

論文 鋼・コンクリート界面の側圧依存型せん断伝達挙動に基づく変形解析

笠井 裕次*1・河村 哲男*2・大下 英吉*3

要旨：本研究では、合成構造物に適用可能な変位の連続性および不連続性を統一的に評価可能なモデルの構築を行った。合成構造物のモデル化においては、実現象を評価しうるようにコンクリートを立体要素、鋼部材をアイソパラメトリックシェル要素とし、その接合部にはLagrangeの未定乗数法を用いた結合要素と側圧に依存するスタッド付き鋼とコンクリート界面のせん断挙動を評価したモデル式を含むジョイント要素を組み合わせることで変位の連続性と側圧作用下における変位の不連続性を考慮したモデルである。そして、実験結果との対比により、構築したモデルの適用性評価を実施した。

キーワード：合成構造，側圧，ジョイント要素，スタッド合成梁

1. はじめに

構造物の用途は多種多様に渡っているが、特にスタッドは、合成構造物において標準的な鋼とコンクリートの合成化を図る方法であり、鋼とコンクリートの合成効果を支配する重要な接合構造である。この種の合成構造物は、スタッド付き鋼とコンクリートとが一体となって変形を生じる事に利点があるが、スタッド付き鋼とコンクリートという異なる材料が接合されたものであるため、それらの界面においてずれあるいは開きという挙動は避けられない構造である。しかしながら、これらの研究は、そのほとんどが実験的研究に留まり、応力特性を詳細に評価できる提案式、あるいは解析モデルの提案もなされていないのが現状である。そこで町田¹⁾らは、せん断力と相対ずれ関係に関する解析的研究を行っている。その中で、スタッドは棒要素、棒要素を構成する節点にはコンクリートの反力を定量的に評価するバネを導入し、実験結果に比較的良好的な一致を得ている。しかしながら、スタッドのずれ挙動のみの評価に留まり、付着特性を詳細に解明するためには、これに併せて

スタッドの引き抜きあるいは押し抜き挙動である軸力、せん断力と開き関係を欠くことはできない。さらに、実構造物においては、スタッドとそれを取り巻くコンクリートには曲げなどの影響により、スタッド軸方向に圧縮力あるいは引張力が作用した状態であるため、それらの影響も考慮した多軸応力下での付着特性の評価が重要となる。

そこで本研究では、コンクリート部材を立体要素、鋼部材をシェル要素とし、その界面はLagrangeの未定乗数法を用いた結合要素とジョイント要素を組み合わせ、変位の連続性とずれを考慮した異自由度要素間結合に関するモデル化を行った。なお、ジョイント要素には、著者らが実施した押し抜き試験、側圧制御式押し抜き試験により構築された、側圧に依存するスタッド付き鋼とコンクリート界面のせん断挙動を評価したモデル式を挿入した。このモデル式を挿入することにより、スタッド付き鋼とコンクリートを組み合わせた合成構造物に関して、実験結果と解析結果の対比により本モデルの妥当性評価を実施した。

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 (株)ピー・エス 技術研究所所長 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

2. 鋼・コンクリート界面の変位特性に関するモデル化

本研究では、鋼部材には8節点アイソパラメトリックシェル要素を用い、弾完全塑性体を仮定した。また、コンクリート部材には20節点6面体要素、2パラメータタイプのDrucker-Pragerの降伏曲面により、ひずみ硬化とひずみ軟化を評価可能な弾塑性モデルを仮定した。そして、シェル要素と立体要素の界面には、Lagrangeの未定乗数法を用いた結合要素とGoodmanのジョイント要素を混用させることにより変位の連続性と不連続性（ずれや開き）を考慮したモデル化を行った。なお、ジョイント要素には、側圧に依存するスタッド付き鋼とコンクリート界面のせん断挙動を評価したモデル式を挿入することによって、コンクリートの曲げ変形に伴う、スタッド軸方向に作用する圧縮の側圧の影響およびスタッドの剛性を評価しうる解析モデルとした。

