スタッドを有する鋼コンクリート界面における引張 応力依存型の付着性状に関する研究

外山 征^{*1}・大下 英吉^{*2}

概 要 実構造物における鋼コンクリート合成・複合構造, CFT 柱梁部等の変形挙動を詳細に評価するには, 複合応力が作用した状態における付着性状を評価しなければならない。著者等¹⁾は, 既にスタッド軸方向に圧縮力を作用させた場合の鋼コンクリート界面における付着性状に関する研究を行い, 付着性状がスタッド軸方向の圧縮力に依存することを報告しているが, スタッド軸方向に引張力が作用する場合の定量的評価にまでは至っていない。本研究では, スタッド軸方向に対して引張力の側圧を載荷した多軸応力状態下における付着性状の定性的かつ定量的評価を実施した。その結果, 引張力の側圧は付着性状に大きな影響を及ぼすとともに, 破壊性状にも大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード: 合成構造, スタッド, 付着性状, 引張応力依存型

1. はじめに

近年, 鋼コンクリート間の付着性状に関する研究が見直されてきている。1995年1月, 阪神一帯を襲った兵庫県南部地震により, 大規模な被害が生じた。鉄筋コンクリート造や鉄骨造のうち, 崩壊した損傷部位として柱梁接合部の被害が多く報告されている²⁾。その損傷事例として柱梁接合部には大きなせん断ひび割れの発生やかぶりコンクリートの剥落等が挙げられており, このことから柱梁接合部界面においては多大なせん断荷重, 梁に対しては多大な曲げが作用しているものと予想される。一方, 比較的被害の少なかった構造としてコンクリート充填鋼管柱(CFT 造)などが挙げられ, 耐震性の向上, 工期短縮, 高い施工性の利点等から今後多用されていくものと思われる。

鋼コンクリート合成・複合構造, CFT 柱梁部等において, ずれ止めとしての頭付きスタッドは重要な接合構造として多く用いられている。ずれ止めは, 鋼桁の上フランジと床版との接触面に働くせん断力を相互に伝達し, 両者の間のすべりを止めることを主目的とするとともに, 床版の浮き上がりを防止するものである。頭付きスタッドがずれ止めとしての用途で鋼コンクリートの合成構造物に多く用いられている理由として, 実施工において容易に鋼材に接合可能な優れた施工性を持つこと, 鋼とコ

ンクリートの付着を十分に取って一体化させることにより高い剛性を期待できるものであることが挙げられる。一方, 実構造物において, 鋼とコンクリート界面に存在するスタッドには, 柱および梁に常時荷重として作用する活荷重および衝撃荷重等により発生する曲げモーメントによって圧縮および引張の直応力が作用した状態でせん断荷重が載荷されるという複合応力状態であり, スタッド軸方向の応力性状によりせん断挙動或いは破壊性状は全く異なることが想定される。また, 昨今の鋼コンクリート合成桁橋においては, 軽量化, 施工の合理化およびコスト削減の目的により, 上床版の幅員の長大化および波形鋼板ウェブの使用が盛んに実施されている。例えば, 第二東名高速道路においては, 片側三車線, 有効幅員十数 m であり, これを波形鋼板ウェブを有する PC 箱桁 1 本で支持することによりウェブ間隔 10m の橋が計画されている。このような構造形式の場合, 上床版の死荷重および活荷重により, 横方向曲げモーメントに起因し複合部である鋼桁上フランジ面に配置されたスタッドには, スタッド軸方向に引張力或いは圧縮力が働いた状態においてせん断力が作用することになる。さらに, 従来の I 桁に比べて横方向剛性が大きいこと, 接合部においてスタッド軸方向への引張力或いは圧縮力は大きいものとなり, 上述した応力性状は尚更, 重要なものとなってくる。

このような観点から, 著者等¹⁾は一面あるいは二面せ

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員) 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

*2 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (正会員) 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

せん断実験により捉えられたスタッドの付着性状はこのよう
な複合応力状態下にある構造物に対して適用が困難で
あり、スタッド軸方向の応力性状に依存した付着性状を
詳細に解明しなければならないことを指摘するとともに、
スタッド軸方向に圧縮力が作用された状態における付着
性状に関する定量的評価を実施し、付着性状に及ぼす側
圧の影響は非常に大きいことが明らかになった。そして、
より詳細な評価を行うためにはスタッド軸方向に引張力
が作用された状態下における付着性状を詳細に評価しな
ければならないことも指摘した。

そこで本研究では、複合応力状態下におけるスタッド
付き H 型鋼とコンクリート界面の付着性状を、スタッド
高およびスタッド軸方向への応力性状によらず統一的に

表－１ コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プ値 (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)
20	12	4.5	55.5	45.5
単位量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
159	257	840	1030	2.87

表－２ スタッドの規格

機械的性質		
降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
235 以上	400～550	20 以上

図－１ 供試体の寸法 (単位:mm)

