

(61) 機械的接合部材の無い鋼モルタル界面のせん断応力伝達特性に関する基礎的検討

山田 真幸¹・斉木 功²・横山 薫³・黒澤 明史⁴・岩熊 哲夫⁵

¹正会員 博士(工) 東北大学助教 大学院土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: myamada@civil.tohoku.ac.jp

²正会員 博士(工) 東北大学准教授 大学院土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

³正会員 修士(工) 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) (〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい三丁目3番1号)

⁴学生会員 東北大学修士課程 大学院土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

⁵正会員 PhD 東北大学教授 大学院土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

鋼コンクリート複合構造にはスタッド等の機械的接合が主に用いられているが、本研究ではそれ以外の付着や摩擦等による結合を対象とし、その力学的挙動、強度等を実験的に求めて議論する。付着力や摩擦力等の結合要素の寄与については不明な部分が多く、現状では設計上は機械的接合部材の結合力のみに拠って鋼とコンクリートとの一体化を図っている。そこで本研究では実際に用いられている鋼表面の状態を想定して鋼コンクリート複合構造の接合部を模した供試体を製作し、せん断応力に対する強度を求めると共に防食処理の有無や差異が力学特性に与える影響を検討する。その際には著者らが開発中のトルク型せん断試験装置を用いて鋼コンクリート界面に生じるせん断応力、ずれ変位等を計測し、また試験後の破壊面の状態を計測、観察して考察を行った。

Key Words: steel-concrete hybrid, anti-rust coating, torque shear test, bonding, adhesion, friction

1. はじめに

建設分野では鋼とコンクリートとを組み合わせた複合部材が広く用いられている。鋼とコンクリートとの合成作用を利用するには両者が十二分に一体化している必要があるが、最も一般的な鉄筋コンクリート構造ではその歴史の中で、太径で高強度の鉄筋利用の要求に際して丸鋼を異型鉄筋とすることで鋼とコンクリートとの間に自然的に生じる付着等による結合力に加えて機械的な結合を用いて一体化の強化を図っている¹⁾。

同様に鉄筋に比較してより広範囲で面的な接合部を有する鋼コンクリート複合部材の利用においては付着による結合の信頼性および長期耐久性の観点から頭付スタッドやジベル等の機械的接合部材の開発と使用が行われてきており²⁾、現状の設計指針においても終局状態への配慮等から機械的接合が主に用いられている^{3),4)}。

しかし供用開始から20余年を経た合成床版の下面鋼板が健全でコンクリートの剥離は僅かであった例や⁵⁾、橋齢約30年の非合成桁橋梁で鋼板桁と鉄筋コンクリート床版とが一体となって合成桁として挙動している例が示されており、自然的に生じる付着力等が合成作用を生じるほどの結合力を有している可能性がある^{6),7)}。

この付着等による応力伝達は黒皮あるいはブラスト処理後のプライマーに代表される防食塗膜等の、応力伝達に関して配慮されていない鋼コンクリート界面を

介して行われている。防食処理を施した面的な鋼コンクリート界面の付着に関する研究ではその結合の程度を鉄筋の引抜き試験に準じた実験によって得たものがあるが^{8),9)}、これらは鋼コンクリート界面への雨水等の進入による鋼部材の腐食を防止することを意図しており^{10),11)}、複合部材の一体を担保する結合要素として鋼コンクリート界面の付着が扱われているわけではない。これらの事実を勘案すると平滑な鋼コンクリート界面におけるせん断応力伝達を考える場合には鋼表面の差異による影響を議論することが必要である。

そこで本研究ではこれらの防食処理等が鋼コンクリート間の付着や摩擦による力学的挙動、強度に与える影響を実験的に得て議論する。

2. 供試体とトルク型せん断試験について

鋼とコンクリートとの付着強度試験の方法として鉄筋の引抜き試験に準じたものや頭付スタッドの押抜き試験方法¹²⁾に準じたものがあるが、応力集中の発生や載荷に伴う供試体および載荷装置の変位や変形による2次応力の影響が懸念される。それらの影響に配慮した鋼コンクリート界面のせん断挙動、強度を得る実験方法としてコンクリートに鋼円柱を埋め込み、回転させることで一様なせん断応力を得るトルク型せん断試験が開発されており^{13),14)}、本研究ではこれを用いる。

表-1 供試体防食処理仕様一覧

	表面処理	膜厚(μm)	粗さ(μm)
仕様 1	有機ジンクリッチペイント 30 μm	60	28.9
仕様 2	無機ジンクリッチペイント 30 μm	52	25.9
仕様 3	無機ジンクリッチペイント 75 μm	111	21.3
仕様 4	無機ジンク 75 μm + ミストコート	135	29.5
仕様 5	亜鉛溶射	137	35.4
-	黒皮	-	8.5

表-2 モルタルの配合

W/C (%)	単位水量 (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)	
		セメント	細骨材
50	295	590	1027

本研究では建設分野で用いられている防食処理について表-1に示す5種類を対象とした。仕様1~3は広く用いられ多くの実績があるものであり、仕様2は近年床版と接する鋼桁上フランジ等に広く用いられ、仕様3はそれを厚膜化したものである。仕様4は仕様3上に上塗り塗膜の発泡やピンホール発生防止のために行われるミストコート処理まで施したものである。仕様5は溶射表面の凹凸により付着力を増す為に封孔処理をしていない。これらの製作における素地調整、施工等は文献¹⁵⁾に基づいている。表中には塗膜厚の実測値およびRzjis表面粗さも示した。また比較のため黒皮のまま防食処理を施さない供試体も同時に製作した。

