に増大しないことがわかった。

**キーワード:** RC 梁, 斜張力, 剪断伝達機構, 有限要素解析, 剪断補強筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断抵抗について、既往の研究では終局時までには部材加力面内の対角線上に圧縮応力場が形成される場合を対象とする実験的研究と理論的解析が行われて、亀裂または終局耐力の評価法が提案されてきた。これに対し、例えば地震荷重時に高層建物の外端の杭に引き抜けが生じ、その直上の柱の引張力を隣接する杭が負担しなければならない場合などには、その間にある基礎梁においては対角線上の斜張力が支配的な場で剪断力が伝達されることになる(図1)。このような斜張力が支配的となる RC 部材の剪断抵抗機構の解明を目的として、著者らは6シリーズ合計37体の試験体を用いて実験的に検討を行い文献1)~3)で発表した。

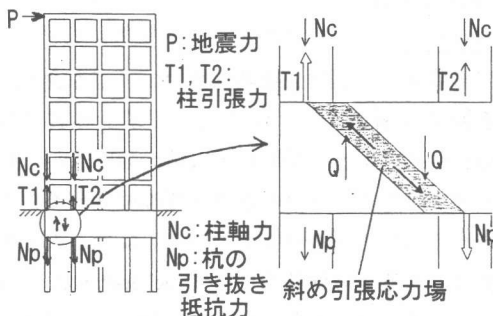


図1 想定する応力状態

本研究は上述の実験を対象として非線形2次元要素解析を行い、実験結果との比較及び剪断応力の伝達機構について、解析的に検討を行うものである。本論文では、解析モデルの構築と剪断入力(加力)形式および剪断補強筋量の違いによる影響について考察を行う。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

試験体は高層建築物の基礎梁を対象としたもので、実大の約1/10の大きさである。基本的な試験体の概要を図2に示す。加力方法は単純支持梁2点集中加力形式で、引張力により剪断力を導入するために、杭または柱位置に細径の高強度鉄筋を15本埋め込み、その端部に加力用鋼

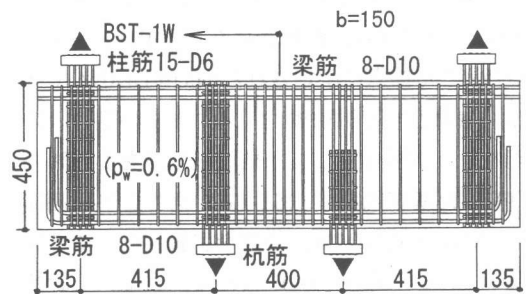


図2 試験体概要(基準試験体 BST-1W)

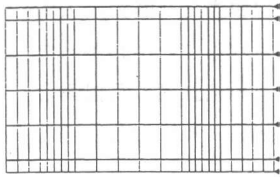
\*1 北海道大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*2 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

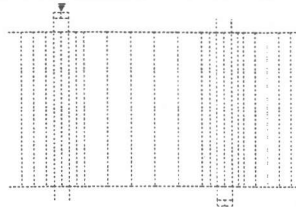
表1 試験体諸元および材料性状

試験体名	実験変数	$\sigma_B$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$\sigma_t$ (MPa)
BST-1W	基準(TT加力)	30.4	22.2	3.22
BST-2W	CC加力	32.1	22.3	2.70
BST-2E	TC加力			
BST-7	$p_w$ 2倍	32.8	21.6	2.52
BST-15	$p_w$ 3倍	22.1	20.5	2.28

	梁主筋		柱杭主筋	
	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )
引張筋	715	4840	1010	6490
圧縮筋	360	2540	838	5010
BST-15のみ				
引張筋	705	3780	928	4850
圧縮筋	457	4830		



(a) コンクリート要素



(b) 鉄筋・鉄板要素

図3 解析モデル (基本試験体: BST-1W)