評価可能なモデルの構築を目的として、従来の押し抜き
試験を改良しコンクリート供試体³⁾にスタッド軸方向に
一定の引張力を保持した状態でせん断力を作用させると
いう側圧制御式押し抜き試験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究では、鋼コンクリート界面の付着性状に及ぼす
スタッド軸方向の引張力に着目するため、スタッド間隔
によるせん断抵抗の影響を考慮しスタッド本数は1本と
した。コンクリートの配合および改良型押し抜き供試体
の形状寸法は、表－１および図－１に示す通りである。
なお、鋼コンクリート界面の付着をなくするため表面に凹
凸がなく均一なH型鋼を使用するとともにアセトンによ
り表面を洗浄した。スタッドに関しては、径 $d=16$ (mm)、
高さ $H=80, 100$ および 120 (mm) の3種類である。な
お、スタッドの規格は JIS B 1198 に準じており、機械的
性質は表－２に示す通りである。コンクリートスラブは、
既往の研究¹⁾との比較のため設計基準強度 29.4N/mm^2 と
し、スタッド軸方向の引張力によるコンクリートへのひ

図－２ 引張型側圧制御式押し抜き試験法

図－３ 支圧版固定位置
および相対ずれ用変位計設置位置

図-4 スタッドへのひずみゲージ貼付位置

図-5 スタッド概要

表-3 供試体一覧

供試体 名称	スタ ッド 高 H mm	側圧 比 LP %	圧縮 強度 f'_c N/mm ²	引張 強度 f_t N/mm ²	弾性 係数 E_c kN/mm ²	側圧 N/mm ²
H80-0	80	0	22.9	2.55	23.4	0
H100-0	100	0	22.9	2.65	26.0	0
H120-0	120	0	26.8	2.65	26.0	0
H80-T20	80	20	23.7	2.97	24.3	0.59
H100-T20	100	20	30.7	2.87	24.2	0.57
H120-T20	120	20	27.8	2.74	25.5	0.55
H80-T30	80	30	27.8	2.74	25.5	0.82
H100-T30	100	30	29.2	2.66	26.3	0.80
H120-T30	120	30	29.2	2.66	26.3	0.80

図-6 供試体の名称

び割れ防止のため図-1に示すようにスタッド頭部近傍にD10の異形鉄筋を格子状に配置した。コンクリートの打設方向はせん断荷重載荷設置状態の下方から行った。ブリーディングによる肌離れが生じ、せん断荷重がこの肌離れを詰める方向に作用する場合にはせん断耐力にか

なりの悪影響があるものと考えられる。なお、従来最も多用される使用法としての鋼コンクリート桁におけるずれ止めである頭付きスタッドは、正立した状態でスタッド頭部の方向から打設されるものであるが、本実験の打設方向はブリーディングによる肌離れの影響を完全に排除できることから鋼コンクリート界面のせん断耐力を考察するには望ましいものと思われる。

2.2 実験方法

鋼コンクリート界面におけるせん断力の載荷は、三軸試験機の水平ジャッキによってスタッド軸方向に対し所定の引張力が保持された後で鉛直ジャッキにより上部から行い、せん断載荷速度は0.5mm/minとした。スタッド軸方向の引張力の載荷方法は、図-2に示すように支圧版と三軸試験機の水平ジャッキをPC鋼棒により固定し載荷した。

実構造物における応力性状は、曲げの作用によりスタッド軸方向への応力およびせん断応力が同時に増加するものと思われる。しかしながら、本研究では側圧を一定に保持した状態でせん断応力を作用させたわけであるが、これは、スタッド軸方向の引張力が付着性状に及ぼす影響を定量的に把握するためと終局状態に至るまでの応力経路への側圧の依存性を定性的かつ定量的に評価するためである。

次に、図-3に示すように、支圧版をスタッドを中心とした円上にボルトを用いて供試体と固定し、引張力によって発生するコンクリートの応力分布がスタッドに対して均一となるようにした。また、側圧としての引張力による土台と供試体の摩擦効果を低減させるため、土台にオイルを塗付した。コンクリートとH型鋼の相対ずれの測定は、同図に示すようにフランジを中心としたコンクリート上部の左右対称の位置に設置した変位計の平均値として測定した。なお、本実験における相対ずれは、スタッド頭部がコンクリート中に固定されていると仮定し、せん断荷重により下方へ移動するスタッド基部位置とコンクリート中に固定されているスタッド頭部位置とのずれ量と定義する。さらに、鋼コンクリートの付着性状をより詳細に解明するため、図-4に示すようにスタッド軸方向の伸縮によるひずみの測定のためのひずみゲージを上部と下部に貼り付けた。ひずみゲージ添付位置はスタッド変形の代表的な値としてスタッドの中央とした。

2.3 実験パラメータ

実験パラメータは、表-3に示すようにスタッド高Hおよび側圧比LP (Lateral Pressure) であり、各々の実験パラメータの載荷試験をそれぞれ1回行った。スタッド径は笠井ら¹⁾の行った実験との比較のためd=16(mm)、スタッド高はJIS規格に基づきH=80, 100, 120(mm)とし、図-5にスタッド概要を示す。側圧比に関しては、コンクリートの引張強度の20%および30%とした。ここで、

本研究における側圧は、図－2に示す水平ジャッキによりコンクリートに載荷された引張力を鋼コンクリート接地面積で除したものと定義する。また、本研究で設定した側圧比であるが、例えば CFT 造における CFT 柱・梁接合部には梁に集中荷重が作用することによる曲げモーメントにより、その接合部引張縁の鉄筋ひずみが最大で約 2000 μ に達している⁴⁾ことから考えると、柱梁接合部のアンカー材としての頭付きスタッドにも軸方向に対し非常に大きな引張力が作用しているものと思われる。側圧比の大きさは、終局状態において最大で約 60%にまで達するものであり、接合部におけるスタッドには場所ごとに異なる引張力が作用していることから考えると実構造物では 0%から 60%の側圧比が作用しているものと予想され、本研究ではその中間的な値として側圧比を 20%、30%とした。

