

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760296

研究課題名(和文) 鋼・コンクリート複合構造ずれ止めの数値モデルの構築と
結合部の性能照査研究課題名(英文) Performance based design of connections and development of a
numerical model for shear connector of steel and concrete hybrid structures

研究代表者

齊木 功 (SAIKI ISAO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40292247

研究成果の概要(和文)：従来行われてきたせん断試験において避けることのできなかつた界面端部で生じる応力集中を回避するためのねじりせん断試験を提案した。さらに、提案したねじりせん断試験により、鋼・コンクリート界面の付着強度を評価した。本試験により、界面端部の応力集中が回避され、既往の研究より大きい、界面が本来有していると思われる付着強度が得られた。また、コンクリートの圧縮強度を変化させることによって、圧縮強度と付着強度の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A torsional shearing test which is able to avoid stress concentration inevitable in conventional shear tests. By virtue of the proposed test, bonding strength of steel and concrete interface has been evaluated. Throughout a series of the torsional shearing tests, the relation between concrete strength and bonding strength has been revealed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学，複合構造，計算工学

1. 研究開始当初の背景

鋼とコンクリートの一体化は、複合構造としての性能を発揮する前提条件であり、複合構造の設計において結合部の性能を保証することは最も重要な事項の一つである。しかしながら、結合部における応力伝達機構は、合成桁のような比較的単純な構造を除いて、明らかになっていない。そのため、簡便で汎用性のある結合部の性能照査法は確立されていない。さらに、新しい複合構造結合部の開発に際しては、異種材料間の応力伝達機構

が不明確なことが多く、その場合は模型実験によって安全性を担保せざるを得ないのが現状である。模型実験は多大なコストと時間がかかるため、安価かつ高性能なコンピュータが利用できる現在では非線形有限要素解析による性能照査に対する期待が高まっている。

このような背景のもと、土木学会の調査研究部門の複数の委員会において、有限要素解析による構造物の性能照査法の確立を目指した活動がなされている。有限要素解析自体

は完成された技術であるが、結合部の高精度な解析を行うためにはずれ止めを含む鋼・コンクリート界面のモデル化が未解決かつ重要な課題である。

複合構造の結合部の有限要素解析を行うためには、ずれ止めも複数の有限要素として詳細にモデル化する方法と、ずれ止めを一つの非線形「ばね」とするマクロ的なモデル化の方法の2通りが考えられる。前者は高速な計算機を利用できる現代においても、モデル化・解析のコストの面から現実的ではない。本研究では後者のアプローチを取ることとなるが、以下のような問題点が残されている。

- (1) ずれ止めをばねとしてモデル化するためには、各種ずれ止めのせん断力-相対変位関係をモデル化する必要があるが、そのための十分な研究成果がない。
- (2) ずれ止めの要素試験に関する研究はいくつか行われているが、要素試験が実構造中のずれ止めの挙動を正確に表しているという裏付けは取られていない。

上記(1)の問題点を解決するためには、実用化されているずれ止め種類、寸法のせん断力-相対変位関係を計測する実験を網羅的に行うか、現状で利用可能な実験結果を有限要素解析などを利用して補間するといった手段が考えられる。本研究では、まず界面の数値モデルを構築し、それをを用いて後者のアプローチにより要素試験の詳細な有限要素モデルに基づく非線形解析を行い、ずれ止めのせん断力-相対変位関係を規定する。また、(2)の問題点を解決するためには、試験体と実構造におけるずれ止めの挙動の対応関係を明らかにする必要がある。これに対しては、数学的平均化手法である均質化法を用いて、要素試験では避けられない境界の影響を定量的に評価する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点である。

- (1) 鋼とコンクリートの界面(以下、界面と呼ぶ)に生じる付着および摩擦によるせん断応力伝達機構を実験により解明する。
- (2) 鋼とコンクリートの一体化のために用いられているずれ止めのせん断力-相対変位関係を実験および(1)の結果を踏まえた有限要素接触解析によりモデル化する。

3. 研究の方法

- (1) 要素試験による異種材料間応力伝達メカニズムの解明

過去の研究において、図1に示す小型の要素試験を用いて、支圧力が作用する鋼とコンクリートの界面に作用する付着力、摩擦力についての検討を行った。この試験体においては、下方が固定端となっており、その影響が避けられていない。しかし、このような境界