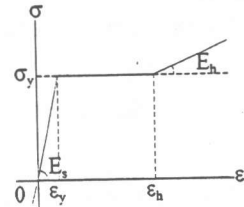


図6 鉄筋の $\sigma - \epsilon$ 関係

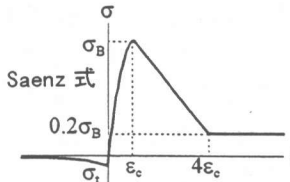


図4 コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係

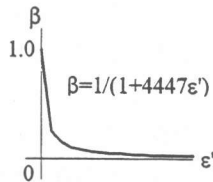


図5 ひび割れ面での剪断応力伝達

板を溶接して、この鋼板を試験体の外側に引き抜くことで、付着力によってコンクリートに引張力を導入した。この細径の鉄筋を本論文では、杭筋、柱筋と表現する。本論文で解析の対象とした試験体の試験体諸元を表1に示す。

## 2.2 解析モデルの構築

本解析で用いた解析プログラムはオランダのTNOで開発された汎用プログラムDIANAの節点数が300節点に限定されたMicro-DIANAである。対象とする試験体は、加力方法の違いの検討を行う試験体として、杭筋と柱筋を引張加力(TT)した基準試験体BST-1W、両方とも圧縮加力(CC)したBST-2W、柱筋を引張り杭位置で圧縮加力(TC)したBST-2Eである。また、剪断補強筋量の違いを検討するものとして、剪断補強筋比が基準試験体の2倍であるBST-7W ( $p_w = 1.2\%$ )と同3倍のBST-15E7W ( $p_w = 1.8\%$ )である。基準試験体BST-1Wの解析モデルを図3に示す。

解析プログラムで使用できる節点数が限られていることから予備解析を行い、試験体のモデル化の際に解析結果に重大な影響を与えない範囲で下記のような簡素化を図った。

- ・対称加力なので試験体半分をモデル化した
- ・コンクリート要素の大きさの影響を検討し、破壊力学の概念を導入して寸法依存性を避け、大きな要素を用いて要素数を減らした
- ・杭筋・柱筋は3本x5段(15本)に配されていたが、鉄筋要素2本に集約し実験と同様に加力用鋼板の要素を取り付けた
- ・杭、柱、梁筋は完全付着とし、付着要素を用いない

## 2.3 材料のモデル化

解析に必要な材料の定数は、実験時の材料試験結果から求めた。

コンクリート: 4節点アイソパラメトリック四辺形平面応力2次元要素を用いた。応力度-歪度関係は図4に示すように、圧縮上昇域にはSaenz式を用い、歪軟化域は最大強度点から最大強度時歪度の4倍の歪度と圧縮強度の0.2倍で与えられる点を直線で結び、以降はこの一定強度となる。破壊基準にはDrucker-Pragerの基準を適用した。また、分布ひび割れには多方向固定ひび割れモデルを用い、引張軟化にはHordijkらが提案した曲線モデルを用いて表現

し、ひび割れ面の剪断応力伝達は図5のように伝達係数 $\beta$ を亀裂歪度 $\varepsilon'$ の関数で表現した<sup>4)</sup>。  
鉄筋：杭・柱筋、梁筋および剪断補強筋ともに2節点1次元要素を用いた。各鉄筋とも応力度-歪度関係は材料試験結果を基に tri-linear モデルで表現した(図6)。降伏条件は von Mises の降伏条件を適用した。

付着：本解析では節点数の制限から、付着要素を用いていない。従って、柱筋・杭筋および梁筋はコンクリート要素の節点を共有させて完全付着とし、剪断補強筋では丸鋼を用いていることから、要素両端の節点を上下の梁筋節点に接合するのみで、完全に無付着とした。

### 2.4 加力方法

解析で引張加力する場合には、実験と同様に柱筋に接合した鋼板要素(ソリッド)中央の節点を鉛直方向に支持し、杭筋の対応する節点の鉛直方向変位を増大した。圧縮加力する場合には加力点位置に鋼板要素を配し、その位置で支持あるいは鉛直方向変位を増大した。この際、鋼板要素とコンクリート要素は節点を別々に設け、コンクリートの挙動を拘束していない。

## 3. 解析結果

### 3.1 引張-引張加力(TT)試験体：BST-1W

杭筋・柱筋を引張加力した試験体の解析結果を実験値とともに図7(a)に示す。荷重変形関係図の荷重は梁剪断力、変形は実験時のたわみと対応する、支点位置梁せい中央に対するスパン中央の鉛直方向の変位である。実験値との比較をするために対応する実験値をカッコ内に示す。