また、コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数を側圧無しの実験結果とあわせて同表に示し、供試体の名称説明を図－6に示す。なお、長期間にわたる実験であったことからコンクリート練混ぜ時の温度が各供試体で差異が生じ、圧縮強度に若干のばらつきが生じたものと思われる。しかしながら後述するように、コンクリートの破壊に関しては引張強度が重要であり、各供試体における引張強度に大きなばらつきがみられないことから圧縮強度のばらつきが実験結果に及ぼす影響は少ないものと思われる。

3. スタッド引き抜き実験と本研究との比較

本章では、大谷等⁵⁾の行ったせん断・引張の組合せ荷重を受けるスタッドについての実験と本研究の実験結果との比較を行うことにする。

図－7に大谷等の行った実験のせん断耐力および引張耐力の耐力力相関曲線 $(T/T_u)^{3/2} + (S/S_u)^{3/2} = 1$ を示す。図中○、△および▽は本実験における側圧無し、側圧比 T20 および T30 の結果を示し、□および◇は大谷等の実験の一定引張力におけるせん断載荷および引張・せん断の比例載荷を示している。なお、コンクリート強度の異なる実験値を同時に評価するため、耐力力は引張力のみを作用させた場合の耐力力 T_u および本実験における側圧無し時のせん断耐力 S_u で除することにより無次元化している。また、 T_u および S_u の算出式は以下に示すとおりである。

$$T_u = 1.06\sqrt{20\pi l_e(l_e + D)}\sqrt{f_c} \quad (1)$$

$$S_u = 3.34A_s f_c^{0.3} E_c^{0.44} \quad (2)$$

ここで、

l_e : スタッド軸部の長さ (mm)

D : スタッド頭部直径 (mm)

図－7 破壊荷重と耐力力相関曲線

A_s : スタッド軸部断面積 (mm^2)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

E_c : コンクリートの弾性係数 (N/mm^2)

とする。

同図より本実験供試体は耐力力相関曲線のなかでも低引張領域に位置しており、本実験の側圧比 20%の耐力力に関しては多少のばらつきはあるもののほぼ耐力力相関曲線上に位置している。一方、本実験の側圧比 30%に関しては、耐力力相関曲線とは異なる結果を示しており耐力力相関曲線の適用性は認められない。すなわち、大谷等の実験では供試体の破壊形態がコンクリート破壊とスタッド破断の 2 種類であり、それらを同一の耐力力相関曲線により評価するという問題が挙げられる。なお、引張耐力/ T_u の値は、側圧比の大きさ、スタッド高およびコンクリート圧縮強度に依存するものであり、各スタッド高とも側圧比 30%が 20%に比べ大きな値となっているが、圧縮強度のばらつきが引張耐力/ T_u の値に及ぼす結果として、各スタッド高による側圧比の影響が小さくなったと思われる。

本研究では、側圧として引張力を保持した状態でのせん断力載荷によりスタッド頭部に接するコンクリートにひび割れが発生することに伴い、スタッドの高さ径比の差異による供試体の破壊性状が、スタッドと H 型鋼の溶接部が破断した H100-T30 を除き同様のコンクリート破壊となったと考えられ、詳細については次章で述べることにする。さらに、終局耐力のみの評価では上述の異なる破壊性状を詳細に評価することが困難であるため耐力力に至るまでの変形状態および応力性状を詳細に評価する必要があると思われる。

4. 側圧依存型付着性状

本章では、側圧比およびスタッド高をパラメータとした側圧制御式押し抜き試験における実験結果の比較検討

(a) スタッド高 H=80mm

(b) スタッド高 H=100mm

(c) スタッド高 H=120mm

図－８ 側圧有無によるせん断応力－相対ずれ関係

を行い、鋼とコンクリートの側圧依存型の付着性状について考察する。

付着性状を論じるに際し、スタッドに作用するせん断力或いは引張力を用いるのではなく、それらを鋼コンクリートの接地面積で除した応力を用いることとし、これをせん断応力とする。実構造物においては、鋼コンクリート界面に存在するスタッドの軸方向に作用する応力性状は、引張力が作用する箇所もあれば圧縮力が作用する箇所もあるというように場所によって異なり、それらを統一的に評価するには、鋼コンクリートの接地面積を導

表－４ 供試体破壊荷重および破壊形式

供試体	最大荷重(kN)	破壊形式	f_c (N/mm ²)
H80-0	205	コンクリート破壊	22.9
H100-0	219	コンクリート破壊	26.8
H120-0	174	コンクリート破壊	26.8
H80-T20	193	コンクリート破壊	23.7
H100-T20	206	コンクリート破壊	30.7
H120-T20	207	コンクリート破壊	27.8
H80-T30	162	コンクリート破壊	27.8
H100-T30	150	溶接部破断	29.2
H120-T30	165	コンクリート破壊	29.2