これらの防食処理を施した鋼材を被覆するコンクリートを模擬するものとして、配合や施工に起因した試験時の材料特性のばらつきを最小限に抑える目的で普通ポルトランドセメントによるモルタルを用いた。ここでは粗骨材の鋼コンクリート界面に与える影響は小さいと仮定しており、混和材等は用いていない。また乾燥収縮を防ぎ、かつ養生条件の差異の影響を防ぐ目的で20℃に保った水中で養生した。配合を表-2に示す。

用いた供試体の型枠と試験前の外形を図-1に示す。側面に防食処理を施した直径90mmの鋼円柱を型枠中に立てて設置しモルタルを打設した。型枠には不要なクラックの発生を防ぐ目的で鋼円柱の周りに直径2mmのスパイラル筋を、側面には鋼メッシュを配してある。モルタルブロックは一辺が150mm、厚さが100mmで、鋼円柱側面とモルタルブロックとの境界で複合構造の鋼コンクリート界面を模擬している。せん断試験は全ての仕様に対して3体づつ実施することとし、18体の供試体は一回のモルタル施工で製作した。試験時の供試体の材令は28~30日であり、モルタルの圧縮強度は $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の円柱形供試体で $42.5 \text{ N}/\text{mm}^2$ であった。

トルク型せん断装置に取付けた供試体を図-2に示す。PC鋼棒と鋼板等で構成された中央の供試体支持部にモルタルブロック側面を固定し、鋼円柱を2本のトルクアームを介して駆動することで鋼モルタル界面に一樣なせん断応力を発生させる。ここでは供試体の固定に際

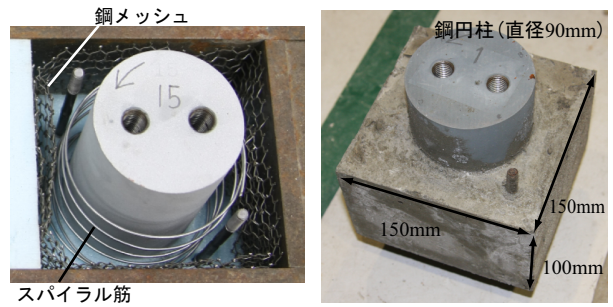


図-1 打設前型枠と供試体外形

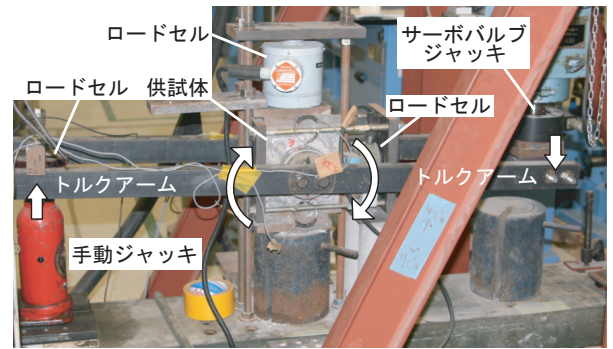


図-2 トルク型せん断試験装置と供試体

し鋼コンクリート界面に応力を発生させる目的で支持力を与えていない。駆動力の発生は2台の油圧ジャッキにより、手動ジャッキで生じた荷重をロードセルで検知してそれと等しい荷重をサーボバルブジャッキで発生させている。鋼モルタル間のずれ変位の計測にはCTOD測定用のクリップ型変位計を用いて4点で計測し、以降ではそれらの平均値を用いている。

図-3、4にトルク型せん断試験により得られた鋼モルタル界面のせん断応力と鋼モルタル界面のずれ変位との関係を示す。計測間隔は2秒で、用いた供試体の各々1体について示した。全ての供試体でずれ変位が生じないまません断応力が増加し、ある時点でずれ変位が変位が急激に増加し同時にせん断応力が減少する。この時に音が生じることもあり、この時点で鋼モルタル界面の付着による結合が破壊されたと考える。本研究ではこの载荷段階で計測される最大値を最大せん断応力と称し、付着による鋼モルタル界面の結合の程度を表す強度パラメータとして用いる。

以降はずれ変位が0.5mm程度生じるまでせん断応力は急激に減少し、以降は概ね一定値となる傾向があった。この载荷段階で鋼モルタル界面に生じるせん断応力は摩擦等で伝達でされるせん断応力の程度を表すものとする。ずれ変位が1.0mm程度に達した以降で値の変化が収まるものが多かったことから、本研究ではずれ変位が1.0~2.0mm、あるいは1.5~2.5mmにおけるせん断応力の平均値を求め、これを残留せん断応力と称して以降用いる。また本研究では試験後に鋼コンクリート境界面を観察する目的で、ずれ変位が2.0mm

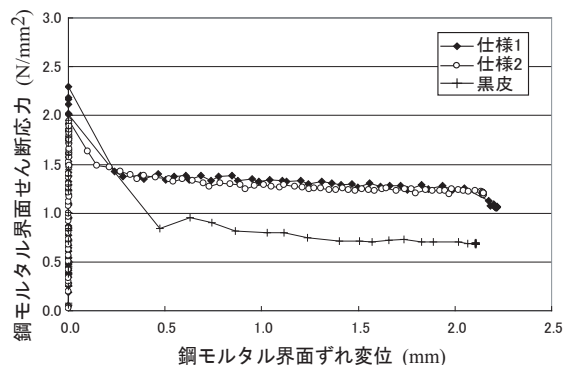


図-3 鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位 (仕様1,2, 黒皮)

