

(27) 防錆塗装鉄骨を用いたSRC部材の力学的性状に関する実験的研究

Experimental study on structural performance of SRC member using rustproofing steel

河村 祐作*、深沢 協三**、立花 正彦***

Yusaku Kawamura, Kyozo Fukazawa, Masahiko Tachibana

*徳倉建設㈱、本社建築設計部(〒460-8615 愛知県名古屋市中区錦 3-13-5)

**工博、(社)日本建設業経営協会中央技術研究所(〒136-0075 東京都江東区新砂 1-6-35)

***工博、東京電機大学教授、工学部建築学科(〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2)

In the execution of the steel reinforced concrete structure(SRC) building, steel frames are sometimes left until concrete placing. In this case it sometimes happens that rust splashes to the neighborhood. It is thought that the splash of the rust can be prevented by the rustproofing paints. We developed the rustproofing paints that an influence on the concrete is scarce.

This paper presents structural performance of SRC member using steel painted with this rustproofing paints. For this purpose, two kinds of experiments are executed. One is the experiment about bond strength between rustproofing steel and concrete. The other is the experiment about SRC column member using rustproofing steel. By these experiments it can be cleared that structural performance is not declined by using rustproofing steel.

1.はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート造(以下 SRC 造)の建物では、敷地条件・建物形状等の制約から鉄骨を全節先行して建方を行う場合がある。この場合、コンクリート打設までの間、鉄骨が放置される期間が長くなり、鋼材の錆の発生による浮錆の飛散や部材の耐力低下等の問題が生じる可能性がある。その対処方法の一つとして、鉄骨部分に簡易的な塗装による防錆処理を施すことが考えられる。この目的で用いる塗料にはコンクリートに耐久性に対して有害でなく、かつ鋼材-コンクリート間の付着を極力低下させないことが望まれる。また一方で、塗料の防錆効果はコンクリートが打設されるまでの最大半年程度で十分である。これらの点を考慮して筆者等はコンクリー

トに用いるプライマーを基に塗料の開発を行った(以下、プライマー系塗料と略称)。

一方、上記プライマー系塗料による内蔵鉄骨への防錆処理が SRC 部材の構造性能、特に鋼材-コンクリートの付着性能に対する影響が懸念される。そこで本研究ではプライマー系塗料を塗布した鋼材-コンクリートの付着性能をコンクリート中に打ち込んだ平鋼に単純引張実験(以下「付着実験」)により、内蔵鉄骨にプライマー系塗料を塗布した SRC 柱部材の力学的性状について H 形鋼を内蔵する SRC 柱の定軸力下での繰返し曲げせん断実験(以下「柱曲げせん断実験」)により検討した。以下では、付着実験及び柱曲げせん断の両実験結果及びプライマー系塗料が SRC 部材の構造性能へ及ぼす影響について報告する。

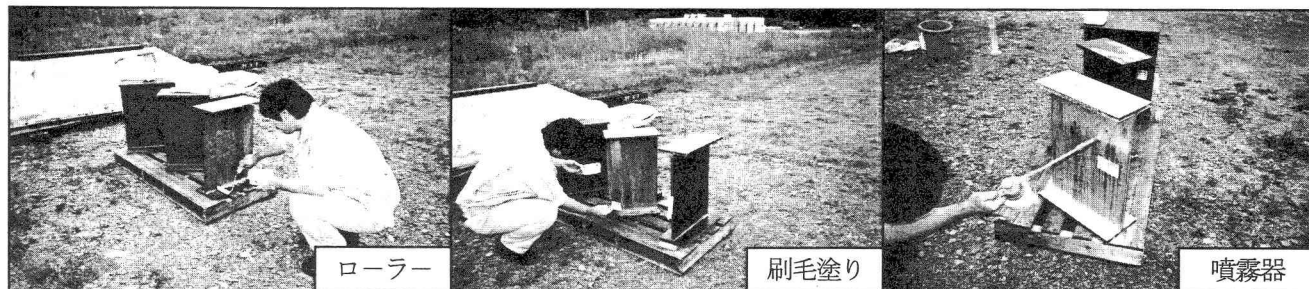


写真1. 防錆処理方法

2. 防錆処理方法の概要

防錆処理に用いる塗料はアクリル系共重合エマルションを主成分とするものである。このプライマー系塗料は、水で希釈（5倍を標準）して使用し、塗布は刷毛、ローラー、噴霧器（写真1参照）のいずれでも可能である（標準的な塗布量は $100\sim150\text{g/m}^2$ ）。部分的にプライマー系塗料を塗布した鋼材の気中暴露結果より半年間は防錆効果が得られることが確認されている。

3. 付着実験

付着実験では、プライマー系塗料の有無が鋼材-コンクリートの付着性能に及ぼす影響に加え、一般的に用いる水性塗料、鉄骨用の錆止め塗料についても併せて実験を行った。さらに、日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造規準・同解説」¹⁾（以下SRC規準と略称）の改定（2001年）で、コンクリート強度が 60N/mm^2 まで引き上げられたことに合わせて、コンクリート強度を変数とする実験も行った。

3.1 実験計画

（1）試験体形状：実験変数は表1に示すように塗料種類とコンクリート強度である。塗料の種類について塗装無(0 シリーズ)、プライマー系塗料 (P シリーズ)、JIS規格錆止 (J シリーズ) 及び一般用水性ペンキ (W シリーズ) の4水準、コンクリート強度について18, 24, 36, 48 及び 60N/mm^2 の5水準とする。試験体数は各変数3体ずつの合計36体とする。