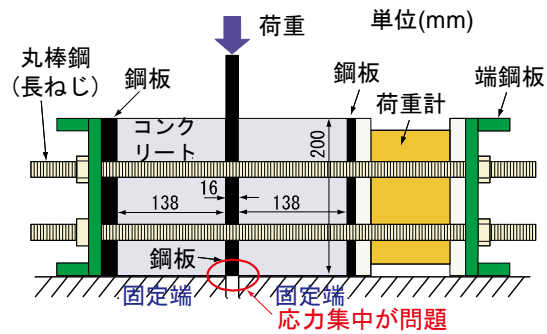


図1. 従来の試験体

が要素試験の結果に及ぼす影響についてはこれまで言及されたことはない。そこで、付着力を正確に計測するため境界の影響を可能な限り排除できるように、過去の研究で開発した接触解析手法を用いて、試行錯誤的に試験体を設計する。また、せん断力-ずれ変位関係の履歴特性を調べたいので、正負交番載荷が可能な試験体とする。

- (2) 鋼・コンクリート界面の要素試験の実施
決定した試験体により、単調載荷、および正負交番繰り返し載荷を行い、せん断力-ずれ変位関係を計測し、界面の付着・摩擦特性を詳細に検討し、界面のせん断力-ずれ変位関係の数値モデルを構築する。

- (3) 界面の数値モデルの構築

(1)および(2)で、要素試験の形状、載荷履歴が界面のせん断力-ずれ変位関係へ及ぼす影響を詳細に検討したので、この結果を踏まえて、有限要素接触解析に用いる界面の数値モデルを構築する。過去の研究で開発した接触解析手法においては、界面は作用するせん断応力が付着強度に達するまではずれ変位は生じず、付着強度に達するとCoulomb摩擦則に従う剛完全塑性としてモデル化しているが、過去の研究で観察された滑らかな軟化領域を有する弾塑性としてのモデル化を目標としている。このことにより、返し計算の収束性、ロバスト(対破綻)性の向上も目論んでいる。

4. 研究成果

押し抜き試験においては、反力板付近の界面

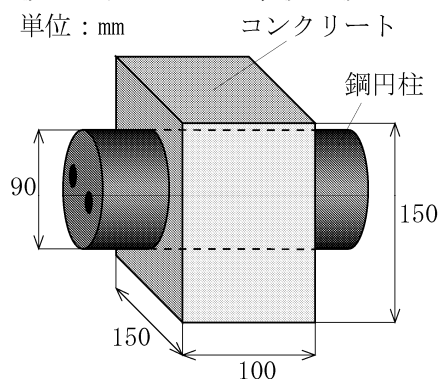


図2. ねじりせん断試験体

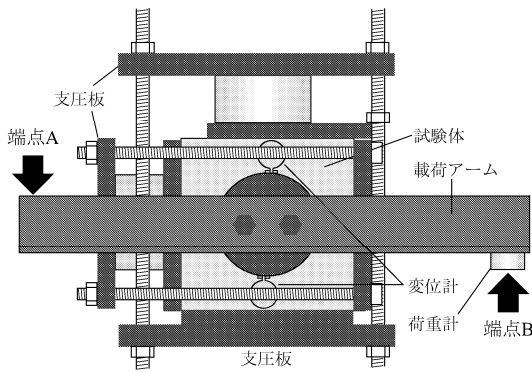


図 3. ねじりせん断試験

表 1. 試験ケース一覧

	圧縮強度 σ_c (MPa)	支圧応力 (MPa)	試験 体数
配合 1	12.4	0.00	3
		0.25	3
		0.50	2
配合 2	27.8	0.00	4
		0.25	4
		0.50	4
配合 3	35.0	0.00	3
		0.25	4
		0.50	4

境界部でのせん断応力の集中が問題となっていた。そこで、図 2 に示すせん断方向に境界がない試験体を用いたねじりせん断試験を提案した。本試験体は、コンクリートブロックと、その中心に埋め込まれた鋼円柱からなる。界面の付着強度、摩擦力に粗骨材がおよぼす影響はないと考え、コンクリートにはモルタルを採用した。コンクリート強度が付着強度におよぼす影響を調べるために、圧縮強度の異なる 3 種類の配合のモルタルを用いて試験体を作製した。本試験体の界面近傍のせん断応力分布が、押し抜き試験と異なり一様になることは、有限要素解析により確認された。