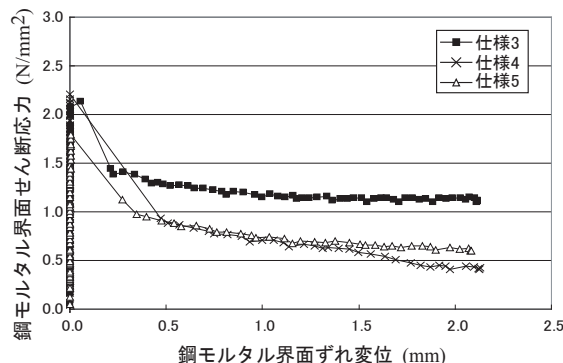


図-4 鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位 (仕様3,4,5)

表-3 トルク型せん断試験による最大せん断応力

供試体 防食仕様	1 体目	2 体目	3 体目	平均値と 不偏標準偏差
仕様 1	2.40	2.00	2.29	2.23 (0.21)
仕様 2	2.02	2.12	1.94	2.03 (0.09)
仕様 3	1.57	1.71	2.13	1.80 (0.29)
仕様 4	1.69	2.02	2.20	1.97 (0.26)
仕様 5	1.98	2.26	1.80	2.01 (0.23)
黒皮	1.80	1.81	2.01	1.87 (0.12)

※単位は N/mm^2 , () 内は不偏標準偏差

を超えた時点でせん断試験を終了した。

3. 防食仕様を有する鋼コンクリート界面の最大せん断応力の比較

ここでは最大せん断応力について比較検討する。トルク型せん断試験により計測された最大せん断応力を表-3に示す。表中の3体目と表示したものは図-3, 4に示したものである。これらの結果を用いて各仕様の最大せん断応力の平均値の大小について母分散が等しいとの仮定の下で t 検定を行った¹⁶⁾。その結果全ての組合せで平均値が等しいとした帰無仮説は危険率5%で棄却できなかった。

(1) 黒皮の供試体との比較

比較として筆者らが別途行ったトルク型せん断試験のうち、本研究で扱った黒皮の供試体と同じ供試体を用いた試験結果を表-4に示す。ここでは試験時に計測

表-4 本試験と同条件の供試体によるせん断試験結果 (黒皮)

試験 No.	供試 体数	モルタル圧縮 強度 (N/mm^2)	最大せん断 応力 (N/mm^2)	残留せん断 応力 (N/mm^2)
1	3	42.1	2.46 (0.35)	0.90 (0.04)
2	3	41.6	2.36 (0.25)	0.93 (0.11)
3	3	41.6	2.37 (0.31)	1.05 (0.03)
4	3	42.6	1.87 (0.12)	0.76 (0.08)
5	4	43.6	2.23 (0.22)	0.95 (0.09)
6	3	45.1	2.48 (0.04)	0.82 (0.09)
—	平均	42.8	2.29	0.91

※材令は 29~31 日, () 内は不偏標準偏差

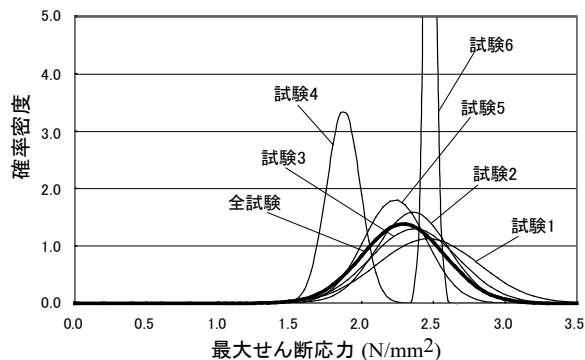


図-5 本試験と同条件の試験による最大せん断応力 (黒皮)の試験毎の真値の確率密度関数

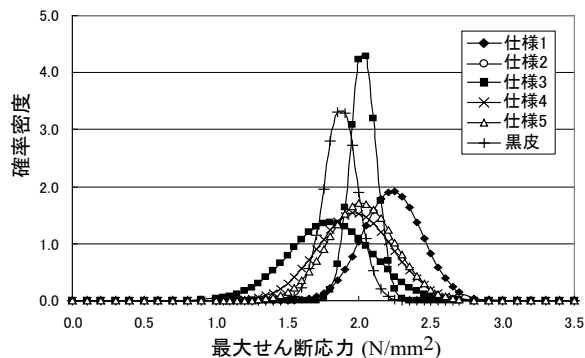


図-6 各仕様の最大せん断応力の真値の確率密度関数

したモルタル圧縮強度が $41.6 \sim 45.1 \text{ N}/\text{mm}^2$ である、本研究での値の $42.5 \text{ N}/\text{mm}^2$ に近い、6回の試験における合計19体の供試体の結果を選んだ。また表中にはずれ変位 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ で求めた残留せん断応力についても示した。これらの結果より、各試験毎に最大せん断応力の真値の正規分布を仮定し、確率密度関数をグラフ化したものを図-5に示す。また図-5と同様に、本試験の結果について真値の正規分布を仮定し、確率密度関数をグラフ化したものを図-6に示す。

図-5の黒皮の供試体では、試験 No.4 および 6 で確率密度関数の分散が他の試験より小さくなっているが、その他の試験 No.1~3 および 5 は比較して広い分散を持った関数の形状となっている。図中には19体の試験結果全てから求めた確率密度関数も合わせて示した。同じ供試体を用いていることから各試験で得られる真値が等しいと仮定すると、試行回数を増やせば確率密度