試験体の形状及び寸法を図1に示す。鉄骨は平鋼(材質SS400: $\sigma_y=327\text{N/mm}^2$, $\sigma_u=438\text{N/mm}^2$)を使用し、断面は $50\times12\text{mm}$ とする。また、コンクリート断面は $\phi 200$ 、長さ 200mm の円柱とし、この中に平鋼が埋込まれている。試験体上面には平滑性を出すため石膏 ($t=5.0\text{mm}$ 程度) で仕上っている。埋込まれた平鋼は、鉄骨断面の引張降伏強度より付着強度が先行する寸法とした。

塗装無試験体では鋼材表面をワイヤブラシで清掃後コンクリート打設した。塗料有りの各タイプでは鋼材表面をワイヤブラシで清掃し、アセトンで脱脂した後刷毛にて1回塗りとした。また、コンクリートは縦打で打設した。

（2）実験方法：加力装置の概念図を図2に示す。実験は図に示すように、センターホールジャッキによりコンクリートに埋込まれた鋼材を引抜く。载荷は単調载荷とした。また、平鋼に引張力を作用させる時に偏心が生じないように、試験体上端（図2中A部分）及びセンターホールジャッキ上端（同図C部分）に球座を置いた他に加力用鋼棒の途中にユニバーサルピン（同図B部分）を取付けた。

3. 2 実験結果

（1）破壊性状：試験体の破壊性状と実験変数の関係を以下に示す。

1) 塗料による影響：塗装無試験体ではコンクリート強度にかかわらず破壊性状は同じ傾向で、最大耐力に達すると大きな音(ボンという)とともに鋼材がコンクリートから急激に抜け出し、耐力が低下する。試験体のコンクリート上面の表層部分でのみ鋼材周辺部分がコーン状破壊(深さ 5mm 、幅 20mm 程度)する。また、コンクリートから抜け出した鋼材表面の黒皮の剥れは認められない。プライマー系塗料試験体では塗装無試験体とほぼ同じ傾向を示す。JIS 錆止め及び水性ペンキ試験体では鋼材のコンクリートからの抜け出しは急激には生じず、最大耐力以降も鋼材が緩やかに抜け出した。コンクリートから抜け出した鋼材表面の塗料はほとんどが剥れていた。

2) コンクリート強度による影響：塗装無・プライマー系塗料試験体とも、破壊性状に対するコンクリート強度の影響は認められなかった。

表1. 実験計画

塗料の種類	コンクリート強度 (N/mm^2)				
	18	24	36	48	60
無(0)	3	3	3	3	3
プライマー系塗料(P)	3	3	3	3	3
錆止め(JIS)(J)			3		
水性ペンキ(W)			3		

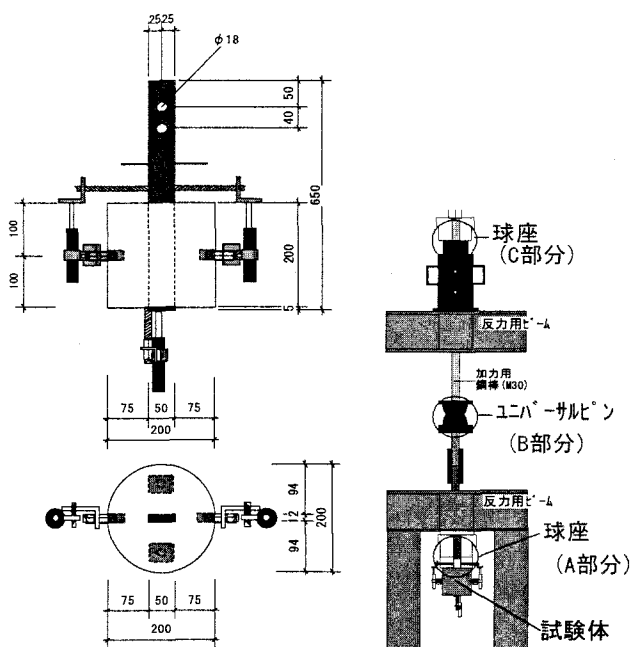


図1. 試験体形状及び寸法 図2. 加力装置

(2) 履歴性状：付着応力度～抜け出し量曲線の代表例を図3(a)、(b)に示す。同図の縦軸は試験体に作用させた引張力をコンクリート中に打ち込んだ鋼材の表面積で除して求めた付着応力度を示し、横軸は試験体下面で測定した鋼材の抜け出し量を示す。

1) 塗料による影響：塗装無試験体では最大耐力の60%前後までは鋼材の抜け出しはなく、最大耐力の80%程度になると $\delta=0.002\text{mm}$ ほど抜け出す。それ以降最大耐力に達するまでは徐々に剛性が低下し、 $\delta=0.05\text{mm}$ 程度で最大耐力に達する。最大耐力に達すると、一気に3～5mm程度鋼材が抜け出し、急激な耐力低下を生じる。また、最大耐力以後の大変形時において最大耐力の半分程度の付着耐力を保持している。プライマー系塗料試験体では、塗装無試験体とほぼ同じ性状を示す。