出した応力に基づくことが必要である。また、著者等の既往の研究¹⁾との比較を行うためにも、せん断応力および側圧により付着性状を論じる必要があるわけである。

4.1 側圧の有無によるせん断挙動

はじめに、鋼とコンクリートの付着性状に及ぼす側圧の影響を考察する上で、側圧の有無によるせん断応力－相対ずれにおける関係の比較を行う。側圧としての引張力は荷重制御により一定の荷重を保ち、「側圧無し」および「側圧有り」とともに土台と供試体の摩擦を低減させるため土台にはオイルを塗付した状態でせん断力載荷を行った。

図－８は、側圧の有無によるせん断応力と相対ずれの関係を表している。同図 (a), (b) および (c) は、それぞれスタッド高 80mm, 100mm および 120mm に対するものであり、図中の記号○、△および□はそれぞれ側圧無し、側圧比 20%および側圧比 30%を表している。

まず、側圧有無による実験方法の違いを検討する。側圧無しの場合、せん断荷重により鋼コンクリート界面に開きを生じさせる曲げが発生する。側圧有りの場合、コンクリートには一定の引張力が持続的に作用しており、コンクリートの変形挙動は側圧無しの場合と同様な曲げによる開きが発生していることが確認された。このように鋼コンクリート界面における変形性状が側圧有無によらず同様なものであることから、鋼コンクリート界面における変形性状および応力性状を比較し得るものと考えられ、より詳細な評価を以下に行う。

側圧無しおよび側圧有りのいずれの供試体においても、せん断応力は緩やかに同じような経路をたどり増加した。その後、側圧有りの引張力として側圧を載荷した供試体についてはせん断応力が最大値に達した後急激に低下するというような傾向が確認された。一方、側圧無しの供試体については急激にせん断応力が低下するというような挙動はみられなかった。相対ずれに関しては、その最大値は側圧有りの供試体に比べ大きな値となる。

次に、表－４に各供試体における破壊荷重、破壊形式およびコンクリート圧縮強度を示す。側圧として引張力が作用することによってスタッド頭部にひび割れが発生

図－9 せん断応力－相対ずれの関係
(側圧比一定)

し、さらに鉛直方向のせん断荷重により、ひび割れが進展することによるコーン状の引き抜きが起こることから考えると、スタッド高と径の比 H/d によらずスタッド近傍のコンクリートの割裂抵抗により各供試体の耐力が決定される傾向にあると思われる。

以上から、鋼コンクリート界面における付着性状には、側圧の有無、側圧比の大きさおよびスタッド高の影響があると思われる。このことから、より詳細なスタッド高および側圧比をパラメータとした引張力として側圧が作用した状態下における鋼コンクリート界面の付着性状の評価を行うこととする。

4.2 せん断応力－相対ずれ関係

(1) スタッド高に関する影響

図－9 は、側圧比が 20% および 30% におけるスタッド高をパラメータとしたせん断応力と相対ずれの関係を表している。同図 (a) および (b) はそれぞれ側圧比 20% および 30% に対するものであり、図中の記号○、△および□は、それぞれ供試体スタッド高 H80、H100 および H120 を表している。

まず、いずれの供試体についても同様な初期剛性でせん断応力が上昇する傾向が見られた。その後、同図 (a) に示す側圧比が 20% の場合、スタッド高が高くなるにつれて相対ずれの最大値が大きくなるという傾向を示し、

せん断応力の最大値もわずかながら大きくなる傾向が見られた。スタッド高の高低によるせん断応力増加経路の差異はみられず、ほぼ同じような経路を辿り最大値まで上昇した。また、同図 (b) に示す側圧比が 30% の場合には、スタッド高が 100mm である供試体 H100-T30 を除く供試体では、側圧比が 20% と同じ傾向を示している。このようなスタッド高による相対ずれ、せん断応力の最大値の増加は、破壊性状がコーン型の引き抜きに近い性状を示すという目視観察によることから考えると、スタッド高が高くなることによりコンクリートとスタッドの付着面積が増加することによるものであると考えられる。また、実構造物において常時荷重作用時などの初期剛性では各スタッド高とも同様の傾向となると予想されるが、構造物の終局耐力を考慮する際にはスタッド高および側圧比の影響は大きいものと思われる。本研究では、側圧の影響によりスタッド頭部からコーン状にひび割れが発生し、せん断力の増加に伴いひび割れが進展し、供試体の破壊形態がコンクリート破壊になったものと考えられ、H100-T30 に関しては、供試体の破壊形式がスタッド基部の溶接部での破断であることから、他の供試体との直接的な比較は困難であった。

なお、せん断応力の初期剛性が側圧比 20% および 30% ともにスタッド高が高いほどわずかながら初期剛性が緩やかなものとなっている。また、供試体 H120-T20 に関して、せん断応力の初期剛性が他と比べ緩やかなものとなっている。このことは、同じ相対ずれに対してスタッド高が高いほど曲げ性状が小さくなるものと考えられる。したがって、スタッド高に伴う曲げ性状が影響を及ぼす結果として、供試体 H120-T20 の初期剛性が小さくなるものと考えられる。

(2) 側圧に関する影響

ここでは図－8 を用いて、せん断応力－相対ずれ関係に及ぼす側圧比の影響について考察を行う。

まず、いずれの供試体についても、せん断応力は緩やかに増加し、側圧比 20% および 30% の供試体に関してはせん断応力の最大値に達した後急激に低下するというような非常に脆性的な挙動を示している。このような脆性的挙動は、せん断応力にスタッドの変形性状が大きく関与するものであり、その詳細については 4.3 節にて論じることとする。