図-7 エポキシ系接着材で鋼モルタル界面を接合した供試体
(左:製作中の供試体, 右:トルク型せん断試験後)

関数の形状はこの関数の形状に似たものになると考える。試験 No.1~3 および 5 の確率密度関数は試験結果全てから求めた確率密度関数の形状と似たものとなっており、またそのピーク位置も概ね等しいことから、試験 No.1~3 および 5 による確率密度関数は有る程度真実に近いものと考えられる。

ここで図-6 と図-5 とを比較すると各仕様で得られた最大せん断応力の平均値は図-5 と比較すると小さな値をとっている。図-6 の仕様毎の確率密度関数の形状に注目すると、仕様 3 と黒皮で分散が小さいものとなっているが、他の仕様については図-5 に示した試験 No.1~3, 5 と近い形状となっており、またお互いに重複している。仕様 3 と黒皮に関しては図-5 より試行回数を 4 回以上に増やした場合には分散が増加すると予想され、最大せん断応力の真値の範囲はここで得られた範囲に比較して広がると予想できる。これらより防食仕様の差異によって最大せん断応力の平均値には差がないと判断することは妥当であると考えられる。

(2) エポキシ系接着材で接合した供試体との比較

上で示した最大せん断応力は全ての供試体でずれ変位ゼロで生じており、付着による結合の挙動の特徴であると思われる。そこで本研究では鋼モルタル界面に付着ではない結合を付与し、その挙動と付着による結合の挙動とを比較する。ここではコンクリート構造物の補修等に用いられているエポキシ系接着材を用いて供試体を製作した。

供試体は 12 体製作し、10 体についてトルク型せん断試験を行った。鋼円柱の表面は黒皮であり、外形、配筋等の諸元は前述の全ての供試体と同じである。モルタルの配合は表-2 に等しく、打設後 30 日でトルク型せん断試験で鋼モルタル界面の結合を破壊、その後ダイヤモンドカッターでモルタルブロックを切断して鋼モルタル界面にエポキシ系接着材を塗布し、鋼円柱と接合して組み立てた。モルタル圧縮強度は材令 30 日で 43.6 N/mm^2 、接着後に養生期間として 1 週間空け、材令 56~57 日でトルク型せん断試験を実施した。製作中およびせん断試験後の供試体を図-7 に示す。

表-5 エポキシ系接着材を用いた供試体によるトルク型せん断試験結果

供試体 No.	最大せん断応力 (N/mm^2)	残留せん断応力 (N/mm^2)	ブロックの接合	接着材厚さ (μm)
2	2.14	1.22	左右	512
3	2.27	1.21	上下	592
4	1.56	0.81	左右	638
5	1.66	0.56	左右	563
6	2.00	0.94	上下	540
8	1.59	0.88	左右	480
9	2.33	0.83	上下	512
10	2.13	0.80	上下	528
11	2.20	1.33	上下	444
12	2.29	1.29	上下	485
平均	2.02	0.99	—	529

※供試体 1,7 は欠番、接着材厚さは鋼表面に残った 9ヶ所の平均

結果を表-5 に示す。ここではずれ変位 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ で求めた残留せん断応力、および試験後に分解して計測したエポキシ系接着材の厚さも合わせて示した。エポキシ系接着材の厚さは表-1 に示した塗膜の約 $4 \sim 10$ 倍程度である。モルタルブロックはダイヤモンドカッターで切断して欠損した部分に超速硬セメントを用いて接合しており、接合面の位置で 2 種類に分けられる。試験装置に取付けた状態で接合面が垂直になるタイプを表中でブロックの接合を左右と表記し、水平になるタイプを上下とした。試験後は全ての供試体で超速硬セメントによる接合面に目視できるクラックが生じた。最大せん断応力に着目すると平均で 2.02 N/mm^2 となり、表-3 および表-6 に示した付着による供試体により得られたものと同程度の値が得られている。

この試験で得られた代表的な鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位の関係を図-8 に示す。供試体 6 および 9 ではせん断応力の最大値は 0.25 mm 程度のずれ変位が生じた時点で発生しており、またそれ以前の载荷段階においても変位が発生している。供試体 5 の挙動は図-3, 4 に示した供試体の挙動に似ているが、せん断応力の最大値が生じた時点でずれ変位が $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 程度生じている。この直後に生じているずれ変位のジャンプはモルタルブロックの超速硬セメントによる接合面の破壊によると思われる、このようなジャンプはモルタルブロックを左右で接合した供試体で複数回観察された。

図-9 に図-3, 4 および図-8 に示したせん断応力とずれ変位の関係を拡大して示す。これよりエポキシ系接着材で鋼モルタル界面を接合した供試体とそれ以外の供試体とでは明らかに挙動が異なることがわかる。各防食仕様を有する供試体および黒皮の供試体では最大せん断応力が生じる時点で鋼モルタル界面にずれ変位が生じていないが、エポキシ系接着材を用いた供試体では载荷の初期からずれ変位が直線的に漸増しており、最大せん断応力が発生する時点では载荷初期に比較してグラフの傾きはかなり減少している。一方で鋼材表面に塗膜を有する仕様 1~4 と有さない仕様 5 および黒