一方、JIS 錆止め及び水性ペンキ試験体では、最大耐力の40～50%までは鋼材の抜け出しが殆ど無い。図3(b)に示すように塗装無とは異なり、 $\delta=0.003\text{mm}$ 付近から生じる剛性低下が長く続き、 $\delta=2.0\text{mm}$ 付近で最大耐力に達する。また、最大耐力以降も塗装無とは異なり耐力低下が緩やかであった。

2) コンクリート強度による影響：塗装無・プライマー系塗料試験体とも、コンクリート強度が高い程最大付着耐力が高くなる。荷重～変形曲線の形状に対するコンクリート強度の影響は少ない。

2.3 付着耐力

(1) 塗装の影響：各試験体の最大耐力及び付着応力度を表2に示す。表中の付着耐力 τ_B は、各々

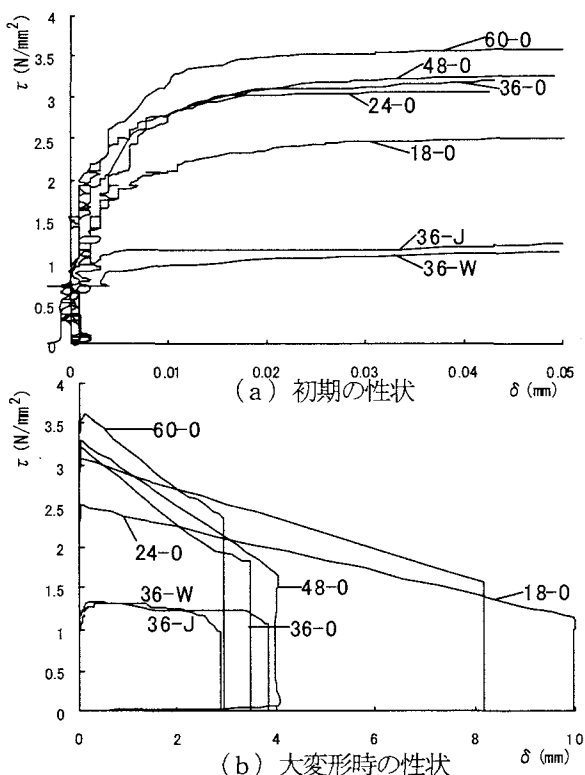


図3. 付着応力度～抜け出し量曲線

イプ3体で得られた最大付着耐力(最大耐力/コンクリート中の鋼材表面積)を平均したものである。また、全試験体の塗料別の付着強度(τ_B/σ_B :コンクリート強度で無次元化した値)を図4に示す。さらにコンクリート強度

表2. 最大耐力

試験体名	最大耐力 (3体分) [kN]	τ_B [N/mm ²]	σ_B [N/mm ²]	τ_B/σ_B	短期許容応 力度(τ_a)	τ_B/τ_a
18-O	55.5	2.24	18.6	0.120	0.558	4.01
18-P	43.2	1.74		0.094		3.12
24-O	77.1	3.11	29.9	0.104		4.60
24-P	62.5	2.52		0.084		3.74
36-J	43.2	1.74	34.3	0.051		2.58
36-W	40.1	1.61		0.047		2.39
36-O	77.0	3.11	36.5	0.085		4.60
36-P	70.2	2.83		0.078		4.20
48-O	82.6	3.33	45.6	0.073		4.93
48-P	76.4	3.08		0.068		4.57
60-O	90.5	3.65	72.9	0.050		5.40
60-P	79.9	3.22		0.044		4.77

τ_B : 付着応力度 (最大耐力/コンクリート中の鋼材表面積) * 3体の平均

σ_B : コンクリート圧縮強度

τ_a : S R C 標準・14条 許容付着応力度 (短期)

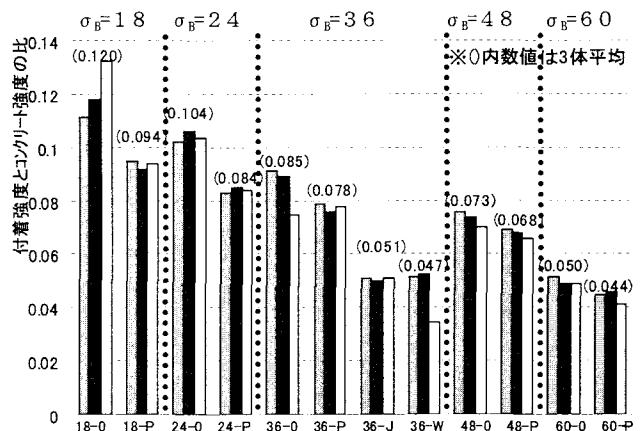


図4. 塗料別の付着強度(τ_B/σ_B :コンクリート強度で無次元)