2.1 変位の連続性を表現する接合要素

Lagrangeの未定乗数法による結合要素は、図-1に示すように、立体要素側およびシェル要素側の表面において変位の連続性を停留条件として与えたものである。結合要素は、立体要素表面およびシェル要素表面の変位成分を有する仮定の節点から構成された、体積の無い要素である。この要素は、実際には3次元でモデル化が行われているが、ここでは簡単のために平面図で表している。

仮想仕事式は、次式のようになる。

$$\sum_{\alpha=1}^2 \left[\int_{(a)} \Delta \sigma_{ij}^{(\alpha)} \delta(\Delta \varepsilon_{ij}^{(\alpha)}) dV - \int_{(a)} \Delta \bar{F}_i^{(\alpha)} \delta(\Delta u_i^{(\alpha)}) dV \right. \\ \left. - \int_{(a)} \Delta \bar{T}_i^{(\alpha)} \delta(\Delta u_i^{(\alpha)}) dS \right] - \delta \int_{(1,2)} \Delta \lambda_i' (\Delta u_i^{(1)} - \Delta u_i^{(2)}) dS = 0 \quad (1)$$

ここで、 α は要素タイプを表わしており、 $\alpha=1$ はシェル要素、 $\alpha=2$ は立体要素を表している。また、 $\Delta u_i^{(1)}$ 、 $\Delta u_i^{(2)}$ は、それぞれ表面におけるシェル要素側および立体要素側の局所座標系における節点変位増分ベクトルである。また、 $\Delta \lambda_i'$

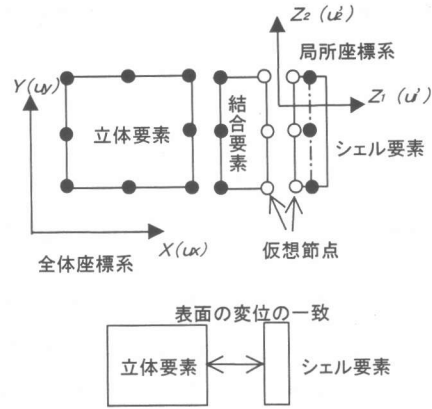


図-1 変位の連続性を表現する接合要素

はLagrangeの未定乗数である。なお、左辺第4項が結合要素に関する項である。そして、Lagrangeの未定乗数 $\Delta \lambda_i'$ は、次式のように表される。

$$\Delta \lambda_i' = \Omega \Delta r_i' \quad (2)$$

ここで、 Ω および $\Delta r_i'$ は、それぞれLagrange乗数の補間マトリックスおよび結合要素上における力を表す列ベクトルである。

このように、Lagrangeの未定乗数 $\Delta \lambda_i'$ は結合要素に関して付加された力のベクトル $\Delta r_i'$ によって補間される。そして、Lagrangeの未定乗数法を用いた平衡方程式は、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} K^{(1)} & 0 & \hat{K}^c(1) \\ & K^{(2)} & \hat{K}^c(2) \\ sym. & & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta q^{(1)} \\ \Delta q^{(2)} \\ \Delta r' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F^{(1)} \\ \Delta F^{(2)} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $K^{(1)}$ 、 $K^{(2)}$ はそれぞれシェル要素および立体要素の剛性マトリックス、 $\Delta q^{(1)}$ 、 $\Delta q^{(2)}$ はそれぞれ全体座標系におけるシェル要素の節点変位、回転角ベクトルおよび立体要素の節点変位ベクトル、そして、 $\Delta F^{(1)}$ 、 $\Delta F^{(2)}$ はそれぞれシェル要素および立体要素の節点における外力ベクトルである。

2.2 変位の不連続性を表現する接合要素

Goodmanのジョイント要素は、図-2に示すように、立体要素側およびシェル要素側の表面において変位の不連続性を停留条件として与えたものである。したがって、ジョイント要素は、

結合要素と同様な仮想的な要素である。

仮想仕事式は、次式のようになる。

$$\sum_{\alpha=1}^2 \left[\int_{V(\alpha)} \Delta \alpha_{ij}^{(\alpha)} \delta(\Delta \epsilon_{ij}^{(\alpha)}) dV - \int_{S(\alpha)} \Delta T_i^{(\alpha)} \delta(\Delta u_i^{(\alpha)}) dS \right] - \int_{S(\alpha)} \Delta T_i^{(\alpha)} \delta(\Delta u_i^{(\alpha)}) dS - \delta \int_{S(1,2)} \frac{1}{2} \Delta T_i' (\Delta u_i^{(1)} - \Delta u_i^{(2)}) dS = 0 \quad (4)$$

