

# 論文 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 統一モデルに関する研究

笠井 裕次\*1・山野 誠悦\*2・河村 哲男\*3・大下 英吉\*4

要旨：従来、スタッド付き鋼とコンクリートという合成構造において、一面或いは二面せん断実験によって付着特性を捉える事に留まっている。それによるスタッド抵抗と、拘束圧作用時の鋼コンクリート界面に働く動摩擦力による界面抵抗の両者により単純累加抵抗が与えられている。そこで、本研究は側圧制御式押し抜き試験法を用いて拘束圧作用時の  $\tau/f_c'$  ～ 相対ずれ関係を算出し、本研究における付着性状の統一モデル ( $\tau/f_c'$ ・S 関係) の構築を行った。そして構築された統一モデルと既存の実験値を比較し、その適用性を評価した。その結果、従来行われてきた上述の手法では適用ができないことが確認された。

キーワード：合成構造、頭付きスタッド、拘束圧、側圧制御式押し抜き試験

## 1. はじめに

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の用途は多種多様に渡っており、代表的な事例として、合成床版、合成ロックシェッドなどが挙げられる。別例として柱梁接合部も挙げられる。合成構造物においては、鋼コンクリート界面の付着特性に関する研究が非常に重要であるが、現時点において一面或いは二面せん断実験により付着特性を捉える事にのみ留まっている。一般に、このような構造物には、常時荷重として活荷重、衝撃荷重或いは土圧などが複合して作用するため、3次元的な変形挙動を示すことになり、上述により得られた付着特性は、このような構造物には適用が困難である。したがって、合成構造物の変形挙動を詳細に評価するためには、多軸応力状態下におけるスタッド付き鋼とコンクリートとの付着性状を詳細に解明しなければな

らないものと考えられる。

この付着特性に対する現在の評価方法は、一面或いは二面せん断実験によるスタッドのせん断抵抗（スタッド抵抗）と拘束圧作用時の鋼コンクリート界面に働く動摩擦力（界面抵抗）によるずれ抵抗の単純累加抵抗として対処されている。しかしながら、この理論は、実験的検証が全くされておらず、また、多軸応力によるスタッドのコンクリートへのめり込み或いは抜け出しによる影響が全く考慮されておらず、実構造物への適用は困難である。

本研究では、拘束圧作用時における鋼とコンクリートとの付着特性を評価するためにコンクリート供試体の圧縮強度の 10%、25%、35% の圧縮力が拘束圧として一定に保持した側圧制御式押し抜き試験法を用いた実験を行い、付着特性に及ぼす拘束圧の影響を評価するとともに拘束圧作用時の付着性状に関して側圧、スタッド高をパラメータとした本研究における統一モデルの構築も実施した。さらに拘束圧作用時の付

\*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

\*3 (株)ピーエス 技術研究所所長 (正会員)

\*4 中央大学 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

着性状とスタッド抵抗，界面抵抗との単純累加抵抗との比較検討を行った。

## 2. 拘束圧作用時のせん断実験概要

### 2.1 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えし，図-1に示すようなものとした。スタッドの寸法は，径が $d=16(\text{mm})$ ，高さが $H=80,100,120(\text{mm})$ である。コンクリートスラブは，設計基準強度 $29.4\text{N/mm}^2$ とし，側圧による圧壊を防ぐため鉄筋網が配置されており，コンクリートの打設方向は，供試体の底となる下方より行った。なお，スタッドの規格はJIS B 1198によるものであり表-1にその機械的性質を示す。

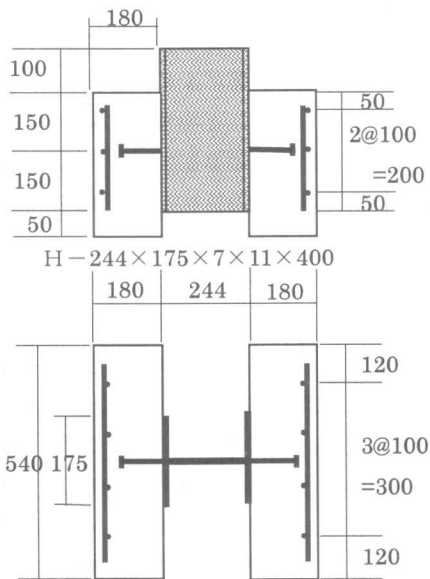


図-1 供試体の寸法

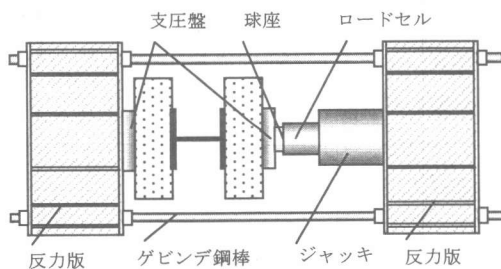


図-2 側圧制御式押し抜き試験法

### 2.2 実験方法

せん断実験は，100tアムスラー型試験機を用いて行った。せん断荷重を静的速度 $0.5\text{mm/mim}$ で載荷した。側圧の載荷は，図-2に示すように，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。