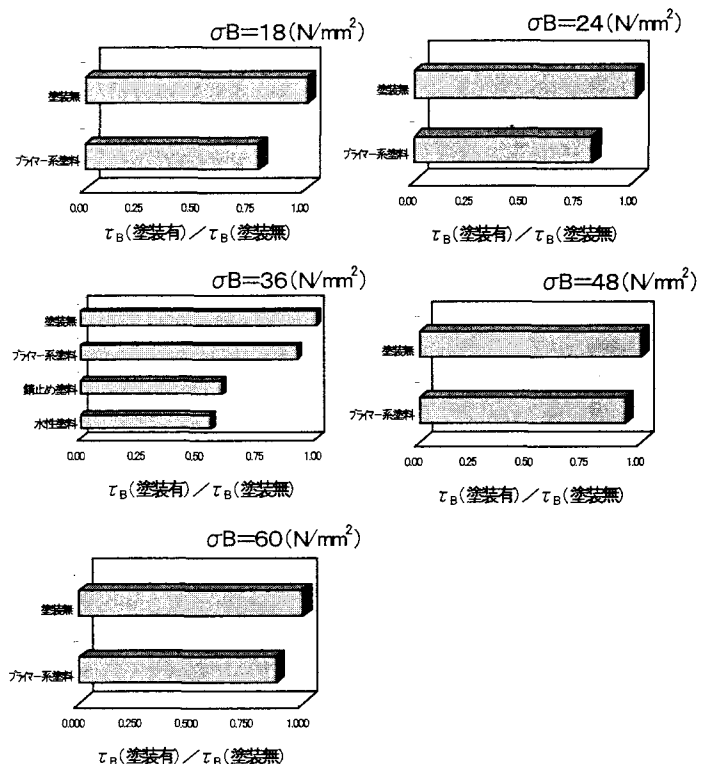


図5. 塗装による付着耐力低下

毎に塗装有り試験体の付着耐力を塗装無試験体の付着耐力で除したもの(=塗装による付着耐力低下率)を図5に示す(付着耐力は何れも3体平均)。図4中に示すように同一タイプの3体間での付着耐力のバラツキは少ない。塗装による付着耐力の低下は、塗装無の付着耐力に対し錆止めペンキ塗装試験体で60%、水性ペンキ塗装試験体では55%である。これらはSRC規準¹⁾の解説(14条許容付着応力度)に示される塗装による低下率(50%程度)と一致する。

一方、プライマー系塗料試験体の付着耐力の低下は前の2種類の塗料に比べ小さく、塗装無に対して78~93%の耐力を示した。プライマー系塗料試験体の付着耐力低下率とコンクリート強度の関係を図6に示す。同図の縦軸は σ_B 毎にプライマー系塗料試験体の τ_B を塗装無試験体の τ_B で除したものである(τ_B は何れも3体平均)。コンクリート強度が高い程耐力低下率が小さくなる傾向を示す。

(2) コンクリート強度の影響：コンクリート強度と付着耐力(3体平均)の関係を図7に示す。塗料無の場合は、コンクリート強度 $\sigma_B < 30\text{N/mm}^2$ の範囲では付着耐力はコンクリート強度とほぼ比例的に増大し、SRC規準¹⁾

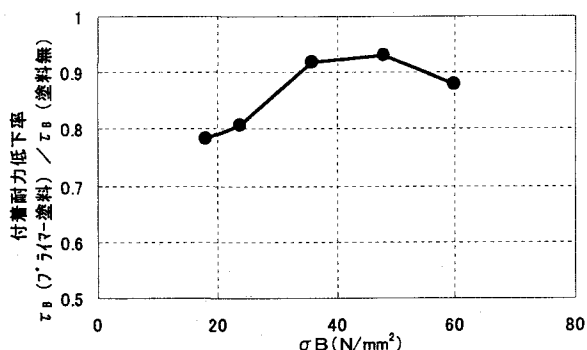


図6. プライマー系塗料試験体の付着耐力低下率とコンクリート強度の関係

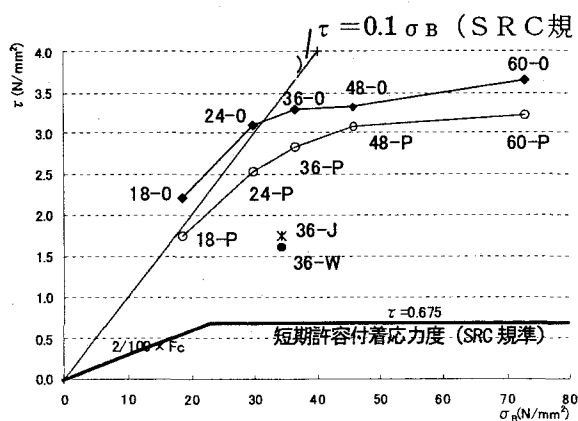


図7. コンクリート強度と付着耐力関係

の解説に示される $\tau_B = 0.1 \sigma_B$ と概ね同じ性状を示す。一方、 $\sigma_B > 30\text{N/mm}^2$ 以上になると、コンクリート強度に対する付着耐力の増大は $\tau_B = 0.1 \sigma_B$ の関係よりは小さなものとなる。

また、プライマー系塗料試験体では、コンクリート強度に対する付着耐力の上昇は塗装無試験体とほぼ同一の傾向を示す。SRC規準¹⁾に示される鉄骨とコンクリートの許容付着応力度 τ_a (短期)と実験より得られた付着耐力の比較を表2及び図7中に示す。塗装無試験体では短期許容応力度に対する付着耐力の比率(= τ_B / τ_a)は4.0~5.5の範囲である。また、プライマー系塗料試験体の場合の比率は3.1~4.8程度である。

4. 柱曲げせん断実験

4. 1実験計画

(1) 試験体概要：実験変数及び構成要素を表3に示す。実験変数は内蔵鉄骨—コンクリート間の付着である。付着は、鉄骨表面の状況により変化させ、①通常の黒皮(ワイヤーブラシにて表面のゴミを清掃)、②プライマー系塗料による塗装(ワイヤーブラシによる清掃、アセトンにより脱脂後、刷毛で一回塗り)、③付着無(鉄骨に養生シート($t = 1.5\text{mm}$)を二重に巻き付け、養生シート間にグリースを塗る)の3水準とした。試験体は変数毎に一体ずつの合計3体である。