次に、スタッド高 80mm におけるせん断応力の最大値は、T20、T30 においてそれぞれ 1.84、1.55N/mm²、スタッド高 100mm ではそれぞれ 1.96、1.43N/mm²、スタッド高 120mm ではそれぞれ 1.97、1.57N/mm² である。一方、スタッド高 80mm における相対ずれの最大値は、T20、T30 においてそれぞれ 8.71、6.48mm、スタッド高 100mm ではそれぞれ 11.81、4.38mm、スタッド高 120mm ではそれぞれ 15.31、7.47mm である。すなわち本実験では、側圧比が大きくなるにつれてせん断応力の最大値および相

(a) スタッド高 H=80mm

(b) スタッド高 H=100mm

(c) スタッド高 H=120mm

図一 10 せん断応力～スタッドひずみの関係
(スタッド高一定)

対ずれの最大値が小さくなるというように、引張力としての側圧比の大きさがコンクリートとH型鋼の界面の付着性状に非常に大きな影響を及ぼしているわけである。さらに、せん断応力および相対ずれの最大値に及ぼす側圧比の大きさの影響は、スタッド高が高いほど顕著である。このような、側圧比の大きさによる付着性状は、引張力としての側圧を作用させることにより、コンクリー

トとH型鋼との間にわずかな開きを生じるとともに破壊面となるコーンが形成され、せん断力の载荷とともに次節で示すスタッドの曲げ変形が卓越することによるものである。したがって、側圧が大きいほど上述の開き或いは破壊面となるコーンの形成度合いが大きいと、側圧の影響が非常に顕著となるわけである。

一方、側圧無しの供試体のせん断応力は緩やかに増加し最大に達した後、最大値としてのせん断応力を保持しながら相対ずれが増加する傾向を示している。このような性状は、せん断荷重による曲げが鋼コンクリート界面の開きとともにスタッドの引き抜きを生じさせることによると思われる。すなわち、スタッドの伸び挙動により相対ずれが延性的に増加したものと思われる。

なお、図一 8 (c) において供試体 H120-T20 の初期剛性が他の供試体と若干異なるが、これは恐らく H 型鋼に溶接する際のスタッドの溶接ひずみがスタッドの剛性に影響を及ぼしたものではないかと考えられる。

上述のことは鋼コンクリート界面においてスタッド本数が 1 本に関するものであり、スタッド間隔またスタッド本数による側圧比およびスタッド高の性状は今後の課題としたい。

4.3 せん断応力～スタッドひずみの関係

スタッドの変形性状は、軸方向ひずみ成分と曲げひずみ成分に分解して考慮することができる。軸方向ひずみ成分はスタッド中央の上部および下部に添付したスタッドひずみの平均により表すことができ、また曲げひずみ成分については、スタッド上部および下部のスタッドひずみの値から軸方向ひずみ成分を差し引くことにより表すことができる。

本研究では、スタッド中央に貼付したひずみゲージによりスタッドの挙動を評価したわけであるが、スタッドの局所的挙動に関しては勿論言及はできない。しかしながら、本研究の範囲内において供試体の破壊性状がコンクリート破壊であることから、破壊に至るまでのせん断応力はコンクリート内部に存在するスタッドの挙動に密接に関係しているものと考えられる。さらに、引張力としての側圧により鋼コンクリート界面にわずかな開きが生じ、H 型鋼とコンクリートの付着がスタッドのみであると考えられることから、スタッドの変形挙動が及ぼす鋼コンクリート界面のせん断応力への影響は大きいわけである。

図一 10 (a), (b) および (c) は、それぞれスタッド高 80mm, 100mm および 120mm における側圧比 20%, 30%の状態でのせん断応力とスタッドひずみによる比較を示したものである。図中の実線および記号○, △はそれぞれ側圧比 20%のスタッドの軸ひずみ、上側曲げひずみおよび下側曲げひずみを表しており破線および記号●, ▲はそれぞれ側圧比 30%時のスタッドの軸ひずみ、上側曲げひずみおよび下側曲げひずみを示している。

図-11 荷重によるスタッドの変形挙動と引き抜き力

(1) スタッド高に関する影響

図-10 (a) に示すスタッド高 80mm の軸方向ひずみ成分は、せん断力の荷重開始初期には軸方向ひずみ成分が殆どゼロであり、その後急激に引張の軸方向ひずみ成分を示した。一方、同図 (b) および (c) に示すスタッド高 100 および 120mm の軸方向ひずみ成分は、せん断力の荷重直後から引張の軸方向ひずみ成分を示した。また、曲げひずみ成分において、いずれのスタッド高に関しても、せん断応力が約 1.00N/mm^2 に達する辺りにおいてスタッド高が低いほど曲げひずみ成分の増加割合が顕著となった。また、曲げひずみに関して図-8 に示す相対ずれに関連付けて考察すると、図-8 に示す相対ずれが急激に増加した時点すなわちせん断応力が約 1.00N/mm^2 近傍において、図-10 に示すスタッドの曲げひずみ成分が増加している。このことは、スタッド頭部がコンクリート中に固定されていることからせん断変形に伴う軸方向ひずみはスタッド基部近傍が最も大きく、その部分でスタッドが降伏したことによるものであると考えられる。すなわち、スタッド高が低いほど曲げ変形性状が卓越し、各スタッド高の変形挙動がせん断応力に寄与する割合が異なるわけである。