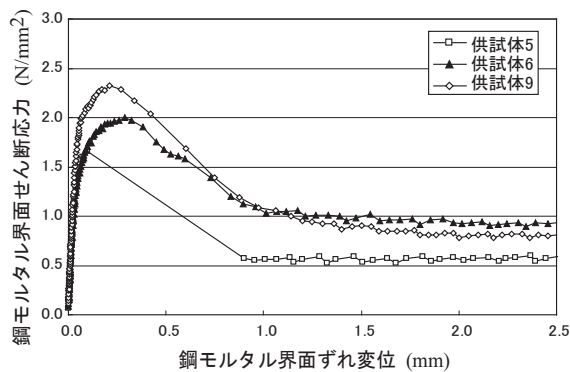


図-8 エポキシ系接着材を用いた鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位

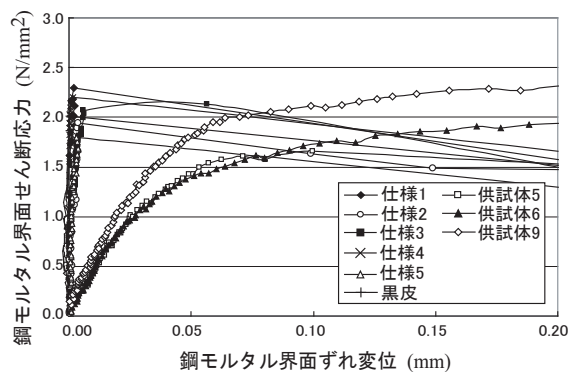


図-9 最大せん断応力を生じる付近の鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位

表-6 トルク型せん断試験による残留せん断応力

供試体 防食仕様	1 体目	2 体目	3 体目	平均値と 不偏標準偏差
仕様 1	1.24	1.22	1.29	1.25 (0.04)
仕様 2	1.00	0.96	1.25	1.07 (0.16)
仕様 3	1.14	1.19	1.14	1.16 (0.03)
仕様 4	0.58	0.57	0.56	0.57 (0.01)
仕様 5	1.30	1.20	0.67	1.06 (0.34)
黒皮	0.85	0.70	0.73	0.76 (0.08)

※単位は N/mm^2 , () 内は不偏標準偏差

皮の供試体とでは差異が見られなかった。

4. 防食仕様を有する鋼コンクリート界面の残留せん断応力の比較

次に残留せん断応力を比較する。防食処理を有する供試体についてトルク型せん断試験により計測された残留せん断応力を表-6に示す。ここでは残留せん断応力はずれ変位 1.0～2.0 mm で求めている。前述の最大せん断応力と同様に防食仕様毎の残留せん断応力の真値の正規分布を仮定し、確率密度関数を求めたものを図-10に示す。また同様に表-4より残留せん断応力の真値の正規分布を仮定して確率密度関数をグラフ化したものを図-11に示す。

図-11より試行回数が増加すれば図-5の最大せん断応力と同様に確率密度関数の形状は全試験で得られた関数の形状に似たものになると考えられる。図中の試験

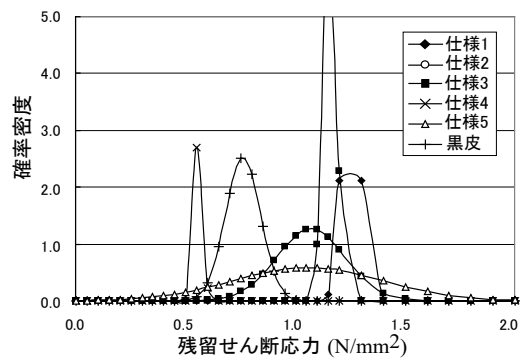


図-10 各仕様の残留せん断応力の真値の確率密度関数

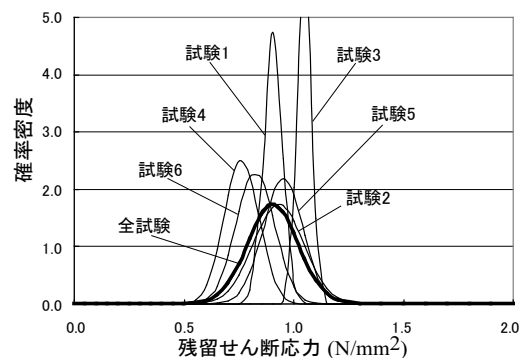


図-11 本試験と同条件の試験による残留せん断応力（黒皮）の試験毎の真値の確率密度関数

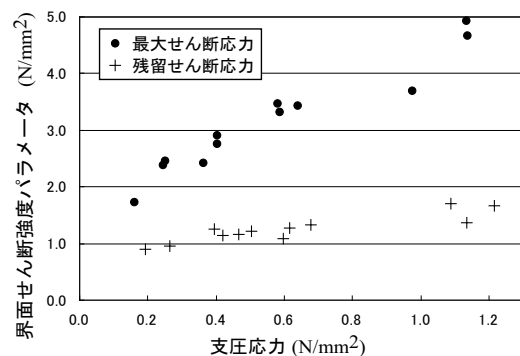


図-12 せん断強度パラメータと鋼モルタル界面垂直応力との関係（黒皮）

No.2, 5 および 6 の関数形状は全試験から得られたものに概ね近く、3 回の試行でも有る程度真値の分布を推定することは可能と思われる。しかしながら図-10に関しては各仕様の確率密度関数の形状が様々であり、これらから残留せん断応力の平均値の大小を議論することは難しいと考えられる。

(1) 鋼モルタル界面に応力を付加したトルク型せん断試験装置による残留せん断応力の計測

はじめに鋼モルタル界面に応力を付加してトルク型せん断試験を行った結果を図-12に示す。この結果は前述の黒皮の供試体と同じ供試体を別途製作して用い、トルク型せん断試験装置の供試体支持部に備えられた PC 鋼棒と鋼板により供試体側面を水平および垂直両方