実験パラメータは，表-2に示すように，スタッド高は $H=80,100,120(\text{mm})$ ，ならびに側圧は圧縮強度の10%,25%,35%の直応力である。なお，既往の押し抜き試験において，圧縮の側圧50%が最大値であったため，上記の側圧とした。

測定項目は側圧，せん断応力，相対ずれであり，得られた実験データからスタッド高，側圧

表-1 スタッドの規格

機械的性質		
引張強さ $\text{N/mm}^2$	降伏点 $\text{N/mm}^2$	伸び (%)
402~549	235以上	20以上

表-2 供試体一覧

供試体	H (mm)	$n_p$ (%)	$f_c'$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$E_c$ ( $\text{kN/mm}^2$ )	側圧 ( $\text{N/mm}^2$ )
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

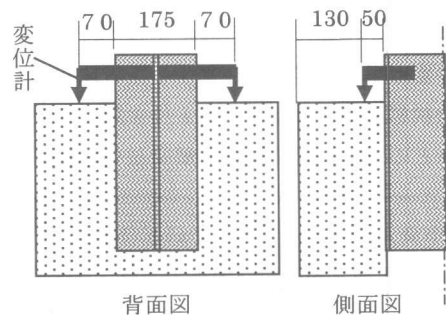


図-3 変位計の配置図

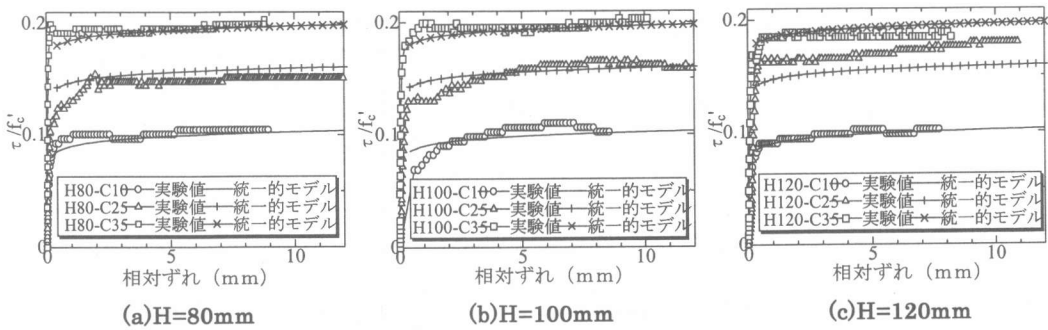


図-4  $\tau/f_c'$ -相対ずれ

をパラメータとした  $\tau/f_c'$ ~相対ずれ関係を求めた。ここで用いたせん断応力は、せん断荷重を鋼とコンクリートの付着面積で除した値である。なお、変位計は、図-3に示すように供試体の片側のみに設置した。相対ずれ量は、供試体の側面に対し左右に設置した変位計の平均値とした。

### 2.3 実験結果

図-4に本実験より得られた  $\tau/f_c'$ ~相対ずれ関係を示す。図(a),(b),(c)は、それぞれスタッド高  $H=80,100,120(\text{mm})$ の結果であり、図中の記号○,△,□は側圧 10%,25%,35%の供試体を示している。各供試体のコンクリート強度のばらつきを補うために、せん断応力をコンクリート強度で無次元化させた。

鋼とコンクリート間にずれが生じた時点の  $\tau/f_c'$ 値は、側圧 10%で約 0.085、側圧 25%で約 0.13、側圧 35%で約 0.20 であり、スタッド基部のコンクリートにひび割れが生じた時点でもある。拘束圧とともに  $\tau/f_c'$ 値が大きくなる結果は、側圧に比例して剛性が増加する傾向を示している。また、相対ずれ発生後の挙動は、側圧 10%,25%の各供試体では  $\tau/f_c'$ 値が緩やかに増加しながら相対ずれが増加しているのに対して、側圧 35%の各供試体では、 $\tau/f_c'$ 値をほぼ一定に保ちながら相対ずれが増加している。すなわち、相対ずれが生じた時の  $\tau/f_c'$ 値およびそれ以降の変形挙動は、拘束圧によって働く鋼コンクリート界面の動摩擦力（界面抵抗）の影響が大き