ここで、 α は要素タイプを表わしており、 $\alpha=1$ はシェル要素、 $\alpha=2$ は立体要素を表している。また、 $\Delta u_i^{(1)}, \Delta u_i^{(2)}$ は、それぞれ表面におけるシェル要素側および立体要素側の局所座標系における節点変位増分ベクトルである。また、 $\Delta T_i'$ はジョイント要素の単位体積当たりの作用力ベクトルであり、単位面積当たりのジョイント剛性 K により次式で表わすことができる。

$$\Delta T_i' = K(\Delta u_i^{(1)} - \Delta u_i^{(2)}) \quad (5)$$

ここで、ジョイント剛性 K は 3 次元空間においては、次式のマトリックスとなる。

$$K = \begin{bmatrix} k_{z1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{z2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{z3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 k_{z1}, k_{z2}, k_{z3} は、局所座標系における各軸方向の剛性である。この各軸方向の剛性 k_i の値を大きくすることにより、剛な結合となり要素間のずれは小さくなる。逆に、 k_i の値を小さくすることにより柔な結合となり、要素間のずれは大きくなる。そして、式(4)中における左辺第 4 項がジョイント要素に関する項である。

このようにして、ジョイント要素を用いた平衡方程式は、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} K^{(1)} + \hat{K}^{j(11)} & -\hat{K}^{j(12)} \\ \text{sym.} & K^{(2)} + \hat{K}^{j(22)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta q^{(1)} \\ \Delta q^{(2)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F^{(1)} \\ \Delta F^{(2)} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $K^{(1)}, K^{(2)}$ はそれぞれシェル要素および立体要素の剛性マトリックス、 $\Delta q^{(1)}, \Delta q^{(2)}$ はそれぞれ全体座標系におけるシェル要素の節点変位、回転角ベクトルおよび立体要素の節点変位ベクトル、そして、 $\Delta F^{(1)}, \Delta F^{(2)}$ はそれぞれシェル要素および立体要素の節点における外力ベク

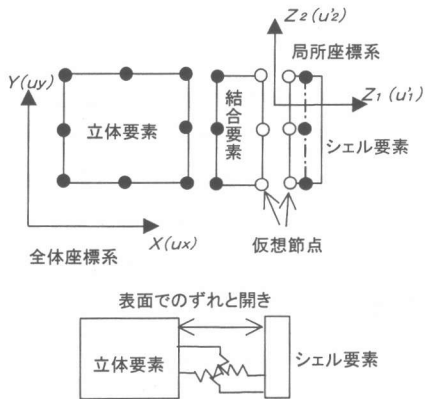


図-2 変位の不連続性を表現する接合要素

トルである。

2.3 鋼・コンクリート合成構造物の変形挙動に関する支配方程式

ここで Lagrange の未定乗数法を用いた結合要素とジョイント要素を平衡方程式とを組み合わせることにより、任意方向に変位の連続性および不連続性を統一的に評価できる鋼とコンクリートの合成構造物の変形挙動に関する支配方程式が、次式のように求まるわけである。

$$\begin{bmatrix} K^{(1)} + \hat{K}^{(11)} & -\hat{K}^{(12)} & \hat{K}^{c(1)} \\ & K^{(2)} + \hat{K}^{(22)} & \hat{K}^{c(2)} \\ \text{sym} & & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta q^{(1)} \\ \Delta q^{(2)} \\ \Delta r' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F^{(1)} \\ \Delta F^{(2)} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

このように、節点変位ベクトルおよび接合部の力のベクトルを未知数とし、境界条件および変位の連続性および不連続性を与える方向を入力するのみで、合成構造物の変形挙動が自動的に求まるわけである。

