

鋼コンクリート複合構造の性能評価のための付着力評価

Evaluation of Performance of Interface Bonding of Steel-concrete Hybrid Structures

菊地 浩貴*

Hiroki KIKUCHI

*構造強度学研究室（研究指導教員：齊木功 准教授）

For the best performance of hybrid structures, it is essential to combine different kinds of materials. Although bonding and friction are the primitive mechanisms of the combination, the present design codes of steel-concrete hybrid structures consider only shear connectors for the combination. In order to make the design of hybrid structures more rational, it is of advantage to understand bonding and friction. Therefore, an element test that can accurately evaluate bonding and friction is developed so that the primitive mechanisms of combination are clarified and utilized for the design.

Key Words : steel-concrete, hybrid structure, bonding, friction, element test

1. まえがき

近年，橋梁をはじめとした構造物に様々な形式の鋼コンクリート複合構造が考えられてきている．複合構造は，異種材料が一体化することによって優れた性能を発揮する．異種材料の一体化はずれ止めなどの機械的抵抗によって担保され，ずれ止め固有の強度は過去の研究成果によって評価がなされている．しかし，一体化を微視的にみると付着力・摩擦力・支圧力が一体化の基本要素となる．これらの微視的な力を考慮することによって，構造物の合理的な設計や新たなずれ止め形式を開発できる可能性がある．付着力・摩擦力の評価方法として，図-1 に示す押し抜き試験^{1),2)}などがあるが，反力板付近の界面でせん断応力が集中する問題点などがあり未だその方法は確立されていない．そこで本研究では，秋元ら³⁾によって提案されたねじりせん断試験を改良することによって，付着と摩擦の評価を行い支圧力やコンクリート強度が付着力に及ぼす影響を調べる．

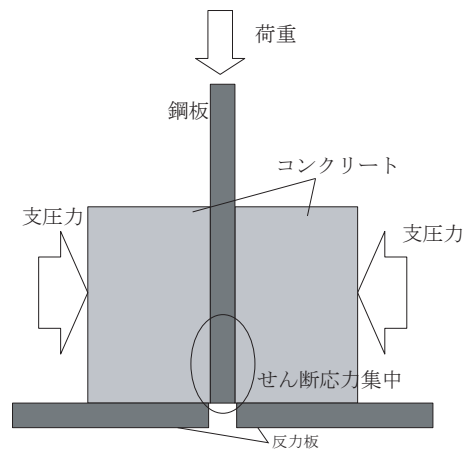


図-1 押し抜き試験体

2. 実験方法

(1) 試験体

押し抜き試験において，反力板付近の界面でせん断応力が集中する問題点があったので，図-2 に示すせん断方向に境界がないねじりせん断試験の開発を行っている．しかしながら，これまでは乾燥収縮によると思われるひび割れが試験前に多数生じ，付着力の測定に影響を及ぼした可能性があった．そこで本研究ではひび割れを防止するために，直径 6 mm の鉄筋をらせん状に 3 段配筋し，水中で養生を行った．また既往の研究の結果と比較を行うために，普通ポルトランドセメントを使用した．さらにコンクリート強度が付着強度に及ぼす影響を調べ