(2) 側圧比に関する影響

図-10 (a) に示すスタッド高 80mm では、軸方向ひずみ成分に及ぼす側圧比の影響はほとんどないことに對して、同図 (b), (c) に示すスタッド高 100 および 120mm では、側圧比が大きくなるにつれて引張の軸方向ひずみ成分の差異が大きくなる。一方、曲げひずみ性状は、側圧比によって殆ど変化がない。このような性状を図-8 に示すせん断力-相対ずれ関係に関連付けてみると、引張の軸方向ひずみが大きいほどせん断応力の最大値が小さくなっていることが確認される。すなわち、側圧比が大きい程、スタッドの軸方向ひずみが引張として大き

(a) 側圧比 20%

(b) 側圧比 30%

図-12 軸方向ひずみ-相対ずれの関係
(側圧比一定)

くなり、初期値としての引張力によるコンクリートのひび割れが、小さなせん断応力でコンクリートのコーン型破壊領域形成、およびその進行を顕著にさせると考えられる。

4.4 スタッドの変形に伴う軸方向ひずみ-相対ずれの関係

側圧として引張力を荷重させた場合、引張の影響により鋼コンクリート界面にはわずかな開きが発生し、鋼コンクリートの付着はスタッドとコンクリートのみであると考えられる。このことから鑑みると、せん断耐力は作用側圧とスタッドの変形挙動に依存するものであるため、相対ずれの増加に伴うスタッド変形によるスタッド軸方向ひずみを評価する必要があると思われる。図-11 に示す鋼コンクリートの変形挙動を考えると、H 型鋼の押し抜きにより H 型鋼とコンクリートには相対ずれが発生する。その際、スタッド頭部では幾何学的形状によりコンクリートの拘束が存在するため鉛直方向の移動は起こらず、同図に示すように、スタッドの挙動は軸方向の伸びと純曲げ挙動であり、このような開きおよび伸びに関する性状は作用側圧が大きいほど顕著である。また、スタッド軸方向の伸び挙動によるコンクリートからの抜け出しは、水平方向においては供試体の鋼コンクリート界面での開きとなり、鉛直方向においては H 型鋼とコン

クリートの相対ずれを伴うものであることから、スタッドの軸方向の変形性状は鋼コンクリート界面の鉛直方向および水平方向の変形挙動をよく示すものであると考えられる。

図-12は、側圧比が20%および30%におけるスタッド高をパラメータとしたスタッドの軸方向ひずみと相対ずれの関係を表している。同図(a)および(b)はそれぞれ側圧比20%および30%に対するものであり、図中の記号○、△および□は、それぞれスタッド高H80、H100およびH120を表している。

同図(a)に示す側圧比が20%の場合、スタッド高が低いほど相対ずれの増加に伴うスタッド軸方向ひずみの増加率すなわち傾きが大きくなり、その傾きは相対ずれによらずほぼ一定であるということが確認できる。これは、スタッド頭部がコンクリートで固定された状態での強制変位であることからスタッド高が低いほど偏心曲げ性状が大きくなり、それによって伸び挙動が顕著になるわけである。また同図(b)に関しても同様である。

同図(a)と(b)の比較による側圧比の差異に関しては、側圧比が大きくなるほど相対ずれに対するスタッド軸方向ひずみの増加率、すなわち傾きが大きくなる傾向が確認できる。引張力としての側圧により鋼とコンクリートの付着がスタッドのみに依存していることから、T20およびT30のスタッドには側圧としての引張力としてそれぞれ約150N/mm²および200N/mm²の引張応力が作用していることになる。これらの初期応力性状に関して、T20はスタッドの弾性域、T30ではスタッドの塑性域近傍にまで達しており、初期値としての側圧比の大きさがせん断荷重載荷後のスタッド軸方向ひずみの増加傾向に影響を与えているものと考えられる。なお、T30のスタッドは塑性域近傍に達しているもののまだ降伏していないことからせん断力を分担することができ、その後はスタッドの硬化域およびスタッド抜け出し部分のダボ効果による変形の拘束により、スタッド基部における破断をしなかったものと思われる。また、せん断応力-相対ずれ関係に関連付けてみると、スタッド高が低くなるほど相対ずれに対するスタッド軸方向のひずみ増加が顕著となり、最大せん断応力に達するまでの相対ずれ量が減少すると思われる。なお、H80-T30は、載荷途中にスタッドに貼付したひずみゲージが剥離したためである。

本研究を基に実構造物におけるスタッドの変形性状について考えてみる。上述の鋼コンクリート界面におけるスタッド変形挙動に関して、合成梁のコンクリート床版において、スパン長方向に連続して存在するずれ止めとしてのスタッドには、常時荷重が作用することによる横方向の曲げによってスタッド軸方向への応力およびせん断応力が同時に増加しながら作用し、鋼コンクリート界面で開きおよびスタッド軸方向への伸び挙動を生じる。柱梁接合部においても、スタッドへの同様の作用応力性