2.4 ジョイント要素におけるモデル式の挿入

側圧制御式押し抜き試験²⁾より、著者らによって提案された、側圧に依存するスタッド付き鋼とコンクリート界面のせん断挙動を評価したモデル式を以下に示す。

$$\tau = \left\{ -9 \times 10^{-6} H + 0.0062 \right\} \ln(S) + 0.0038 n_p + 0.0519 \left\} f_c' \quad (9)$$

ここで、 τ は、せん断応力(N/mm²)、 f_c' はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 H はスタッド高(mm)、 S は相対ずれ(mm)、 n_p は側圧(%)を表し

ている。なお、 n_p はコンクリート強度の百分率の直応力です。

式(9)をジョイント要素に挿入することによって、スタッド軸方向に作用する圧縮の側圧の影響およびスタッドの剛性を評価可能となる。ここで、せん断応力成分を、鋼コンクリート界面にずれが生じる方向に次式の不平衡力式の内部応力に挿入する。

$$\{F\} - \int_V [B]^T \{\sigma\} dV = 0 \quad (10)$$

ここで、 F は、 σ による内力に等価な節点カベクトルである。

3. 側圧制御式押し抜き試験に対する解析的評価

本章では、著者らによって行われた押し抜き試験、側圧制御式押し抜き試験の実験結果に対して、構築した解析モデルの適用性評価を行う。

3.1 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は、押し抜き試験法の標準的な供試体を変更したものを採用した。なお、表-1に供試体の材料特性を、図-3に名称書式も合わせて示す。

スタッドの寸法は、径が $d=16(\text{mm})$ 、高さが $H=80,100,120(\text{mm})$ であり、規格は JIS B 1198 に準ずる。コンクリートスラブには、側圧による圧壊を防ぐため鉄筋網が配置されている。

(2) 静的載荷実験

せん断実験は、100 t アムスラー型試験機を用いて、せん断荷重を静的速度 $0.5\text{mm}/\text{min}$ で載荷した。側圧の載荷方法は、供試体の外側に配置した直応力載荷治具に油圧ジャッキを介することにより、所定の圧縮力(側圧)が保持された。

3.2 押し抜き試験に対する適用性評価

解析モデルは図-4に示すように、鋼コンクリート接面以外のスラブ部分およびウェブ部分を省略し、対称性により 1/2 部分のモデルを用いた。なお、境界条件は、図-5に示すように鋼コンクリート界面には圧縮の側圧により開き

表-1 供試体一覧

供試体名	H (mm)	n_p (%)	f'_c (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	側圧 (N/mm ²)
H80-0	80	0	22.9	23.4	0
H100-0	100		26.8	26.0	
H120-0	120		26.8	26.0	
H80-C10	80	10	24.9	26.4	2.49
H100-C10	100		24.5	25.4	2.45
H120-C10	120		24.5	25.4	2.45
H80-C25	80	25	29.2	31.2	7.3
H100-C25	100		27.8	24.7	6.95
H120-C25	120		27.8	24.7	6.95
H80-C35	80	35	25.1	26.8	8.785
H100-C35	100		25.1	26.8	8.785
H120-C35	120		24.9	26.4	8.715

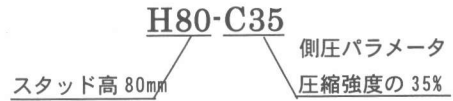


図-3 供試体の名称書式

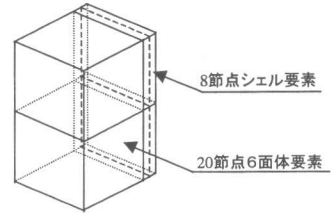


図-4 押し抜き試験体の要素分割図

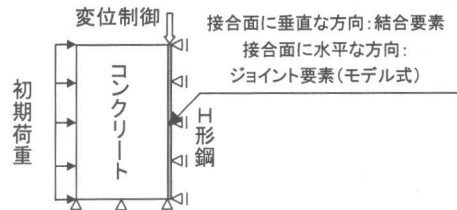


図-5 境界条件および載荷方向

が生じないものと想定し、ずれの生じる方向にはジョイント要素とし、本モデル式を導入した。

解析結果における適用性評価は、実験結果におけるスタッド高による違いが見られなかったため、スタッド高 100mm についてのみ行った。これは、式(9)におけるスタッド高に関する係数が極微小であることから確認される。