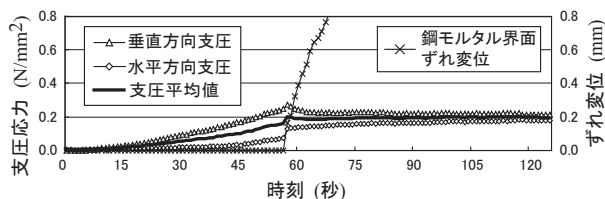


図-13 トルク型せん断試験中の支圧応力の変化と鋼モルタル界面ずれ変位（支圧応力ゼロ）

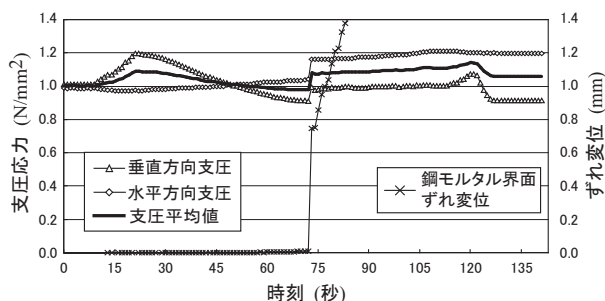


図-14 トルク型せん断試験中の支圧応力の変化と鋼モルタル界面ずれ変位（支圧応力 1.0 N/mm^2 ）

向に等方的に拘束を与えて実験を行って得たものである。この拘束により鋼モルタル界面法線方向に発生する応力を支圧応力と称して以降用いる。

用いた全ての供試体は1回の施工で製作しており、モルタルの配合は表-2に同じく養生方法も同じであるが圧縮強度は材令29日で 50.2 N/mm^2 であった。供試体をガタつき無く試験装置に取付けた状態を支圧応力ゼロと仮定してトルク型せん断試験を行った。支圧応力ゼロが3体、 0.25 N/mm^2 、 0.5 N/mm^2 および 1.0 N/mm^2 としたものについても3体ずつ、合計12回の実験を行い、残留せん断応力はずれ変位が $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ で計測している。図-12からは最大せん断応力および残留せん断応力の両方が支圧応力に比例して大きくなっていることがわかる。

以上で示した支圧応力は試験開始時にロードセルで計測して調整しているが試験開始後は計測のみで調整は行っていない。ここで行ったトルク型せん断試験中の支圧応力の変化を時系列で図-13および図-14に示す。代表的なものとして図-13に支圧応力ゼロで試験を始めたもの、図-14に支圧応力 1.0 N/mm^2 で試験を始めたものを選んでおり、図中には右縦軸に鋼モルタル界面ずれ変位も示している。

これらより本研究の装置では支圧応力はせん断試験の進行に伴って変化していることがわかる。ずれ変位が発生した時点でその値は不連続に変化するが以降はその値はほぼ一定となる傾向があった。また水平支圧応力と垂直支圧応力の値の差はずれ変位の発生前の方が大きい傾向が見られた。これらより図-12の横軸では支圧応力として水平および垂直方向の平均値を用いることとし、最大せん断応力については最大値が生じ

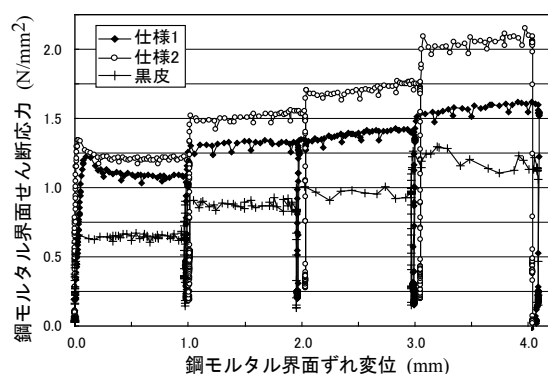


図-15 鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位（仕様1,2,黒皮）

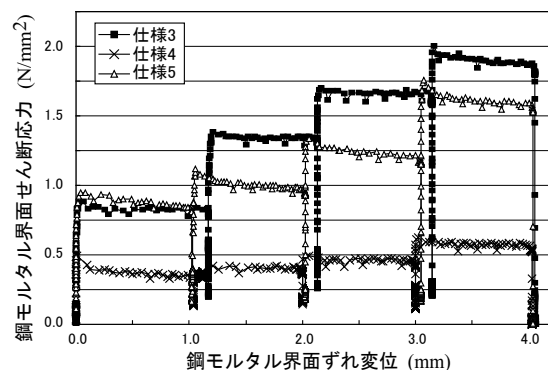


図-16 鋼モルタル界面せん断応力とずれ変位（仕様3,4,5）

る直前の値を、また残留せん断応力についてはずれ変位が $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ の時点の支圧応力の平均値を求めて強度パラメータとあわせて示している。

(2) 防食仕様を有する鋼コンクリート界面の残留せん断応力と摩擦係数との比較

残留せん断応力は付着が破壊した後に摩擦等で伝達されるせん断応力の程度と考えられることから、支圧応力と残留せん断応力との間にクーロン摩擦的な関係があることが予想される。この場合には本試験で定義しているずれ変位 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ あるいは $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ の載荷段階の支圧応力の管理は得られる残留せん断応力に影響すると考えられ重要である。図-13、図-14より付着破壊以降の支圧応力は開始時の値と異なることからここでは残留せん断応力を計測する直前に改めて支圧応力を計測、調整する。また段階的に支圧応力を増加させて残留せん断応力の増加の程度を得る。