試験体形状及び寸法を図8に示す。試験体は実大柱の約1/3モデルである。試験体はすべて同一断面とし、曲げ破壊先行型(設計：終局曲げ耐力時せん断力292.6kN、終局せん断耐力時せん断力484.8kN)とする。なお、柱の鉄骨の上下端位置(試験体上下のスタブ内位置)は材直交方向にH型鋼(柱内蔵鉄骨と同一サイズ)のブラケッ

表3 実験計画及び構成要素

試験体名	実験変数	柱断面 $b \times D (\text{mm})$	柱主筋 [引張鉄筋比]	柱帯筋 [帯筋比]
No.1	塗装無	300	12-D12	D6@100
No.2	プライマー系塗料	×	[Pt=0.31]	[Pw=0.21%]
No.3	付着無	300		

表4 材料の機械的性質

鉄骨(フランジ・ウェブ)				
寸法		材質	σ_y	σ_u
H-200×100×5.5×8		SS400	327	438
コンクリート(普通コンクリート)				
	材齢	F_c	σ_B	
No.1	27日	24	28.89	主筋 4-D10(SD295A)
No.2	40日	24	29.22	帯筋 D6-@100(SD295A)
No.3	33日	24	28.95	
				σ_y σ_u σ_y σ_u
				337 460 346 517

※ σ_y ：降伏強度 ※ F_c ：設計強度
※ σ_u ：引張強度 ※ σ_B ：圧縮強度

トを取り付けている。また、柱の内蔵鉄骨にはH型鋼(材質:SS400、寸法H-200×100×5.5×8)を用いた。主筋は12-D10(材質:SD295A)、またせん断補強筋にはD6-@100(材質:SD295A)とした。コンクリートは F_c (設計基準強度)=24N/mm²の普通コンクリートを用いた。なお、コンクリートの打設は横打で行った。これらの使用材料の機械的性質を表4に示す。

(2) 実験方法及び測定項目: 実験は図9に示すように試験体の上下スタブを加力フレームに固定し、オイルジャッキ(能力:2000kN)により圧縮軸力($0.15Nu=500.8kN$, $Nu=A \cdot r \cdot \sigma_y + s \cdot A \cdot s \cdot \sigma_y + b \cdot D \cdot \sigma_B$)を常時作用させ、アクチュエーターにより逆対称モーメントが生じるように静的水平力を作用させる。加力条件は図10に示すように、部材角 $R=1/400 \sim 1/25$ の正負繰り返し載荷で各3サイクルづつ加力する。測定項目は水平変形量、軸変形量及び各構成要素の歪値である。

4. 2実験結果及び考察

(1) 破壊性状: $R=1/100$ 、 $1/50$ 加力サイクル終了時のひび割れ発生状況を図11、図12に、最終破壊状況を写真2に示す。各試験体とも、ひび割れの発生順序はほぼ共通で、1) 曲げ・曲げせん断ひび割れ ($R=1/400$)、2) 試験体側面での主筋沿った付着割裂 ($R=1/200$)、3) 柱の上下端部でのコンクリート圧壊 ($R=1/100$)、4) 内蔵鉄骨フランジに沿ったせん断付着ひび割れ ($R=1/50$)、5) せん断圧壊と進行 ($R=1/50 \sim 1/25$) の順序であった。

試験体相互間の破壊性状の相違点は以下の通りである。
1) $R=1/100$ (鉄筋及び鉄骨が降伏し剛性低下が顕著になる) では、塗装無とプライマー系塗装試験体はほぼ同様のひび割れ性状を示し、柱上下端に曲げ・曲げせん断ひび割れが3カ所で発生した(発生位置は端部1D(D:柱せい)以内の範囲)。付着無試験体ではひび割れの本数が増え、発生位置も1Dの範囲を超える。