図-6に実験より得られた $\tau/f'_c \sim$ 相対変位関係および解析結果の比較を示す。図中の記号

○,●,△,▲はスタッド高 100mm における側圧 0%,10%,25%,35%(H100-0,H100-C10,H100-C25,H100-C35)の供試体の実験値を示している。また、実線、破線、点線、鎖線にて解析結果も合わせて示した。その結果、解析結果は実験結果を精度良く評価していることが確認できる。側圧なしの供試体 H100-0 の解析結果は、スタッドによるせん断剛性および非線形挙動を評価していることが確認できる。また、側圧を載荷した供試体 H100-C10,H100-C25,H100-C35 においても、側圧の増加にともなう影響を定量的に判定している。

4. 合成梁に対する解析的評価

本章では、加瀬ら³⁾によって行われたスタッド合成梁の曲げ試験に対して構築した解析モデルを適用することにより、妥当性評価を行う。

4.1 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は、表-2 に示すような材料特性をもつ。供試体のコンクリートは 60×125×2000(mm)であり、H 形鋼の上フランジには、奥行き方向に 2 本ずつ 150mm ピッチでスタッドが溶接されている。なお、2 本のスタッドの間隔は 62.5mm である。

(2) 静的載荷実験

跳ね上がり防止装置の付いた支持台を用いて、スパン長 1600mm の単純梁を、200tf アムスラー試験機により載荷した。なお、載荷点は、梁上面中央部にφ50mm の円柱型の接触形状を持つ載荷用治具を介した線荷重である。

4.2 スタッド合成梁に対する妥当性評価

解析モデルは図-7 に示すように、対称性により 1/2 部分のモデルを用いた。なお、境界条件は、図-8 に示すように、鋼コンクリート界面には開きが生じないものと想定し、ずれの生じる方向にはジョイント要素とし、本モデル式を導入したモデルと任意のジョイント剛性一定値のモデルとして、各々モデルに対する比較検討を行う。

表-2 材料緒元

スタッド合成梁
コンクリート 28 日強度 290kgf/cm ²
粗骨材最大寸法 10mm,
スランプ 12.5cm,空気量 4.5%
H 形鋼 125×125(JIS G3195)
スタッド 8φ 高さ 40mm

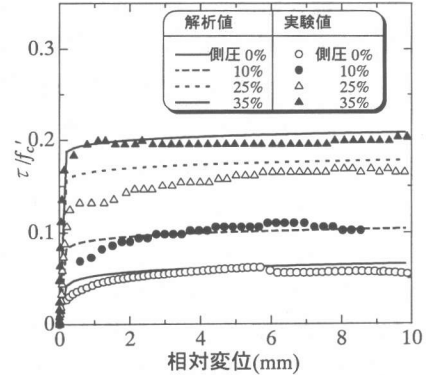


図-6 適用性評価 (スタッド高 100mm)

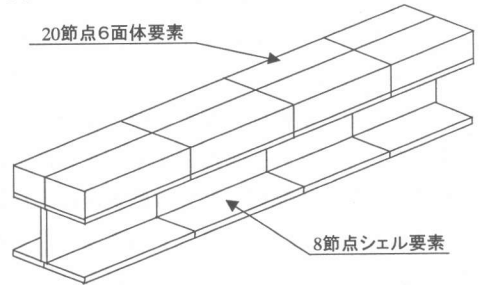


図-7 スタッド合成梁の要素分割図

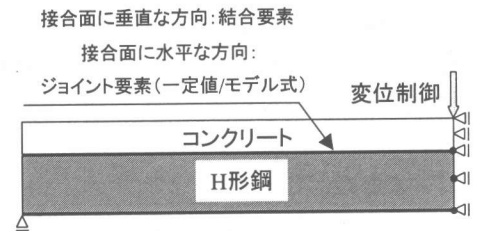


図-8 境界条件および載荷方向

図-9 に実験結果を示すととも解析結果も示す。図中の記号○、実線、破線は、それぞれ実験値、鋼とコンクリート界面のずれの生じる方向にモデル式および比較的良好なジョイント剛性一定(以下、 $k_i=100(\text{MPa}/\text{mm})$ と称す)を導入した解析値である。また、スタッドによるせん断剛性を評価した拡大図も合わせて添付した。その結果、解析結果は実験結果を精度良く評価している。また、本モデル式は、 $k_i=100$ の解析