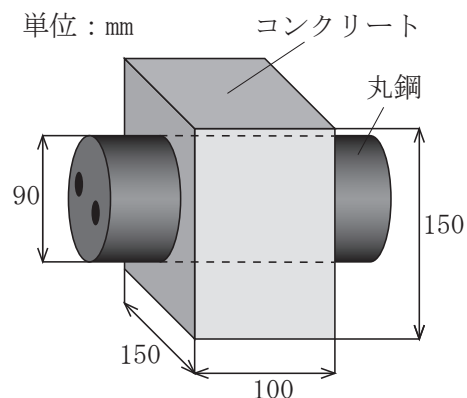


図-2 ねじりせん断試験体

るために，圧縮強度の異なる三種類の配合のモルタルを使用した．

(2) 試験装置

試験体には，鋼・コンクリート界面周辺が等方圧縮状態になるように，鉛直方向と水平方向に同等の支圧力を

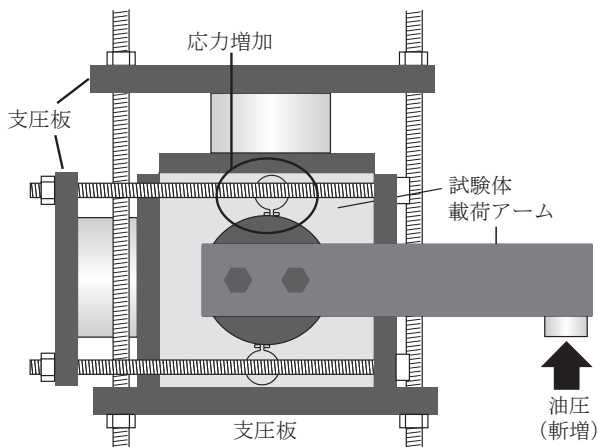


図-3 ねじりせん断試験

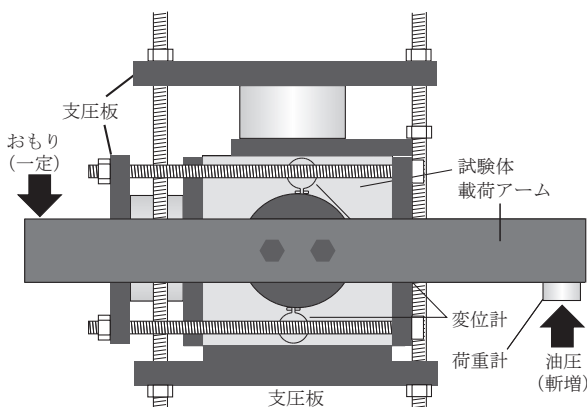


図-4 改良型ねじりせん断試験

与えて試験を行う。これらの支圧力を与える際は、鉛直方向と水平方向の支圧力の差が $\pm 2 \text{ kN}$ (0.13 MPa)以内となるようにして与えていく。支圧応力が付着強度に及ぼす影響を明らかにするために、 0.0 MPa と 0.25 MPa と 0.5 MPa の三種類の支圧応力に対して試験を行った。

図-3に示すような秋元らによって提案されたねじりせん断試験では、ジャッキによる上向き荷重のみを載荷した。そのため試験体にトルクだけではなく上向きの力が加わり、図-3中の丸で囲まれた部分で圧縮応力が増加してしまい、等方圧縮状態とはならない問題点があった。よって本研究では、図-4のように載荷アームの中心を回転軸とし、片側を油圧ジャッキで載荷し、その反対側におもりを載せて試験を行った。この試験方法を改良型ねじりせん断試験と呼ぶ。この改良型ねじりせん断試験を試験体数31体に対して行った。

鋼・コンクリート界面のずれ変位は、クリップ型変位計を用いて測定した。ずれ変位の測定箇所は鋼円柱の上面に2箇所と下面に2箇所の計4箇所に設置した。また4箇所の変位の平均値をずれ変位と定義した。それぞれの荷重・支圧・ずれ変位は4秒間隔で測定していく。測定は荷重レベルがほぼ一定になった時点で終了した。

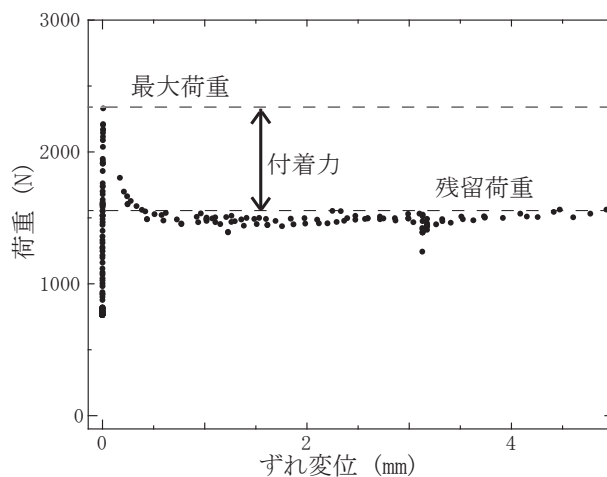


図-5 最大・残留荷重と付着力の関係

3. 試験結果と考察

(1) 付着強度と摩擦係数の算定

代表的な荷重変位関係を図-5に示す。ずれ変位が 2 mm 以降ではほぼ一定の荷重レベル (2 mm 付近と 4 mm 付近の差が $-15 \sim 8 \%$)となるので、ずれ変位が 2 mm 付近での極大値を残留荷重とする。この残留荷重は摩擦力の大きさを表している。本研究で着目している摩擦は静摩擦なので、静摩擦を表す極大値を残留荷重と定義した。最大荷重と残留荷重の差を付着力と定義する。さらに同じ残留せん断応力と支圧応力関係での残留せん断応力の傾きを摩擦係数と定義する。