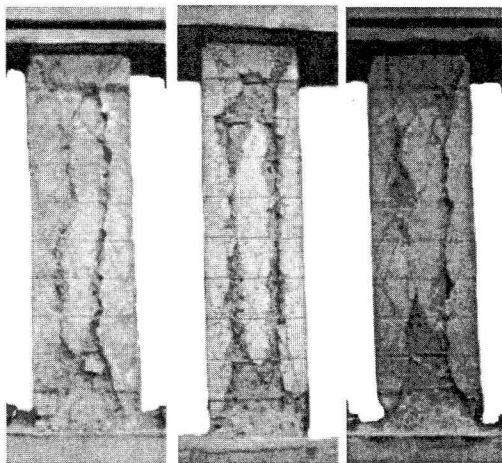


写真2 最終破壊状況

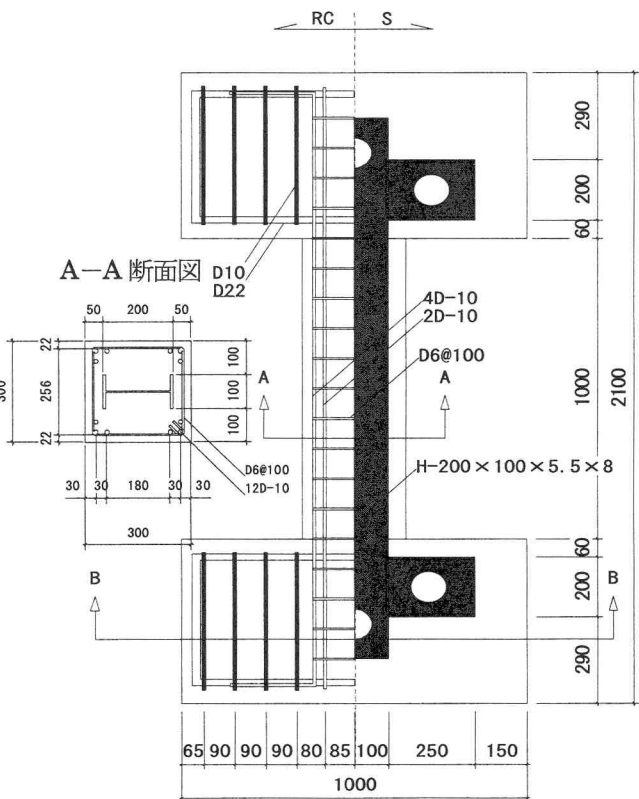


図8 試験体形状及び寸法

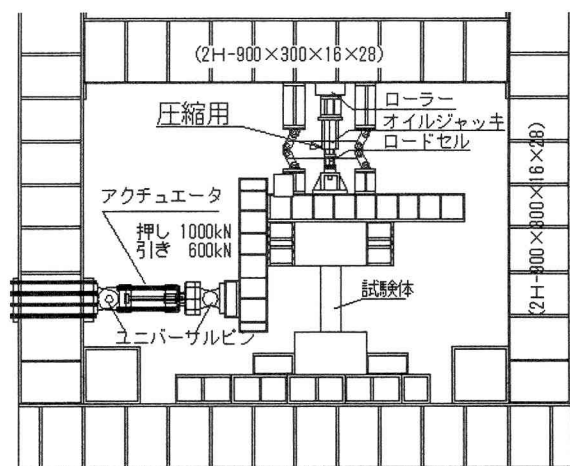


図9 加力装置

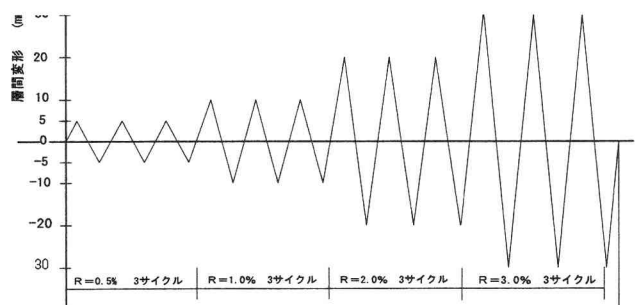


図10 加力サイクル

- 2) $R=1/50$ 終了時の端部でのコンクリート圧壊状況は、付着が小さいほど圧壊の進展が早い。
- 3) 写真2に示すように、せん断付着ひび割れ及びせん断圧壊によるコンクリートの剥落は付着が小さいほどひび

割れ本数及び剥落量が多い。

(2) 履歴性状: 各試験体の荷重～変形曲線を図13に、サイクル毎の等価粘性減衰定数 (heq) を図14に示す。各試験体とも $R=1/100$ の加力サイクルで部材の曲げ降伏