値に比べ、実験値の剛性およびひずみ軟化を精度良く評価している。つまり、本モデル式は、鋼コンクリート界面に働く側圧を判定し、せん断抵抗を変数として捉えているものと考えられる。また、**拡大図**からも確認されるように、 $k_j=100$ の解析値が、ジョイント要素の性質上、スタッドによるせん断剛性を全く評価不可能であり、同様に任意のジョイント剛性を導入しても、スタッドの剛性は評価できない。しかしながら、本モデル式の解析値においては評価可能である。これは、本モデル式はスタッドの剛性を考慮した初期項（式中(9)の値 0.0519）を有しているからである。さらに、任意のジョイント剛性を決めるにあたっては、トライアンドエラーを省くと云った利点がある。

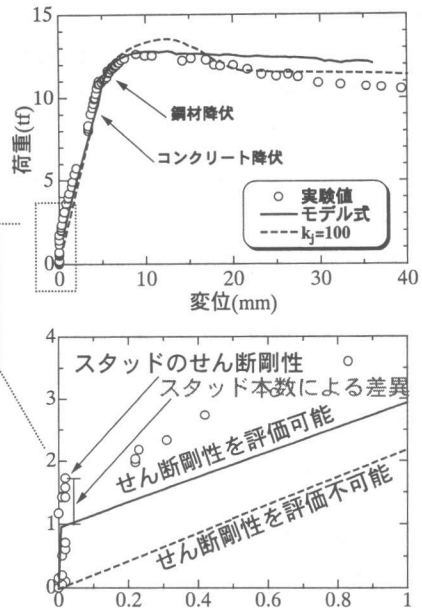
しかしながら、本解析モデルは、側圧に関して単に圧縮状態依存型であり、スタッドの抜け出し方向あるいは界面の開きといった引張状態には対応していない。また、本モデル式は著者らが実施した側圧制御式押し抜き試験により提案されたものであり、スタッドの本数、径を考慮していない。したがって、このようなモデル式を解析に挿入する場合、スタッドのめり込みあるいは引き抜き、径、本数を考慮した統一的なモデル式の提案が今後の課題となってくるわけである。

5. まとめ

本研究では、側圧に依存するスタッド付き鋼とコンクリート界面のせん断挙動を評価しうるモデル式を挿入した解析モデルの構築を行った。そして、スタッド合成梁を解析対象として、実験値との比較により、その妥当性評価を行った。

以下に、得られた結論を示す。

- 1)本モデル式は、実験結果を精度良く評価可能であることが確認された。
- 2)本解析モデルはジョイント剛性一定の解析値より比較的精度良く剛性を評価でき、変形挙動に伴う側圧を考慮したせん断挙動が評価可能である。



スタッドによるせん断剛性の拡大図
図-9 スタッド合成梁の妥当性評価

- 3)本解析モデルは、スタッドを用いた合成構造に対して、スタッド要素を考慮せず、任意のジョイント剛性を決めるにあたっては、トライアンドエラーを省くと云った利点がある。
- 4)本モデル式の適用範囲が、鋼コンクリート界面が圧縮状態単一であることから、今後の課題としては、引張状態で判定できるような拡張性を期待する。

参考文献

- 1)田島ほか：スタッドシャーコネクターによる鋼・コンクリート部材接合部の強度変形状に関する基礎的研究、合成構造の活用に関するシンポジウム論文集、1986
- 2)笠井裕次ほか：スタッドを有する鋼コンクリート界面における付着性状の統一的モデルに関する研究、コンクリート工学年次論文報告、Vol.22, No.3, pp1171-1176, 2000
- 3)加瀬典文：鋼・コンクリート合成要素の急速載荷実験に関する基礎的考察、防衛大学校理工学研究科修士論文、1996.3
- 4)小田朋輝：鋼・コンクリートの結合面の力学特性に関する研究、広島大学大学院工学研究科修士論文、1996.2