状から開きおよび伸び挙動を示すと思われる。本研究においてスタッド本数は1本であるが、ずれ止めとして複数配置されているスタッドのうち、局所的なスタッドについては本研究におけるスタッドの変形挙動と程度は異なるが似たような挙動を示すものと思われる。さらに、例えば正立した状態で用いられるずれ止めとしてのスタッドは、水平方向にはずれを発生させる力に対し、鉛直方向には版を浮き上がらせる力に対して抵抗するものであると考えられる。したがって、スタッド軸方向に変形を生じさせる力は、鋼コンクリート界面の鉛直方向および水平方向の変形を促す力の合力としての性状を持つと考えられるわけである。

以上の節で述べてきたことから、スタッド高および側圧比の相違は複合応力状態下の鋼とコンクリートの界面における付着性状に多大な影響を及ぼしているのは明らかである。すなわち、スタッド高および側圧比をパラメータとし詳細に評価した統一モデルの構築が必要となるわけである。

4.5 鋼コンクリート界面の付着性状に関する側圧およびスタッド高依存モデルの構築

本研究の範囲内における、スタッドを有する鋼コンクリート界面におけるスタッド高を考慮した付着性状の側圧依存型モデルの構築を行う。引張力としての側圧を載荷した実験においてコンクリート供試体が脆性的破壊を示した。この破壊点における最大せん断応力および最大相対ずれを考慮した引張力としての側圧載荷に及ぼすパラメータ推定式およびスタッド変形に伴うスタッド軸方向応力-相対ずれ関係の推定式をそれぞれ次のように導出した。

- (1) 引張の側圧載荷時のせん断応力-相対ずれ関係の推定

スタッド高をパラメータとした各々の供試体におけるせん断応力-相対ずれ関係を回帰分析した結果は以下に示す通りである。

$$\tau = a + b \ln(s) \quad (3)$$

$$a = 1.8366 - 0.006942 H$$

$$b = 0.3313 - 0.000292 H$$

ここで、

τ : せん断応力 (N/mm²)

s : 相対ずれ (mm)

H : スタッド高 (mm)

とする。

また、スタッド高の差異によるコーンの抜け出しを考慮した最大相対ずれ $S_{\max}$ の推定式は次式のようにになる。

$$S_{\max} = (1.444 \times 10^{-5} - 4.546 \times 10^{-7} LP) H^3 + 6.143 \quad (4)$$

ここで、

$S_{\max}$: 最大相対ずれ (mm)

LP : 側圧比 (%)

とする。

(a) スタッド高 H=80mm

(b) スタッド高 H=100mm

(c) スタッド高 H=120mm

図-13 せん断応力-相対ずれの関係
(スタッド高依存型モデル)

また、比較のため笠井等¹⁾の行った拘束圧として圧縮力を与えた状態でのせん断応力-相対ずれの推定式を次に示す。

$$a = 0.00519 + 0.0038 LP$$

$$b = (0.0062 - 9.0 \times 10^{-6} H) f'_c$$

ここで、

$$f'_c : \text{コンクリート圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}$$

とする。

これより、拘束圧として圧縮力を与えた状態での推定式ではスタッド高の影響が無視できるほど小さいことが

図-14 低側圧比におけるモデルの適用性
(せん断応力-相対ずれ)

確認できる。また一方では、側圧として引張力を与えた状態での推定式においては、スタッド高の差異が鋼コンクリートの付着性状に関して非常に大きな影響を及ぼすということと共に、最大相対ずれに関しては側圧比の差異が影響することが確認できる。

そして、式(3)および式(4)の構築モデルを図-8に適用した結果を図-13に示す。同図(a)、(b)および(c)は、それぞれスタッド高80、100および120mmに対する結果であり、図中に示す実線、破線および点線は、それぞれ側圧無し、側圧比20%および30%の引張力としての側圧における構築モデルの結果を示している。

構築したモデルと本研究での実験結果との比較を行うと、相対ずれにおいては、構築したモデルは鋼コンクリート界面における付着に急激な減少が発生する時点、すなわち最大相対ずれ量を比較的精度良く評価している。また、スタッド高100、120mmにおいてせん断応力増加傾向を良く評価し、スタッド高80mmにおいては多少ずれがあるものの実験結果を評価しているものと思われる。

次に、本構築モデルの低側圧比への適用性評価を行うこととする。図-14は、本構築モデルをスタッド高80mm、側圧比6%の実験供試体H80-T6に対して適用したものである。H80-T6は本研究の実験パラメータとして表-3に示しておらず実験結果に関する議論も行っていないが、低側圧比における本構築モデルの適用性評価のため同図に示したものである。構築したモデルと供試体H80-T6との比較を行うと、せん断応力の増加経路を非常に精度よく評価しており、最大相対ずれの値に多少のずれがあるものの本構築モデルは低側圧比にも適用可能であると考えられる。

なお、4.2にて述べたとおり供試体H100-T30は、他の実験供試体とは異なる破壊形態のスタッド基部での溶接部破断であったため他との比較が困難である。また、側圧無しに関しては、本研究の範囲内では明瞭な破壊点を示していないため、最大相対ずれの算出は困難であった。

(2) 引張の側圧載荷時の軸方向応力-相対ずれ関係の推定

側圧としての引張力を初期応力として考慮した変形に

図-15 軸方向応力-相対ずれの関係
(側圧およびスタッド高依存型モデル)

伴うスタッド軸方向応力-相対ずれ関係を回帰した結果を図-15に示す。同図(a)および(b)はそれぞれ側圧比20%および30%に対する結果であり、図中に示す実線、点線および破線は、それぞれスタッド高80mm、100mmおよび120mmにおける回帰の結果を示している。