得られた鋼モルタル界面のせん断応力と界面のずれ変位との関係を図-15, 16に示す。ここでは表-3および表-6中で3体目と表示した供試体6体を用いている。試験は材令91日目で行い、試験まで全ての供試体は常温の室内で保管している。支圧応力は供試体支持部においてガタがない状態をゼロとして試験を開始し、以降 0.25 N/mm^2 、 0.5 N/mm^2 および 1.0 N/mm^2 程度の支

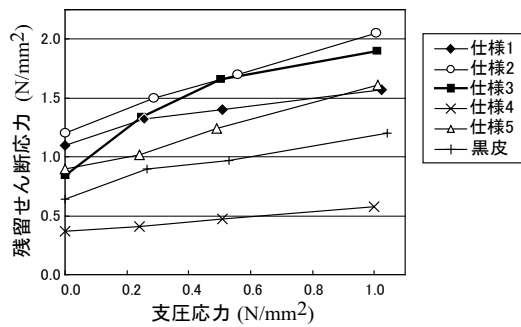


図-17 支圧応力の変化と残留せん断応力との関係

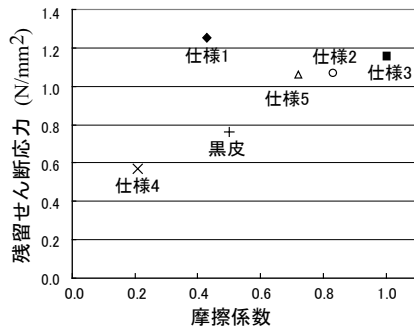


図-18 各仕様の摩擦係数と残留せん断応力との関係

圧応力が発生するように、ずれ変位が1mm増加する毎に除荷のうえ調整して4段階で試験を行った。図-15, 16中の鋼モルタル界面せん断応力の水平部が段階的に増加させた支圧応力の下においてずれ変位を増加させるに要するせん断応力である。

図-15, 16の水平部の残留せん断応力の平均値を求め、またロードセルで計測した該当する水平部の水平支圧応力および垂直支圧応力の平均値を求めて整理したものを図-17に示す。仕様3で上に凸となったが他はほぼ直線となった。そこで図-17に支圧応力と残留せん断応力との関係に近似直線を挿入し、その傾きを摩擦係数と定義してこれを求めた。求めた摩擦係数と表-6に示した各防食仕様毎の残留せん断応力の平均値との関係を図-18に示す。仕様1を除いて残留せん断応力と摩擦係数とは概ね比例している。また仕様4は残留せん断応力、摩擦係数共に他と比較して小さい。表-6に示した残留せん断応力の比較からは仕様1~3, 5については差が有ると積極的に言い難いが、図-18より仕様1と仕様2, 3, 5とは性状が異なると予想される。

(3) トルク型せん断試験後の鋼コンクリート界面

最後にトルク型せん断試験後の供試体のモルタルブロックを切断し、鋼モルタル界面を観察する。図-19に仕様1, 図-20に仕様2, および図-21に仕様4の供試体の鋼モルタル界面を示した。仕様2, 3, 5および黒皮の供試体は鋼円柱の表面に薄くモルタルが付着しており、鋼モルタル界面の極近傍のモルタルが破壊したと考えられる。またこれらのうち塗装による防食仕様

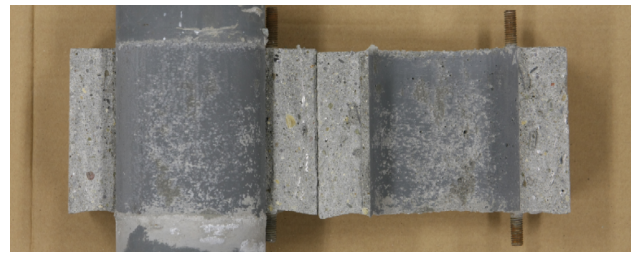


図-19 試験後の鋼モルタル界面（仕様1）

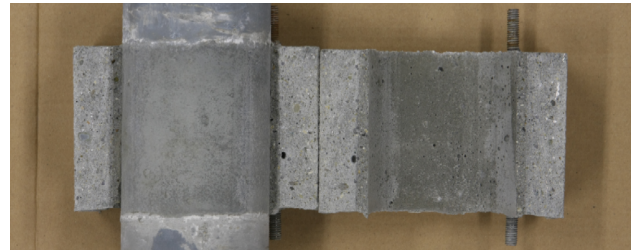


図-20 試験後の鋼モルタル界面（仕様2）

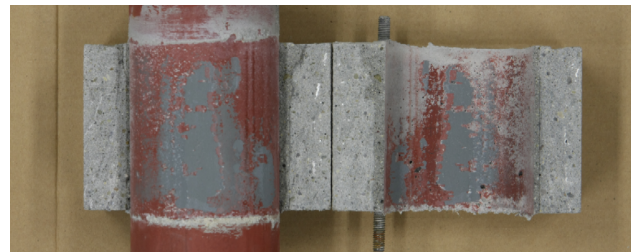


図-21 試験後の鋼モルタル界面（仕様4）

表-7 各防食仕様表面試験結果

供試体 防食仕様	引張付着力 (N/mm ²)	破壊状況のまとめ (観測した主な破壊の性質)
仕様1	4.3	試験円筒の接着材が破壊
仕様2	3.8	素地と塗膜間の付着破壊
仕様3	2.3	素地と塗膜間の付着破壊
仕様4	1.7	2層の塗膜間の付着破壊
仕様5	5.3	皮膜の凝集破壊