梁剪断力が62.2(78.4)kN時に、試験部分の杭主筋加力点近くから斜め亀裂が発生し荷重変形関係に大きな剛性低下が生じた(図中のA)。90.9(113)kN時に剪断補強筋が降伏し始め、251(250)kN時に試験部中央の剪断補強筋が降伏を始めるころ(C)には試験部中央の要素に新しい亀裂はほとんど発生しなかった。300kN時に剪断補強筋が全て降伏した(D)。その後大きな剛性低下が生じ、剪断力は徐々に増大するが、

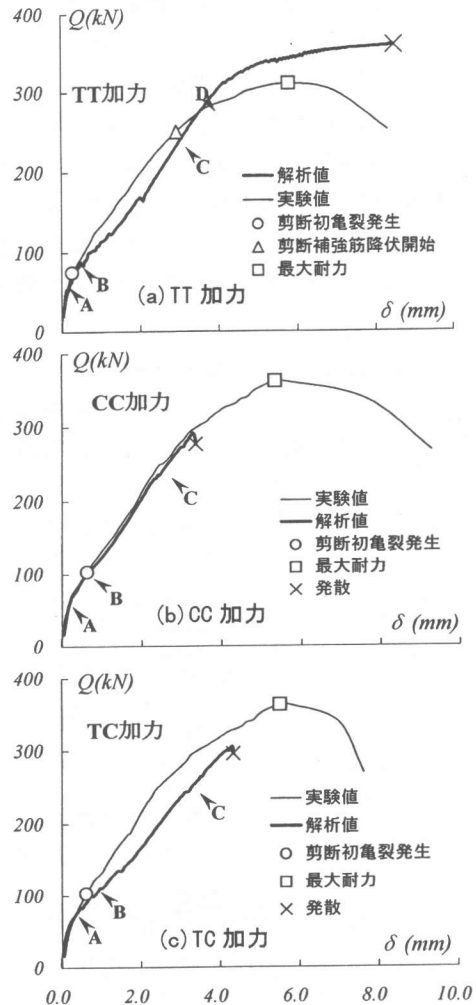


図7 荷重-変形関係

360kNで発散した(最大耐力実験値311kN)。

### 3.2 圧縮-圧縮加力(CC)試験体：BST-2W

剪断力を圧縮力で導入した場合の解析結果(荷重変形関係)を図7(b)に示す。試験体下部に若干傾きを有する亀裂が67.3(102)kN時に発生したのでこれを剪断初亀裂とする(図中A)。103kN(B)で剪断スパン中央の剪断補強筋に引張応力が生じ、253(237)kN時に試験部分の剪断補強筋が降伏をし始めるころには試験部の中心部分の亀裂歪度が最も大きくなっていった。289(363)kNで剪断力が最大値となるが、その後277.8kNに低下したところで解析は発散した。

### 3.3 圧縮－引張加力(TC)試験体： BST-2E

柱筋を支持して杭位置の上面で圧縮加力した場合の解析結果（荷重変形関係）を図7(c)に示す。荷重 81.3 (102)kN 時に試験部分杭位置下部に斜め亀裂が発生した。109kN で試験部分の中央の剪断補強筋に引張力が生じ、258(249)kN では補強筋が降伏した。その後、亀裂の発生はさほどなく 295kN 時に解析が発散した（最大耐力実験値 363kN）。

### 3.4 解析結果の比較（加力方法の違い）

加力形式の違いの影響を項目毎に比較検討する。全試験体で最終的に解析が発散し、圧縮試験体では最大耐力実験値まで追跡できなかったため、補強筋降伏時までについて考察を行う。

### (1)コンクリート主圧縮応力度( $\sigma_2$ )図

図8に亀裂発生時、補強筋降伏開始時のコンクリート主圧縮応力度図を示す。TT 加力試験体(a 図)では、剪断初亀裂発生時には曲げ圧縮域となる梁上側で応力度が大きいが、全体にわたって均一な応力場が形成されている。剪断補強筋が全て降伏する頃には、試験部分中央の対角線近傍に大きな圧縮応力が発生していることから、引張－引張加力の場合でも圧縮束が形成されると考えられる。実験では対角線終点のコンクリートが圧壊して耐力に至ったが、解析では見られなかったため、亀裂発生に伴うコンクリート圧縮特性の低減を考慮すべきである。CC 加力試験体(b 図)では、加力初期の段階は加力点と拘