本試験体を用いた試験装置を図 3 に示す。支圧力計測用の荷重計により支圧力を計測しながら鉛直方向と水平方向に等しい大きさの支圧力を与えた。これらの支圧力を載荷する際には、鉛直方向と水平方向の支圧力の差が大きくなるように注意した。摩擦係数を測定するために、0.0MPa と 0.025MPa と 0.50MPa の 3 種類の支圧応力に対して試験を行った。図 3 の紙面手前側および奥側のそれぞれに、载荷アームを試験体中の鋼円柱に固定し、载荷アームの両端点に互いに逆向きの荷重を与えることにより載荷を行った。モルタル強度および支

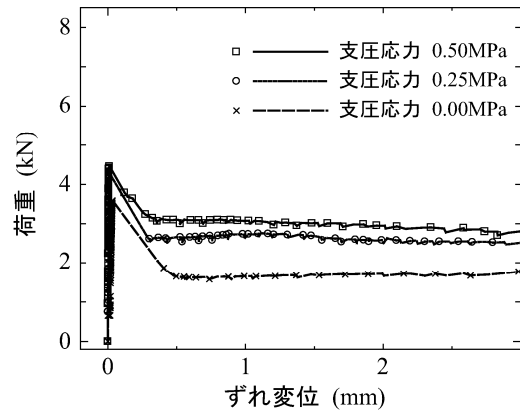


図 4. 代表的な荷重-ずれ変位関係

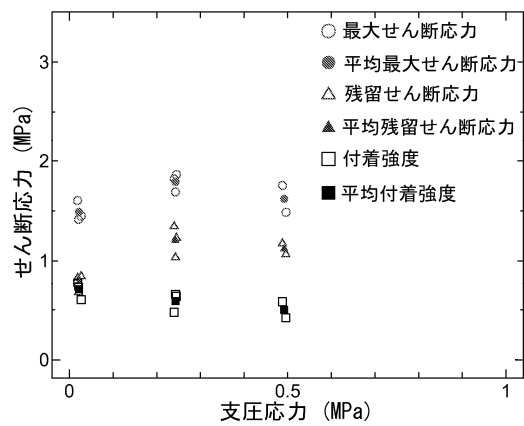


図 5. 最大・残留応力と付着強度

圧応力をパラメータとして、計 31 体の試験体に対して、以上述べたねじりせん断試験を行った。各パラメータと試験体の数を表 1 に示す。

試験で得られた代表的な結果として、配合 1 の試験体に対する荷重-ずれ変位関係を図 4 に示す。いずれの支圧応力に対しても、最大荷重時のずれ変位はほぼゼロであった。最大荷重後は、界面の付着破壊によって急激に荷重が低下した。ずれ変位が 0.5mm 以降になると、荷重はほぼ一定になった。これは、付着破壊が 0.5mm 以下の小さなずれ変位で完了し、その後は摩擦力のみが界面に作用するためである。本試験では、過去の研究で行われた押し抜き試験に比較すると、付着破壊後に摩擦力のみが作用する状態に移行するまでのずれ変位が非常に小さいことから、付着破壊がほぼ同時期に生じていると考えられる。本論文では、ずれ変位が 2mm の点を摩擦力のみが作用する残留荷重と定義した。

荷重-ずれ変位の関係から、最大せん断応力、残留せん断応力を読み取り、付着強度を算定した。3 段階の支圧応力に対して得られた最大せん断応力、残留せん断応力を図 5 に示す。図 5 には、それぞれの支圧応力におけ

表 2. ねじりせん断試験結果

圧縮強度 σ (MPa)	支圧応力 (MPa)	試験 体数	付着強度 τ (MPa)	σ/τ	摩擦 係数
12.4	0.00	3	0.706	0.057	0.771
	0.25	3	0.589	0.048	
	0.50	2	0.502	0.040	
27.8	0.00	4	1.348	0.048	0.882
	0.25	4	1.330	0.048	
	0.50	4	1.631	0.059	
35.0	0.00	3	1.587	0.045	0.800
	0.25	4	1.587	0.045	
	0.50	4	1.940	0.055	