界面に働く最大せん断応力 τ_{\max} と残留せん断応力 τ_{res} と付着強度 τ_{bond} は以下の式で求められる。

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}L}{rA}, \quad \tau_{\text{res}} = \frac{F_{\text{res}}L}{rA}, \quad \tau_{\text{bond}} = \tau_{\max} - \tau_{\text{res}} \quad (1)$$

ここで、 F_{\max} と F_{res} は最大荷重と残留荷重、 L と r はアームの長さ、 A は鋼・コンクリート接触面積である。式(1)より付着強度を求めると表-1となる。

最大荷重に達した瞬間(付着破壊時)に、試験体には写真-1の位置にひび割れが生じた事が確認できた。ひび割れが生じた後に付着破壊が生じている可能性があるもので、本来の付着強度はさらに大きい可能性がある。

(2) 支圧応力と付着強度の関係

表-1より、支圧応力と付着強度の関係を図-6に示す。図-6より、付着強度は支圧応力の影響を受けていると考えられる。最小二乗近似線の傾きは、圧縮強度が 12.4 MPa の時は -0.44 、圧縮強度が 27.8 MPa の時は 0.63 、圧縮強度が 35.0 MPa の時は 0.81 であった。圧縮強度が 12.4 MPa のときを除くと、支圧応力と付着応力には正の相関があった。前述したように最大荷重に達した瞬間に、ひび割れが生じていた。しかし支圧力による圧縮によってコンクリートの引張応力が低下するため、

表-1 実験結果

圧縮強度 (MPa)	支圧応力 (MPa)	試験体数	付着強度 (MPa)	摩擦係数
12.4	0.0	3	0.706	0.771
	0.25	3	0.589	
	0.5	2	0.502	
27.8	0.0	4	1.348	0.882
	0.25	4	1.330	
	0.5	4	1.631	
35.0	0.0	3	1.587	0.800
	0.25	4	1.587	
	0.5	4	1.940	

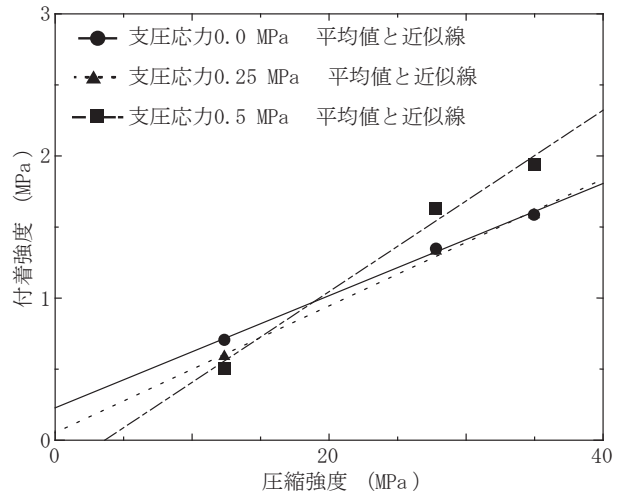


図-7 圧縮強度と付着強度の関係

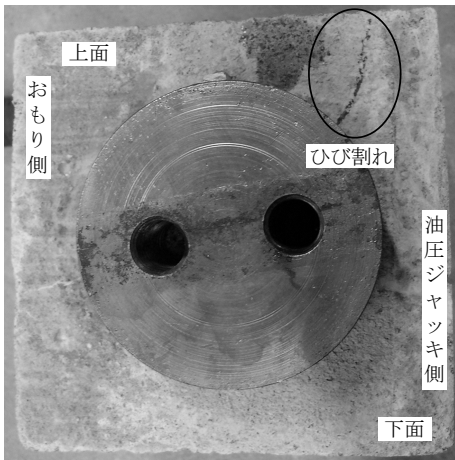


写真-1 試験体に生じたひび割れ

表-2 既往の研究との比較

試験方法	圧縮強度 (MPa)	支圧応力 (MPa)	付着強度 (MPa)	摩擦係数
押し抜き ¹⁾	33.1	0.4	0.259	0.250
押し抜き ²⁾	30.3	0.4	0.350	0.405
押し抜き ⁴⁾	36.5	0.4	0.455	0.577
押し抜き ³⁾	31.1	1.0	0.22	0.35
ねじり ³⁾	26.9	1.0	0.72	0.49