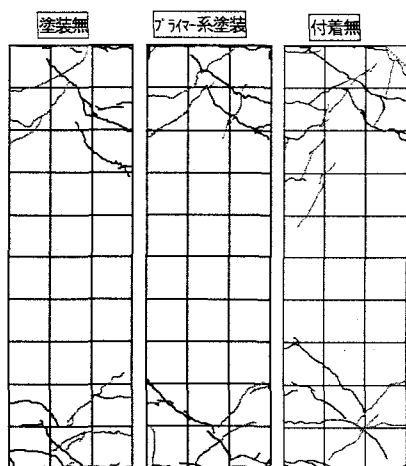


図11 R=1/100 時ひび割れ状況

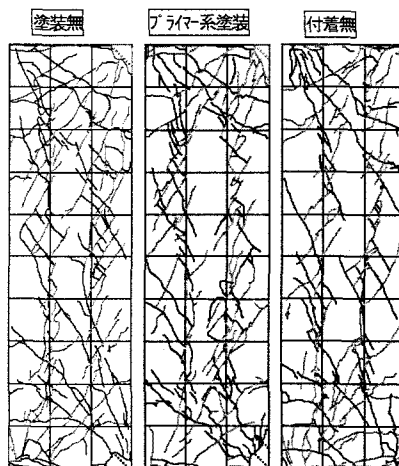


図12 R=1/50 時ひび割れ状況

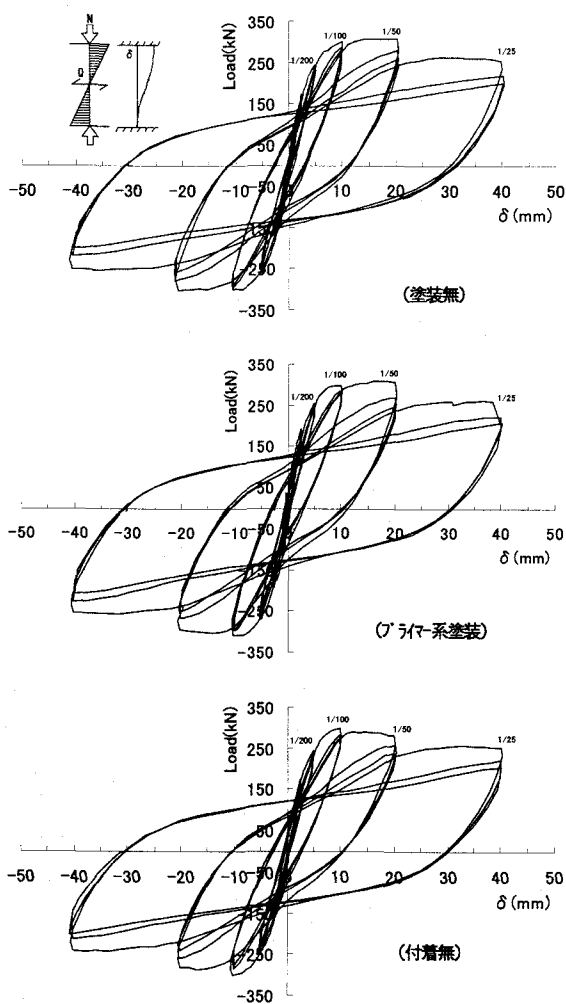


図13 履歴曲線

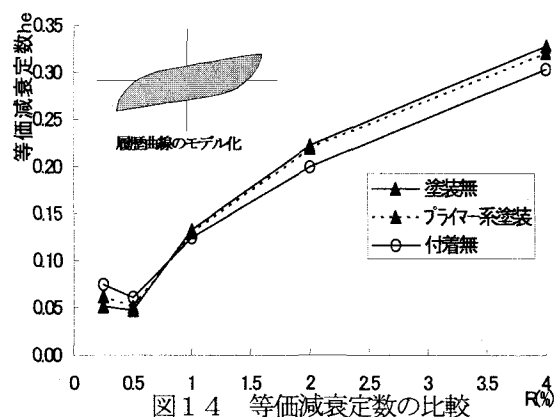


図14 等価減衰定数の比較

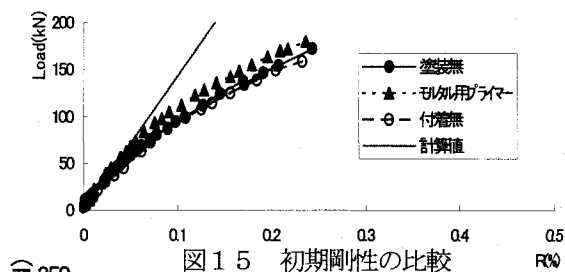


図15 初期剛性の比較

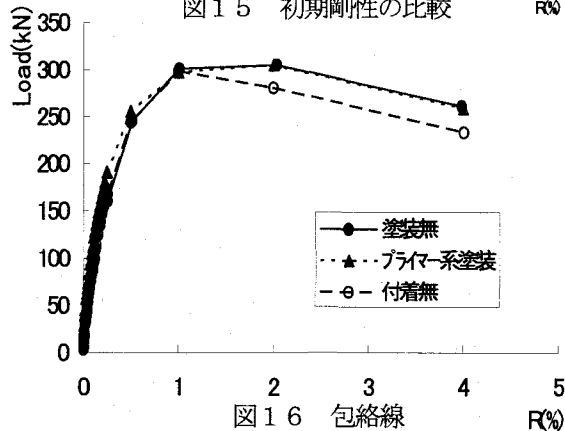


図16 包絡線

により剛性低下が顕著となる。曲げ降伏以降では履歴形状は実験変数にかかわらず充腹型SRC部材特有の安定した紡錘形を示す。heqは曲げ降伏以前の $R=1/100$ までは試験体間での相違はほとんどない。 $R=1/50$ 以降は付着が小さいほどheqが小さくなり、付着無の場合塗装無試験体に対しheqが10%程度低下する。

各試験体の初期剛性の比較を図15に、荷重～変形曲線の包絡線を図16に示す。初期剛性は各試験体とも計算値にほぼ一致し、試験体間の相違は見られない。また、 $R=1/100$ までの包絡線に試験体間の違いは認められない。塗装無・プライマー系塗料試験体では $R=1/50$ まで最大耐力を維持し、 $R=1/25$ で耐力低下を生じる。一方、付着無試験体では $R=1/100$ で最大耐力に達し以降耐力低下を生じる。

以上のように、包絡線・履歴形状ともに曲げ降伏する $R=1/100$ までは付着の影響は小さく、試験体間の相違はほとんど認められない。塑性化が進展する $R=1/50$ からは付着の影響が表れ、付着無試験体では耐力低下、履歴面積の減少が生じた。これらは、前報の破壊性状に示すように、圧壊の早期発生、せん断付着破壊・せん断圧壊の進展による影響と考えられる。なお、プライマー系塗装試験体での耐力低下、履歴面積の減少は小さく、塗装無に近い性状を示す。