る2ないし3体の結果の平均も示した。摩擦力は支圧力に比例すると考えられるため、支圧力の増加に伴い最大せん断力・残留せん断力ともに増加すると予想されたが、支圧応力0.50MPaの最大せん断応力はそのような予想からするとやや小さめであった。その影響もあり、支圧応力0.50MPaの付着強度はやや小さめであったが、支圧応力によらずほぼ一定の付着強度が得られた。

以上の試験を、配合2および3のコンクリートに対しても行い、得られた付着強度および摩擦係数を表2にまとめた。表中の付着強度は同じパラメータの複数の試験体に対する平均である。また、表には残留せん断応力の支圧応力に対する勾配から求めた摩擦係数も含めた。これらの結果から、モルタルの圧縮強度と付着強度の関係を図6に示す。図にはすべての試験体に対する付着強度が含まれ、それらの最小二乗近似直線も示した。最小二乗近似線の傾きは0.049、切片は0.021MPa、相関係数は0.87であった。最小二乗近似線の傾きより、付着強度はモルタルの圧縮強度の1/20程度であることがわかった。この結果は既往の押し抜き試験の結果の4~7倍程度の大きさであった。このことから、ねじりせん断試験では、押し抜き試験のように界面に応力集中が生じないため、界面が本来有している付着強度が得られたと考えられる。

以上、従来行われてきたせん断試験において避けることのできなかった界面端部で生じる応力集中を回避するためのねじりせん断試験を提案した。さらに、提案したねじりせん断試験により、鋼・コンクリート界面の付着強度を評価した。本試験により、界面端部の応力集中が回避され、既往の研究より大きい、界面が本来有していると思われる付着強度が得られた。また、コンクリートの圧縮強度を変化させることによって、圧縮強度と付着強度の関係を明らかにした。これらは、非線形有限要素解析に基づく鋼・コンクリート複合構造の結合部の性能照査手法に欠かせないものである。

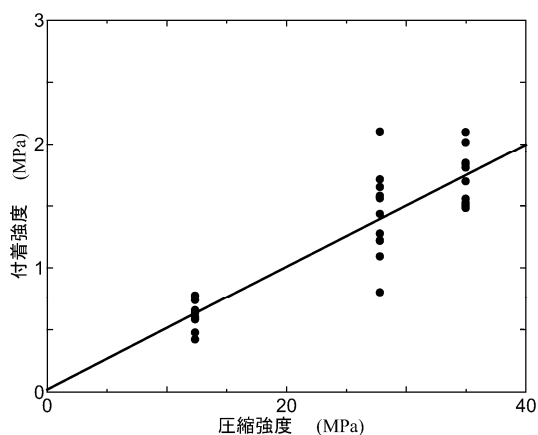


図 6. 圧縮強度と付着強度の一覧

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. 斉木 功, 菊地浩貴, 山田真幸, 岩熊哲夫, 鋼コンクリート界面の付着強度評価法に関する一提案, 土木学会応用力学論文集, 査読有, vol. 13, 2010年, 323-329.
2. 斉木 功, 田中 光, 戸塚 祐, 中島章典, 岩熊哲夫, 2体間ポテンシャルを用いた鋼コンクリート界面の1数値モデル, 土木学会応用力学論文集, 査読有, vol. 12, 2009年, 281-288.

[学会発表] (計3件)

1. 鍵 一彰, 斉木 功, 山田真幸, 岩熊哲夫, 複雑な微視構造を持つ梁の均質化, 土木学会東北支部技術研究発表会, 仙台, 2011年3月5日.
2. 菊地浩貴, 斉木 功, 山田真幸, 井上大資, 岩熊哲夫, 鋼コンクリート界面に作用する付着力評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, 郡山, 2010年3月6日.
3. 井上大資, 斉木 功, 菊地浩貴, 山田真幸, 岩熊哲夫, 接触の非線形挙動を再現可能な平均化はり要素の構築, 土木学会東北支部技術研究発表会, 郡山, 2010年3月6日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉木 功 (SAIKI ISAO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40292247

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：