ことが分かる．圧縮強度 12.7 MPa と 35.0 MPa の結果を比較すると、圧縮強度の比 2.8 に対して、付着強度は支圧応力 0.0 MPa の時は 2.2 倍、支圧応力 0.25 MPa の時は 2.7 倍、支圧応力 0.5 MPa の時は 3.9 倍となった．

(4) 既往の研究との比較

既往の研究より得られた支圧応力と摩擦係数を表-2 に示す．表面処理など実験の条件が異なるので単純に比較することは難しい．ほぼ同程度の圧縮強度で支圧応力である圧縮強度 35.0 MPa で支圧応力 0.5 MPa の時の付着強度と既往の研究で得られた付着強度を比較すると、2.7 ~ 8.8 倍大きいことが分かる．改良型ねじりせん断試験では、界面に応力集中が生じていないため、押し抜き試験より大きな付着強度が得られたと考えられる．

同様に、摩擦係数を比較する．摩擦係数は鋼材の表面状態に大きく依存する．既往の研究では表面状態がそれぞれ異なっている．したがって摩擦係数もそれぞれ異なっている．本研究で得られた摩擦係数は既往の研究より 2 倍近く高かった．摩擦係数が大きくなった表面状態以外の要因として、鋼材の形状が真円ではないためと考えられる．

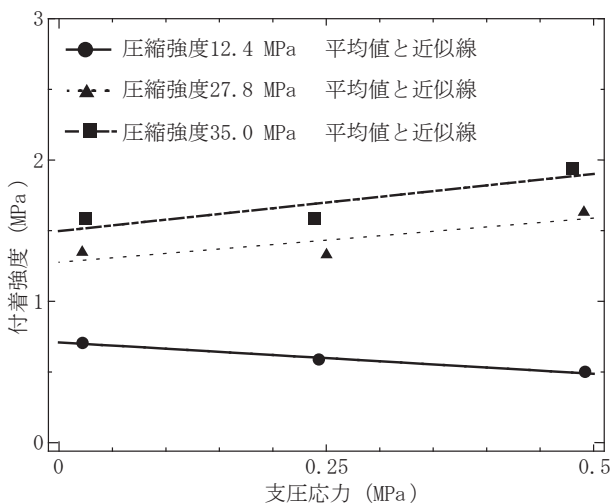


図-6 支圧応力と付着強度の関係

支圧力が最大荷重に影響を及ぼしたと考えられる．

(3) 圧縮強度と付着強度の関係

表-1 より、圧縮強度と付着強度の関係を図-7 に示す．図-7 より、圧縮強度と付着強度には正の相関がある

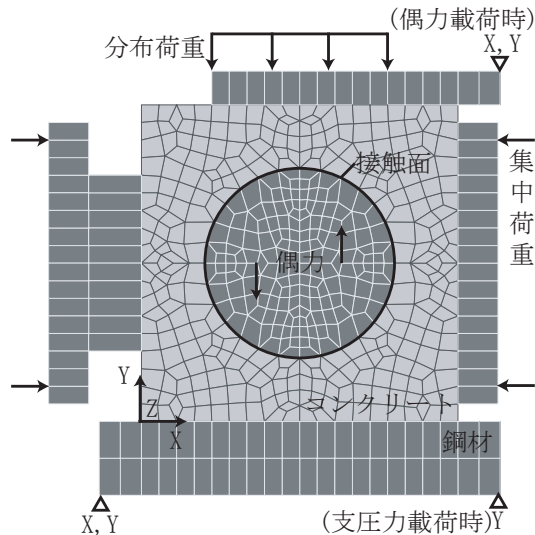


図-8 モデル図 (支圧応力 0.5 MPa)