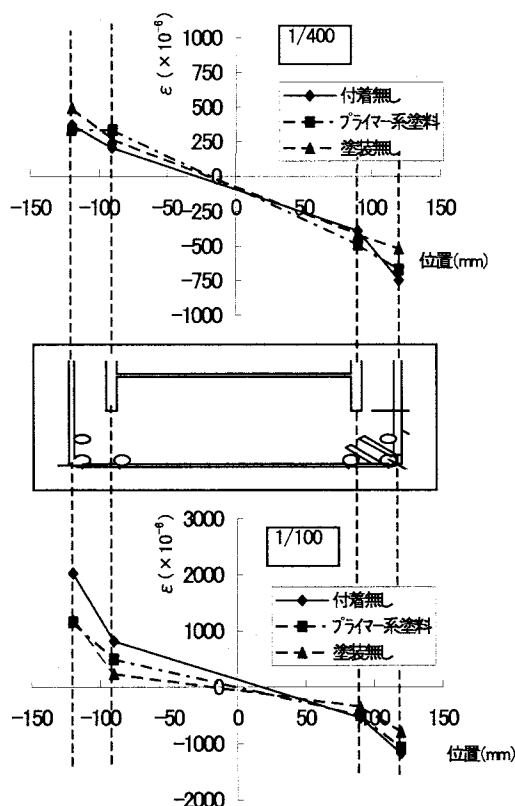


図17 断面内歪分布

(3) 歪性状：柱頭より270mm下がった断面内の歪分布 ($R=1/400$ 、 $1/100$ 正側第1サイクル目)を図17に示す。 $R=1/400$ (曲げひび割れ発生程度) では、試験体間の歪分布に相違は見られず概ね平面保持している。 $R=1/100$ (降伏後) では各試験体とも平面保持が成り立たず鉄筋側の歪が大きくなる。試験体間で比較すると、鉄骨の歪は付着が小さい試験体ほど値が大きい。

内蔵鉄骨の材軸方向の歪分布 ($R=1/400$ 、 $1/100$ 正側第1サイクル目)を図18に示す。各試験体とも材軸方向の歪分布はモーメント分布に沿った形状を示す。 $R=1/400$ では試験体間の相違は見られない。 $R=1/100$ では付着が小さい試験体ほど材軸方向歪分布が引張側にシフトする傾向を示す。

一方で最大耐力は各試験体でほぼ一致することから、スタブ内に鉄骨が定着され部材全体では平面保持が成立していると考えられる。しかし、これらの鉄骨・鉄筋の歪性状の相違が最大耐力以降の履歴性状へ影響を及ぼすものと考えられる。

(4) 最大耐力：最大耐力の実験値と計算値 (SRC規準終局曲げ耐力式) の比較を表5に示す。各試験体とも計算値と実験値は良い対応を示し、鉄骨が塗装及び付着無に対しても曲げ耐力が評価出来る。

表5. 最大耐力一覧

試験体	方向	最大値	計算値	実/計
N0.1	正	307.5	292.6	1.051
	負	-302.4	-292.6	1.034
N0.2	正	309.7	292.6	1.058
	負	-310.3	-292.6	1.060
N0.3	正	299.1	292.6	1.022
	負	-300.7	-292.6	1.028

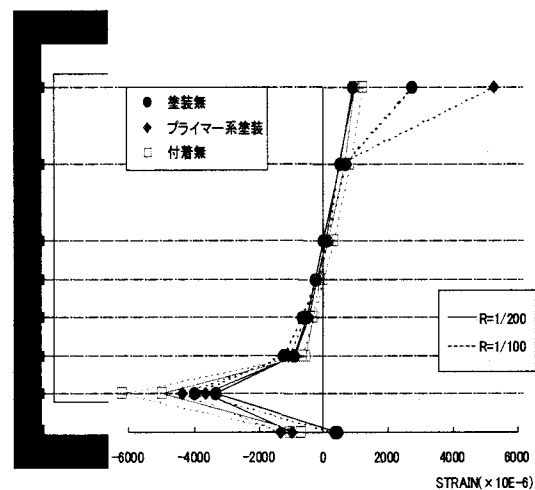


図18 材軸方向歪分布

5. まとめ

鋼材-コンクリート間の付着性状に対する、塗装の影響及びコンクリート強度の影響を実験により検討した結果下記の結論を得た。

- 1) プライマー系塗料による最大付着耐力の低下は 7～22%であった。このときコンクリート強度が高いほど耐力低下の割合が小さくなる。一方、水性ペンキ、錆止め塗料では付着耐力は、既往の研究と同様に約半分にまで低下する。
- 2) 実験に用いた試験体の形状寸法の範囲では、コンクリート強度(σ_B)が高い程、付着耐力(τ_B)は高くなる。しかし、 τ_B の σ_B による増大は、比例的(線形的)な上昇ではなく、 $\sigma_B > 30\text{N/mm}^2$ では σ_B の増大に対する τ_B の上昇率は小さい。
- 3) 本実験で得られた付着耐力は、SRC 規準の短期許容付着応力度に対し、塗装無では 4.0～5.5、プライマー系塗料試験体では 3.1～4.8 であった。

また、内蔵鉄骨の付着の良否を変数(防錆処理の有無及び付着無し)に SRC 柱の定軸力下での曲げせん断実験を行い下記の結論を得た。

- 4) プライマー塗装試験体の履歴特性は塗装無のものとはほぼ同一であった。
- 5) 付着無試験体では、最大耐力以降の耐力低下が早期に生じる。また、降伏後の履歴面積も小さい。
- 6) スタブ内に鉄骨が定着されることにより、部材全体では平面保持が成立していると考えられる。
- 7) 今回の実験範囲では、プライマー系塗装・付着無について曲げ終局耐力を SRC 規準終局曲げ耐力式により評価可能である。

【謝辞】

本実験の実施・データ整理に際して、日東みらい建設(株)高取尚人、柏倉猛両氏並びに東京電機大学建築学専攻福田剛、同大学卒論生丸山愛、三宅祥子各氏(平成13年度)の協力を得た。また、本実験に用いた防錆塗料は日本化成(株)より提供いただいた。ここに関係各位に深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2001.1