く関与していると考えられる。

一方、スタッド高による影響は顕著には現れていないが、スタッド高  $H=100(\text{mm})$ の供試体は他のスタッド高の供試体に比べ柔かな変形挙動を示した。

### 2.4 統一モデルの提案

スタッドを有する鋼コンクリート界面における拘束作用を考慮した本研究における付着性状の統一モデルの構築を行う。

前章の実験結果を基に側圧およびスタッド高をパラメータとして構築した統一モデルを以下に示すとともに、図-4の実験結果に合わせて示す。

$$\frac{\tau}{f_c'} = (-9 \times 10^{-6} H + 0.0062) \ln(S) + (0.0038 n_p + 0.0519) \quad (1)$$

ここで、

- $\tau$  : せん断応力(N/mm<sup>2</sup>)
- $f_c'$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)
- $H$  : スタッド高(mm)
- $S$  : 相対ずれ(mm)
- $n_p$  : 側圧(%)

側圧 10%,25%,35%の統一モデルはそれぞれ実線,+ ,×で示した。統一モデルと実験値との比較行くと、鋼コンクリート界面においてすべりが生じる時点すなわちスタッド基部のコンクリートにひび割れが発生する時点での評価にはばらつきがあるものの、ずれの発生以降に

においては、式(1)は精度良く実験結果を評価している。しかしながら、式(1)においては、本研究独自の供試体のみに適用範囲が限られ、鋼とコンクリートの付着面積、荷重速度およびスタッド本数、径を考慮していないので、今後詳細な評価が必要になってくることは言うまでもない。

### 3. スタッド抵抗と界面抵抗による単純累加<sup>3)</sup>

#### 3.1 拘束圧なしのせん断実験によるスタッド抵抗

##### (1) 実験概要

実験パラメータは表-3に示すようにスタッド高 $H=80,100,120(\text{mm})$ である。実験方法は、2.2で記したものと同様であり、実験は拘束圧を荷重せず単純押し抜き試験法で行った。供試体の寸法は図-1に示した通りである。

##### (2) 実験結果

図-5に実験結果に示した。記号○,△,□は、それぞれ供試体 H80-0, H100-0, H120-0 を示している。

$\tau/f_c'$ 値の最大値はそれぞれ約 0.06 であり、 $\tau/f_c'$ 値の最大値を示した時の相対ずれ量は供試体 H80-0 で 3.5 mm, 供試体 H100-0 で 5.5mm, H120-0 で 8.5mm である。すなわち、スタッド高が高くなるにしたがって、 $\tau/f_c'$ 値の最大値を示す時の相対ずれ量が増加する。拘束圧なしの供試体は、それぞれ緩やかに  $\tau/f_c'$ 値の最大値まで到達し、その直後に急激に  $\tau/f_c'$ 値が低下して、それ以降は緩やかに低下している。なお、 $\tau/f_c'$ 値が低下した時点はスタッド基部のコンクリートにひび割れが生じた時点である。

#### 3.2 鋼コンクリート界面の界面抵抗<sup>4)</sup>

##### (1) 実験概要

実験パラメータは表-4に示すように、側圧は圧縮強度の 10%,20%,40%の直応力である。実験方法は、2.2で記したものと同様であり、供試体の寸法は図-6に示す。

表-3 供試体一覧 (スタッド抵抗)

供試体	H (mm)	$n_p$ (%)	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (KN/mm <sup>2</sup> )	側圧 (N/mm <sup>2</sup> )
H80-0	80	0	22.9	23.4	0
H100-0	100		26.8	26.0	
H120-0	120		26.8	26.0	

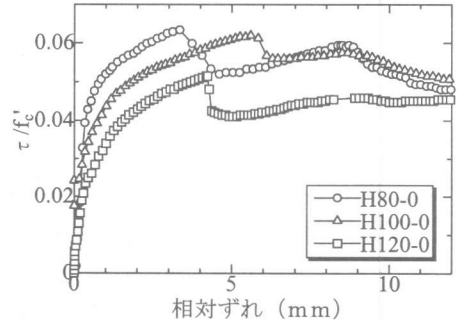


図-5  $\tau/f_c'$ -相対ずれ(スタッド抵抗)

表-4 供試体一覧 (界面抵抗)

供試体	$n_p$ (%)	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (KN/mm <sup>2</sup> )	側圧 (N/mm <sup>2</sup> )
MS-C10	10	24.3	26.2	2.43
MS-C20	20	28.6	25.8	5.72
MS-C40	40	24.3	26.2	9.72