表-3 各支圧応力における X 方向直応力

支圧応力 (MPa)	0.0	0.25	0.5
最大引張応力 (MPa)	0.509	0.329	0.205

4. 解析

支圧応力に対する依存性について議論するために接触解析を行った。図-8のように支圧板と試験体をモデル化した。また支圧力を载荷後に偶力を与えて接触解析を行った。図中のカッコ内に示すように、境界条件は支圧力载荷時と偶力载荷時で異なる。偶力载荷時は支圧力を与えた節点に支圧力载荷方向の変位も拘束した。

支圧応力 0.5 MPa を与えた時の界面の接触力ベクトルを図-9に示す。その方向は界面に対してほぼ法線方向に作用していることが分かる。接触力ベクトルのノルムの平均に対してばらつき (ノルム / ノルムの平均) は、-57~77%であった。これは、支圧力を試験体全体に载荷していなかったことが原因と考えられる。

支圧応力 0.5 MPa と与えた後に偶力を与えた時、界面にすべりが生じる前の界面付近のコンクリートの X 方向直応力を図-10に示す。写真-1のようにひび割れが生じた位置で引張応力が最大となっていることが分かる。

各支圧を与えた後に偶力を与えた時、界面にすべりが生じる前の界面付近のコンクリートの最大引張応力を表-3に示す。表-3より、この X 方向直応力と支圧応力は負の相関があることが分かる。実験で得られたように、支圧による圧縮が引張応力を緩和していることが分かる。

5. まとめ

本研究ではねじりせん断試験を改良して付着強度を評価した。試験方法を改良したことにより、既往の研究よ

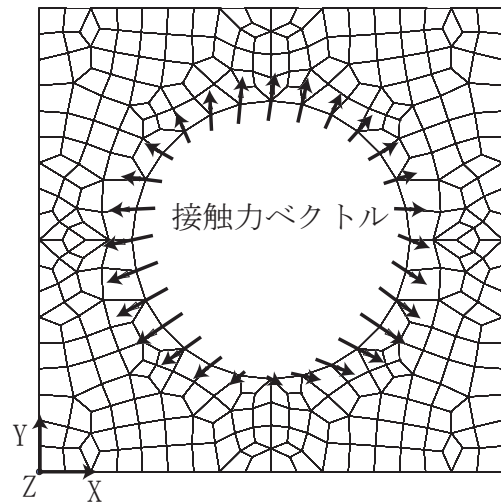


図-9 界面の接触力ベクトル (支圧応力 0.5 MPa)

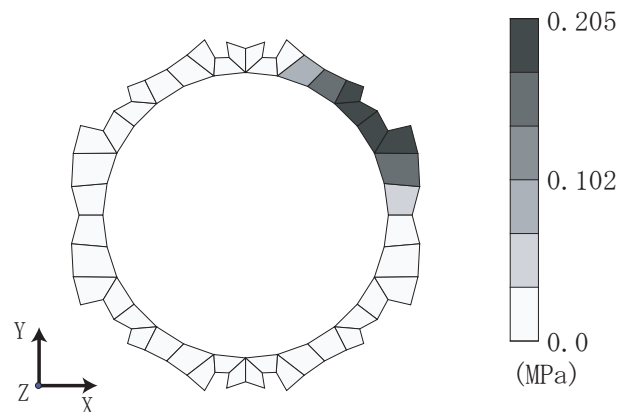


図-10 界面付近の X 方向直応力 (支圧応力 0.5 MPa)

り大きな付着強度が得られた。また、コンクリートの圧縮強度と付着強度には正の相関があることが分かった。改良型ねじりせん断試験では、支圧応力と付着強度に弱い相関が見られたが、コンクリートに生じる引張応力が原因であると考えられるので、試験方法のさらなる改良が考えられる。

参考文献

- 1) 中島章典, 西村美也子, 斉木功, 大江浩一: 鋼・コンクリート接触面の支圧摩擦性状に及ぼす支圧負荷方法の影響, 鋼構造論文集, Vol.12, NO.45, pp.185-192, 2005.
- 2) 中島章典, 猪股勇希, 齋川幾美, 大江浩一: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, pp.758-767, 2007.
- 3) 秋元秀之, 菊地浩貴, 斉木功, 岩熊哲夫: 鋼コンクリート界面の付着力評価のための試験方法の検討, 第 64 回年次学術講演会講演概要集, 2009.
- 4) 猪股勇希, 中島章典, 斉木功, 大江浩一: 支圧力作用下における鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着特性, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1083-1090, 2006.

(2010年2月8日提出)