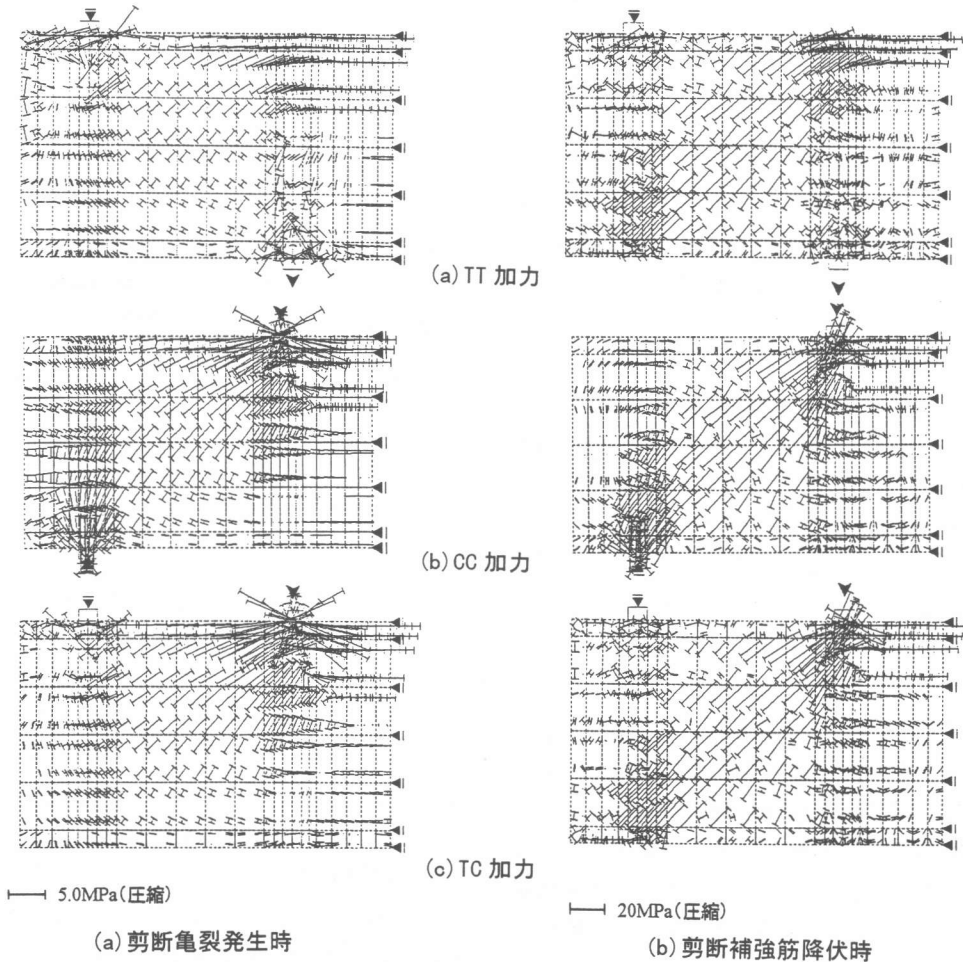


図8 主応力度( $\sigma_2$ )図

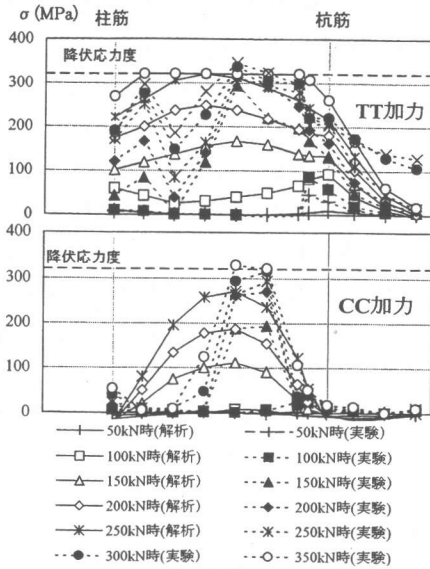


図9 剪断補強筋応力度分布

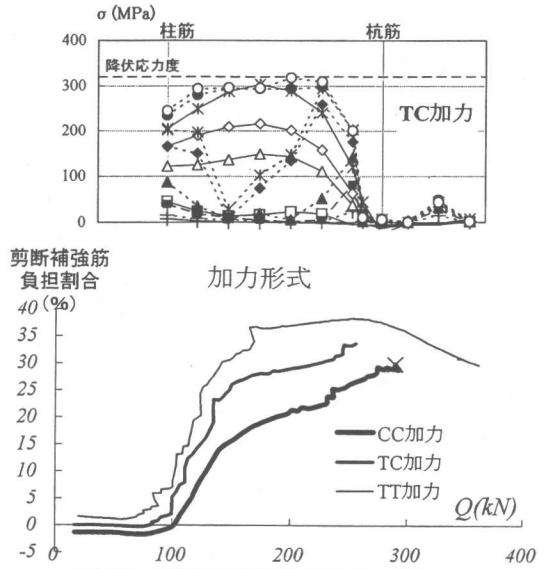


図10 剪断補強筋負担割合の推移

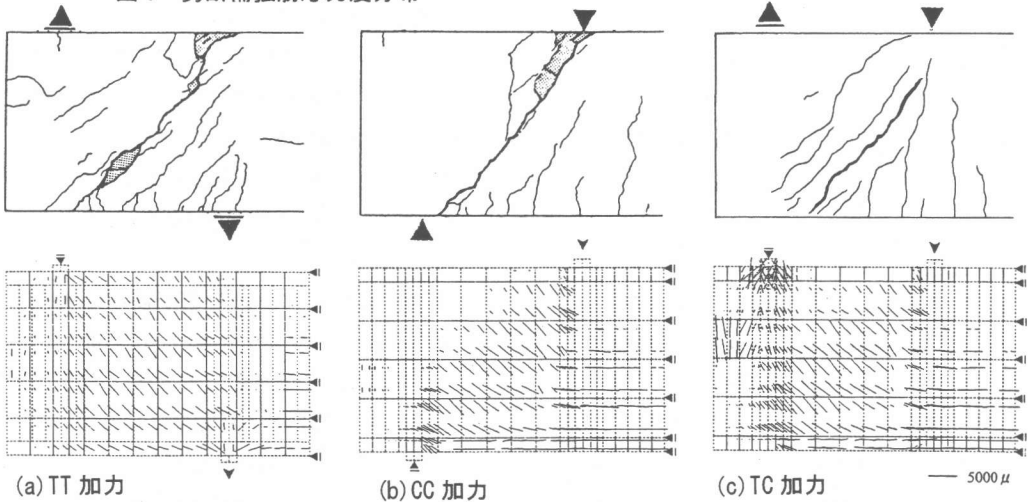


図11 最終破壊状況および亀裂歪度(補強筋降伏時)

束点を結ぶ点で、主応力方向が上に凸となる弧を描いているが、剪断力の増大に伴って次第にその2点間を結ぶ直線と平行となる分布を示し、対角線上の狭い範囲で応力度が大きくなった。TC加力試験体(c図)では、剪断初亀裂時は剪断スパン中央を境界としてTT、CC両者を合成した状況であったが、補強筋降伏時にはCC試験体とほぼ同じ分布形状になった。

(2)剪断補強筋応力度

図9に剪断補強筋応力度分布(付着が無いので

要素内で均一)を示す。また、梁剪断力に対する試験部分にある剪断補強筋力合計値の比を剪断補強筋負担割合とし、図10に示す。応力度分布では、解析の方が補強筋に応力が発生する時の荷重レベルが小さいこと、実験値は亀裂の発生状況によって大小の差が出ていること等の違いがあるが、全体的に良い対応を示している。