※引張付着力は JIS K 5600-5-7 プルオフ法による3ヶ所の平均

2, 3では塗膜の損傷は見られなかった。ここではこれらの代表的なものとして図-20に仕様2を示している。

図-19の仕様1および図-21の仕様4ではモルタルブロックの鋼モルタル界面に塗膜の付着が観察された。

ここで供試体製作時に各防食仕様で計測した表面の引張付着力と破壊状況を表-7に示しておく。表-7の仕様1の引張付着力は他の塗装仕様に比較してやや大きい、この結果は主に試験アセンブリの接着材の破壊に起因しており真値はこれを上回る可能性がある。にもかかわらず図-19より仕様1では鋼モルタル界面に有機ジンクリッチペイントの付着が観察され、塗膜が破壊しながらせん断応力を伝達したと考えられる。図-18より仕様1は他の仕様と比較して摩擦係数の割には残留せん断応力が大きく、摩擦以外の機構によるせん断応力の伝達が存在すると思われる、これらの挙動は塗膜の性質によるものと推測する。

図-21に示した仕様4では仕様1と同様に鋼モルタル

ル界面に塗膜の付着が見られるが、鋼円柱表面には下塗りの無機ジンクリッチペイントが見えており、その上に塗装されたミストコートとの間で塗膜が破壊している。表-7 では仕様 4 の引張付着力が他と比較して小さく、破壊状況として面積 85～90 % で 2 層の塗膜間の付着破壊が観察されていることから、トルク型せん断試験においても同様に 2 層の塗膜間の付着破壊が生じ、他の供試体より小さいせん断応力下でずれ変位が増大していったものと考えられる。

5. 結論

本研究では鋼コンクリート複合構造の防食処理が付着等による面的結合に与える影響を検討することを目的として、トルク型せん断試験を用いて鋼モルタル界面のせん断挙動と強度パラメータを求め、比較、議論した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 付着による最大せん断応力には検討した防食仕様等の差異による影響は見られず、また最大せん断応力はずれ変位がゼロのときに生じた。
- (2) 仕様 1 を除いて残留せん断応力と概ね比例した摩擦係数が計測された。
- (3) 塗膜が破壊しながらせん断応力を伝達したと思われる仕様 1 は他と比較して摩擦係数の割には大きい残留せん断応力が計測された。
- (4) 2 層の塗膜間の付着破壊が生じたと思われる仕様 4 は他と比較して残留せん断応力、摩擦係数共に小さいものが計測された。

参考文献

- 1) 六車 熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, No.131, pp.1-6, No.132, No.134, No.139, 1967.
- 2) Viest IM: Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams, *ACI Journal*, Vol.27, pp.875-891, 1956.
- 3) 複合構造委員会複合構造標準示方書小委員会: 複合構造標準示方書, (社) 土木学会, 2009.
- 4) 鋼構造委員会鋼・合成構造標準示方書小委員会: 鋼・合成構造標準示方書, 総則編・構造計画編・設計編, (社) 土木学会, 2007.
- 5) 武藤 徹, 石井孝男, 小川潤一郎, 小野辺良一, 吉村和真: 秋田大橋において 23 年間供用した合成床版の健全度調査, 橋梁と基礎, Vol.38, No.12, pp.19-25, 2004.
- 6) 三木千壽, 山田真幸, 長江 進, 西 浩嗣: 既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.281-294, 2000.
- 7) 山田真幸, サトーンペンボン, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫: 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.1161-1168, 2001.
- 8) 武田芳久, 栗田章光, 渡辺 滉: 各種防錆処理板とコンクリートとの付着強度について, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集, pp.386-387, 1998.
- 9) 坂本 香, 村山 陽, 中田謙司, 柳澤則文, 山岸武志: 防錆処理を施した鋼板とコンクリートとの付着強度, 第 5 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.205-210, 2003.
- 10) 小野聖久, 長田光司, 桜田道博, 大浦隆: 波形鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の腐食特性, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.29-1-29-6, 2005.
- 11) 春日井俊博, 入部孝夫, 竹下永造, 三浦尚: 鋼・コンクリート合成床版の鋼材防食に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1109-1114, 2010.
- 12) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案) とスタッドに関する研究の現状, JSSC テクニカルレポート, No.35, 1996.
- 13) 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, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.13, pp.323-329, 2010.
- 14) 山田真幸, 斉木功, 岩熊哲夫: 鋼コンクリート界面の付着強度評価のためのトルク型せん断試験機に関する基礎的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp.37-46, 2013.
- 15) 日本道路協会橋梁委員会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, (社) 日本道路協会, 2005.
- 16) 國分正胤: 土木材料実験 (改訂 4 版), 技報堂出版, 1982.

FUNDAMENTAL STUDY ON SHEAR STRENGTH BETWEEN STEEL AND MORTAR INTERFACE WITHOUT MECHANICAL CONNECTORS

Masaki YAMADA, Isao SAIKI, Kaoru YOKOYAMA,
Akifumi KUROSAWA and Tetsuo IWAKUMA

Torque shear tests were carried out to investigate the shear behavior and strength of steel-concrete interface for better design of hybrid structures. In this study, the steel-mortar interfaces of the torque shear specimens have no mechanical connectors such as headed studs, and the steel surfaces have several types of anti-rust coatings. Shear stress and displacement between steel and mortar were experimentally measured, and shear strength of adhesion and friction were compared and discussed. As the result, it was shown that the anti-rust coatings have no influences on the maximum shear stress and the properties of anti-rust paint have influences on shear stress transmitted by friction.