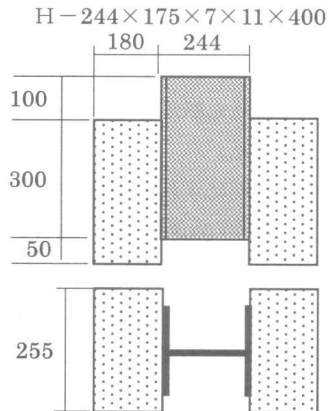


図-6 供試体の寸法 (界面抵抗)

##### (2) 実験結果

図-7は、実験結果を示す。記号○,△,□は、それぞれ供試体 MS-C10, MS-C20, MS-C40 を示している。

最大  $\tau/f_c'$ 値は供試体 MS-C10 で 0.069, MS-C20 で 0.123, MS-C40 で 0.269 である。

最大  $\tau/f_c'$  値は、鋼コンクリート界面にすべりが発生した時点であり、側圧が大きくなるにしたがって、その後の  $\tau/f_c'$  値の減少分も大きくなっている。これは、せん断荷重に抵抗している鋼コンクリート界面に働く摩擦抵抗が、すべりが生じる時に発散するためである。したがって側圧が大きくなるほど、相対ずれが生じる時の  $\tau/f_c'$  値の増減が大きくなっていると考えられる。そして最大  $\tau/f_c'$  値以降の挙動は緩やかに低下しながら相対ずれが生じている。これは、相対ずれが生じる時にコンクリート界面が擦り切れて、摩擦抵抗力が低下することによるものと考えられる。

### (3) 界面抵抗の推定式の構築

拘束圧作用下における鋼コンクリート界面に働く動摩擦力の推定式の構築を行った。結果を次式に示す。

$$\frac{\tau}{f_c'} = (-0.4974) \frac{S}{f_c'} + 0.65849175 n_p \quad (0 \leq S \leq 296.7804 f_c' n_p)$$

$$\frac{\tau}{f_c'} = (-0.0476) \frac{S}{f_c'} + 0.525 n_p \quad (296.7804 f_c' n_p \leq S \leq 12)$$

ここで、

$\tau$  : せん断応力(N/mm<sup>2</sup>)

$f_c'$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$S$  : 相対ずれ(mm)

$n_p$  : 側圧(%)

図-7に、実測結果と上記した推定式を対比させた  $\tau/f_c'$  ~ 相対ずれ関係を示す。推定式は記号 /, +, × で示した。側圧ごとに比較してみると、推定式は実測結果を非常に精度良く評価しており、推定式の適用性が確認できた。

### 3.3 単純累加抵抗と拘束圧作用下のせん断抵抗との比較検討

図-8は、単に3.1節に示したスタッド抵抗と3.2節に示した界面抵抗を単純累加させた  $\tau/f_c'$  ~ 相対ずれ関係および2章で示した拘

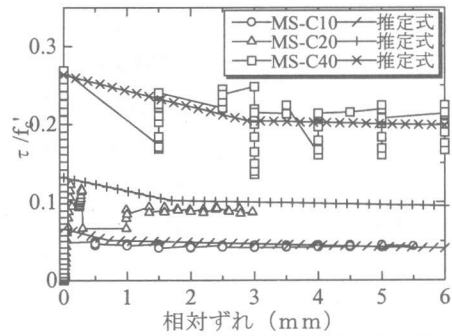
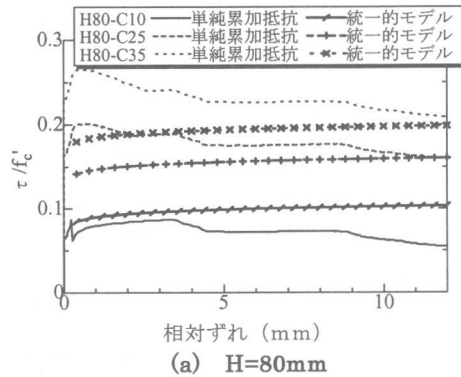
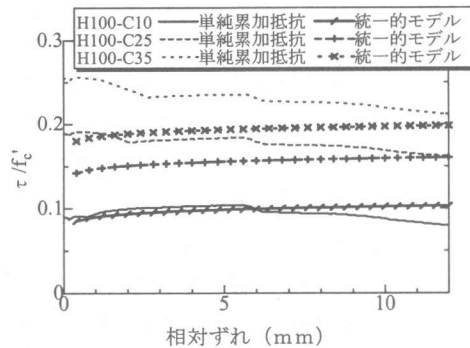