(3)亀裂歪度図

図11に亀裂歪度図を示す。亀裂歪度は引張強度時引張歪度を越える歪度値で、その数値が大

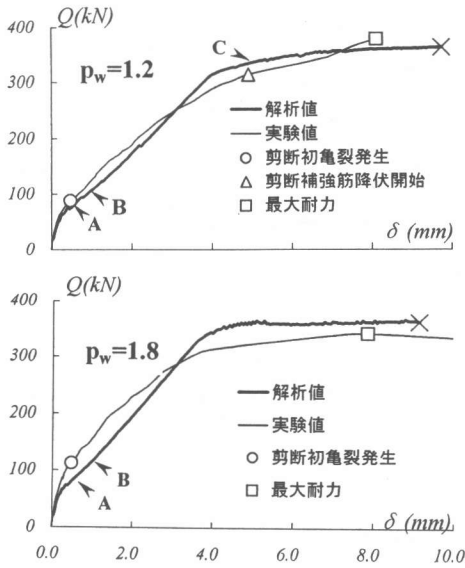


図 12 荷重変形関係(剪断補強筋量)

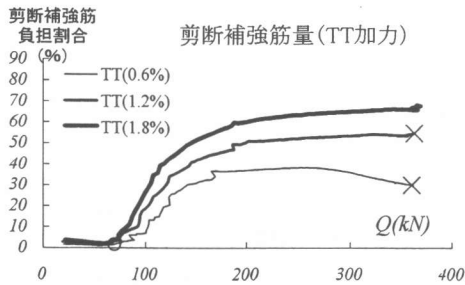


図 13 剪断補強筋負担割合の推移 (剪断補強筋量)

きいほど亀裂幅が大きいことに対応する。また、その角度に直交する向きがひび割れ角度となる。TT 試験体では試験部分全体にわたり約 45° の斜め亀裂が発生している。これに対し CC 試験体では、水平となす角度が大きい亀裂が対角線上に集中して発生した。また、TC 試験体では杭側では角度の大きい亀裂が、柱側では 45° 程度の亀裂が発生している。実験時の最終亀裂図との比較でもこれらの特徴が良く対応している。

### 3.5 剪断補強筋量の影響

剪断補強筋量が 1.2%、1.8%である試験体(TT 加力)の解析結果を図 12 に示す。実験では剪断補強筋量は補強筋間隔を変化させていたが、解析モデルでは要素の数を変更せずに、補強筋要

素(線材要素)断面積を変化させて量を整合した。

両解析結果とも荷重変形関係は実験結果と良い対応を示し、剪断補強筋量が増えても耐力が比例して上昇しないことも一致している。

剪断補強筋負担割合を図 13 に示す。亀裂発生以降、同じ剪断力の時に剪断補強筋が負担する割合が剪断補強筋量に応じて増大している。このことは、剪断補強筋量が増えることによってトラス機構で伝達される剪断力の割合が増えるが、逆にアーチ機構の成分が減少して、全体の量としてはそれ程上昇しないことがわかる。

### 4. まとめ

斜張力が支配的となる RC 梁における剪断伝達機構を 2 次元有限要素解析により検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) プログラムで使用できる節点数が限定されていても、解析モデルの作成の工夫により実験結果を再現できた。
- 2) 剪断力を引張力で導入(TT 加力)した場合でも、剪断スパンの対角線上にコンクリート圧縮束が形成される。
- 3) 補強筋降伏時における剪断補強筋負担剪断力の割合は、TT 加力の場合約 38%、TC 加力で約 32%、CC 加力で約 27%となり、引張力の割合が増えるほど大きくなった。
- 4) TT 加力で剪断補強筋を増やしても、耐力の増大は比例しないが、剪断補強筋が負担する割合は量に応じて増大した。

### 参考文献

- 1) 柴田拓二, 後藤康明, 城 攻: 斜張力場における RC 梁の剪断抵抗性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.515-520, 1994
- 2) 柴田拓二, 後藤康明, 城 攻, 佐藤武: 斜張力が支配的となる鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.659-664, 1996
- 3) 柴田拓二, 後藤康明, 城 攻, 横山和明: 斜張力が支配的な RC 梁の剪断抵抗性状に対するダボ作用の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.741-746, 1997
- 4) DIANA Users Manual, 1998

【謝辞】本研究は北海学園大学小山大輔君の協力を得た。記して謝意を表す。