変形に伴うスタッド軸方向応力-相対ずれ関係の推定式は以下の通りである。

$$\sigma_{as} = E(\alpha + \beta S) + \sigma_0 \quad (\sigma_y \leq \sigma_0) \quad (5)$$

$$\alpha = -0.00034 + 0.7324 \times 10^{-6} LP + 2.0576 \times 10^{-6} H$$

$$\beta = 0.002606 + 8.3862 \times 10^{-6} LP - 20.8429 \times 10^{-6} H$$

$$\sigma_{as} = \sigma_y \quad (\sigma > \sigma_y) \quad (6)$$

ここで、

σ_{as} : スタッド軸方向応力 (N/mm²)

E : スタッドの弾性係数 (kN/mm²)

S : 相対ずれ (mm)

σ_0 : 側圧によるスタッドの初期応力 (N/mm²)

σ_y : スタッドの降伏応力 (N/mm²)

図-16 低側圧比におけるモデルの適用性
(スタッド軸方向応力-相対ずれ)

LP : 側圧比 (%)

H : スタッド高 (mm)

とする。

また、図-16に構築モデルの低側圧比への適用性の検討として、側圧比6%における実験供試体H80-T6の実験に対して、構築モデル式(5)および式(6)を適用した結果を示す。構築したモデルと供試体H80-T6との比較を行うと、本構築モデルは、相対ずれの増加に伴うスタッド軸方向ひずみの増加率である傾きを精度良く評価しており、低側圧比にも適用可能であると考えられる。

せん断耐力およびスタッド軸方向応力はパラメータとしての側圧比、スタッド高およびスタッドの降伏に関係しており今回算出したような推定式のように式(3)、(4)、(5)および(6)のそれぞれを独立ではなく従属に評価、考察することが重要であると思われる。また、さらに広範囲におけるスタッド高への適用性に関して、構築した側圧およびスタッド高依存型モデルはスタッド1本に対して構築されたものであるため、スタッドの本数、スタッドの径或いはコンクリート強度等への本モデルの拡張および解析的検討と本モデルとの適用性評価は今後の課題としたい。

5. 結論

本研究では、鋼コンクリートの付着性状に焦点を当て、パラメータとして側圧およびスタッド高が鋼コンクリートに及ぼす影響を評価するため、引張力を載荷した状態での改良型押し抜き試験を実施、考察し、実験データを用いた鋼コンクリート界面における耐荷力モデル式の提案を行った。

本実験で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) スタッド高を高くすることは、コンクリートとスタッドの付着面積増加に伴い、最大相対ずれが大きくなり、最大せん断応力がわずかであるが大きくなる傾向にあった。
- (2) 側圧比が大きくなることは、スタッドの軸方向ひず

み成分が増加し鋼コンクリート界面の開きおよび破壊面の形成を促進し、最大せん断応力および最大相対ずれが小さくなる。

- (3) 実験パラメータとして側圧比およびスタッド高を変化させてもせん断応力の増加経路には変化はみられず同じような経路で上昇する。
- (4) 本研究におけるせん断応力-相対ずれ関係に関する構築モデルは、スタッド高 100 および 120mm において比較的良い精度を示した。
- (5) 複合応力状態下におけるスタッドのせん断耐力は、作用側圧により変化しコンクリート破壊、スタッド破壊を同様に評価するのは困難であると思われる。
- (6) 初期値としての側圧比の大きさがせん断荷重載荷後のスタッド変形性状に大きな影響を及ぼす。

参 考 文 献

- 1) 笠井祐次, 河村哲男, 大下英吉: スタッド付き鋼・コンクリート界面の付着性状に及ぼす側圧効果の影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.2, pp.1-13, 2002.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-2, 日本建築学会他, 1998
- 3) 土木学会構造工学委員会鋼・コンクリート合成構造小委員会: 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 土木学会, 1989
- 4) 黒木勇人, 太田貞次, 香月智, 石川信隆: C F T 柱・合成コンクリート梁接合部の高速破壊実験, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1439-1450, 1999, 3.
- 5) 大谷恭弘, 馬場真吾, 森戸義貴, 福本昤士: 組合せ荷重を受けるスタッド・アンカーの挙動, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1387-1396, 1991, 3.
- 6) 笠井裕次, 山野誠悦, 河村哲男, 大下英吉: 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集, Vol.22, No.3, pp.1171-1176, 2000.
- 7) 成瀬勝武, 鈴木俊男: 橋梁工学 (鋼橋編), 森北出版, pp.245-253, 1999.

(原稿受理年月日: 2002 年 9 月 6 日)

Experimental Study on Bond Characteristic Depending on Lateral Tensile Stress between Steel Plate with Stud and Concrete

By Masashi Toyama and Hideki Oshita

Concrete Research and Technology, Vol.15, No.1, Jan. 2004

Synopsis: In this study, a qualitative and quantitative estimation of bond characteristic under comprehensive stress state due to applying the lateral pressure with tensile stress in the direction of a stud axis, was carried out. As a result, it is noted that a bond characteristic was greatly influenced of a lateral pressure with tensile stress and then a bond characteristic depending on lateral pressure was constructed.

Keywords: composition structure, stud, bond characteristic, depending on tensile stress