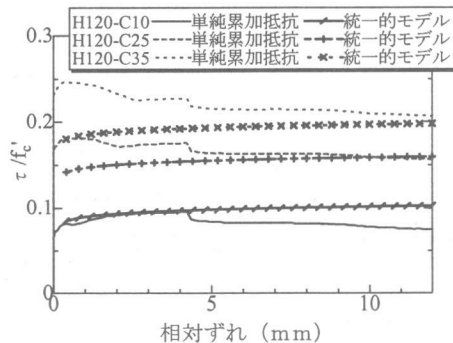
図-7  $\tau/f_c'$  - 相対ずれ(界面抵抗)



(a) H=80mm



(b) H=100mm



(c) H=120mm

図-8  $\tau/f_c'$  - 相対ずれ(比較検討)

束圧作用時のせん断抵抗をモデル化したものとの比較を表わしている。各図(a),(b),(c)は、それぞれスタッド高さ  $H=80,100,120(\text{mm})$ の結果であり、図中に示す記号 $\triangle, +, \times$ は、それぞれ側圧 10%,25%,35%を示している。

図(a)において、ずれが生じる時点での  $\tau/f_c'$  値における単純累加抵抗と統一モデル(実現象)の差異は、側圧 10%はほぼ一致しているのに対して、側圧 25%,35%では一致せず単純累加抵抗の  $\tau/f_c'$  値の方が大きくなり、その差はそれぞれ 0.033, 0.060 であった。また、図(b),図(c)においても同様の傾向を示した。

この差異には、実現象を現している統一モデルでは拘束圧の作用によりスタッドがコンクリート内部にめり込み、スタッドとコンクリート界面に微細なひび割れが発生することにより単純累加抵抗に比べずれが生じる  $\tau/f_c'$  値が小さくなったと思われる。

単純累加抵抗の場合、スタッド抵抗は側圧によらず図-5に示すずれが生じる時点の  $\tau/f_c'$  値が一定であることから、ずれが生じる時点のスタッド抵抗の影響は小さい、それに対して全抵抗に対する界面抵抗の割合は側圧とともに大きくなっていく。また、統一モデルの場合、上記した単純累加抵抗におけるスタッド抵抗が側圧によらずずれが生じる時点の  $\tau/f_c'$  値が一定であると仮定すると、統一モデルの界面抵抗は、スタッドの存在によりスタッド基部のコンクリートにひび割れが発生してしまうため、界面抵抗が低下するという挙動を起こしてしまう。つまり、ずれが生じる時点の界面抵抗は低下してしまうことから結果的に単純累加抵抗よりも小さくなると思われる。

以上のことから、従来の単純累加による手法は、低次元の拘束圧作用下における場合のみにしか適用できないことが確認された。

## 6. まとめ

本研究では、拘束圧を一定に保持した側圧制御式押し抜き試験法を用いた実験を行い、付着

特性に及ぼす拘束圧の影響を評価するとともに、拘束圧作用時の付着性状に関して側圧、スタッド高をパラメータとした本研究における統一モデルの構築を実施した。さらに拘束圧作用時の付着性状とスタッド抵抗、界面抵抗との単純累加抵抗との比較検討を行った。

その結果以下のことが明らかになった。

- 1)本研究で構築した統一モデルは、単純累加抵抗とは側圧が増加するにしたがって大きな較差が見うけられた。これは、統一モデルでは拘束圧の作用によりスタッドがコンクリート内部にめり込み、スタッドとコンクリート界面に微細なひび割れが発生すること、またスタッド基部のコンクリートのひび割れの発生より界面抵抗が低下するためである。
- 2)単純累加抵抗の場合、側圧が大きくなるにしたがってスタッド抵抗より界面抵抗の収める割合が大きくなる。統一モデルの場合、単純累加抵抗におけるスタッド抵抗は側圧によらずずれが生じる時点の  $\tau/f_c'$  値が一定であると仮定すると、界面抵抗は、スタッドの存在によりスタッド基部のコンクリートにひび割れが発生してしまい低下する。
- 3)スタッド抵抗と動摩擦力によるずれ抵抗の両者により単純累加抵抗を求める手法では、高拘束圧が作用した実構造物には適用できないことが確認された。

以上より、本研究独自に構築した拘束圧作用下における統一モデルを、頭付スタッドを用いた合成構造物の基礎式として提案した。

## 参考文献

- 1)土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，1989
- 2)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所修士論文，1996.3
- 3)笠井ら：拘束効果を有する鋼コンクリート界面の付着性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, 1999
- 4)久保田：鋼・コンクリート界面の付着性状に関する研究，中央大学理工学部卒業論文，1999.3