

山本 貴士^{*1}, 小澤 一宏^{*2}, 伊藤 秀治^{*3}, 中村 亮太^{*4}

要旨: 本研究では,電気防食機能を付与した炭素繊維シート補強工法の確立を目的として,導電性樹脂を用いた陽極システムの導電性,機械的性質および付着強さを検討した。また,本陽極システムを適用した RC 曲げ部材中の鉄筋について,通電および防食特性を検討するとともに,曲げ補強部材としての耐荷特性を検討した。本陽極システムを適用した RC 部材中の鉄筋への通電が可能であること,現時点までの鉄筋の防食効果ならびに曲げ補強効果を確認した。

キーワード: 炭素繊維シート, 導電性樹脂, 電気防食, 曲げ補強

1. はじめに

鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化に対して,近年,電気化学的防食工法が注目されている。このうち電気防食工法は,鉄筋の電位を強制的に卑な方向へ変化させ,不活性領域に移動させるもので,鉄筋の腐食進行抑制に有効であるが,耐荷力や変形能力の向上は期待されていない。一方,耐荷力や変形能力の向上には,炭素繊維シートを用いた補強工法が有効である。この工法には,炭素繊維シート貼付けによって,外部からの劣化因子の侵入を抑制する遮水系の補修工法としての側面もあるが,既存部材にこれまでに蓄積された劣化因子による鉄筋腐食の進行を抑制することは困難である。

本研究で検討する電気防食機能を有する炭素繊維シート補強工法は,連続繊維シートのうち導電性を有する炭素繊維シートに電気防食の陽極材としての機能を付与することで,鉄筋の腐食進行を防止するとともに,補強により部材の力学的性能を回復あるいは向上させ,さらに耐久性能を向上させようとするものである。まず,導電性樹脂,炭素繊維シートに導電性樹脂

を含浸させたもの(以下 CFRP)およびこれらをコンクリートに接着したものの導電性,機械的性質,付着強さを検討した。次に,本陽極システムを適用した RC 曲げ部材について,分極・復極特性および防食特性を検討するとともに,曲げ耐荷特性を検討した。

2. 実験概要

2.1 樹脂および CFRP の導電性,機械的性質および付着強さ

(1) 導電性樹脂の配合

導電性樹脂は,ベースとなるエポキシ樹脂に導電性付与材を添加する方法で検討した。導電性付与材には,炭素繊維シートと同質のカーボンブラック(以下 CB)を用いた。標準状態のコンクリートと同等の抵抗率($10^2 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)を目標に,CB 添加量を 0.0, 3.3, 6.6, 8.0, 10.0%として抵抗率($\Omega \cdot \text{cm}$)を測定した。

(2) 導電性

導電性は,樹脂単独の硬化物および表-1 に示す炭素繊維シートに含浸させた CFRP について検討した。供試体の形状・寸法と測定方法を図-1

*1 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 助手

*2 日石三菱(株)中央技術研究所複合材料グループ 主事

*3 コニシ(株)大阪研究所ボンド事業本部研究開発第四部 主任

*4 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室 研究員

表-1 炭素繊維シートの仕様

編込み	一方向
目付量 (g/m ²)	200
厚さ (mm)	0.11
引張強度 (N/mm ²)	3400
ヤング係数 (kN/mm ²)	230

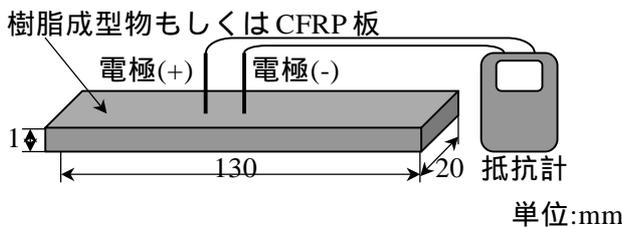


図-1 CFRP板および抵抗率測定方法

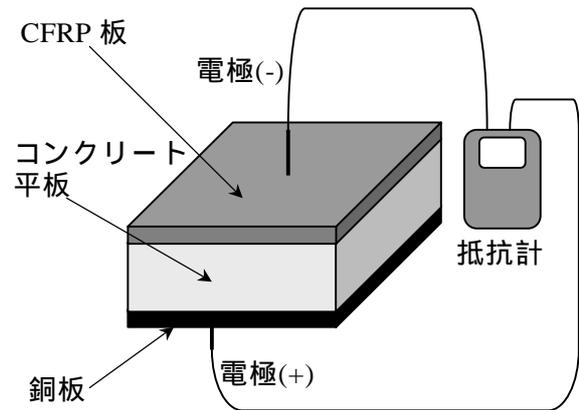


図-2 コンクリート平板供試体

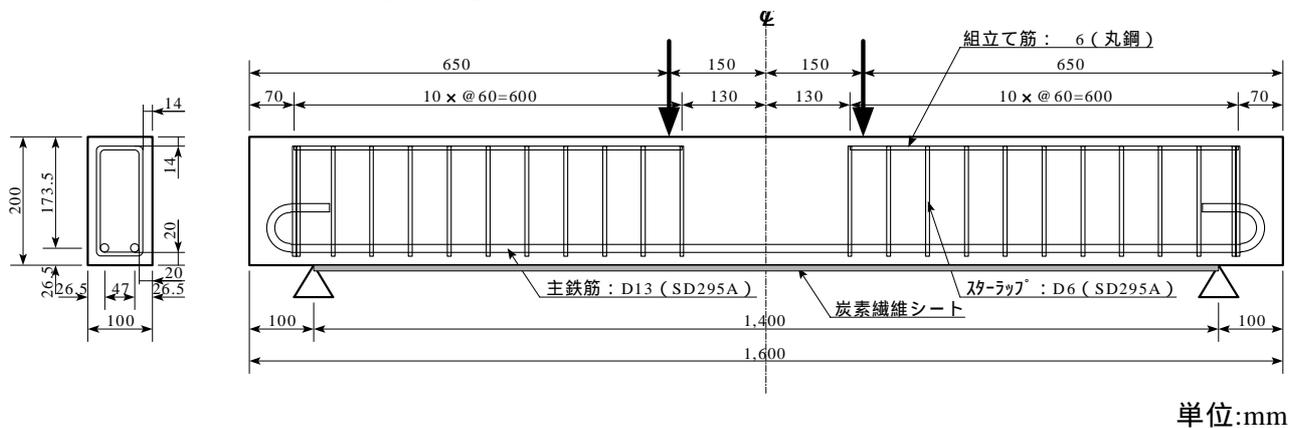


図-3 はり供試体の形状・寸法

に示す。供試体を 20 雰囲気下で 7 日間養生した後、25V の電圧を印加し、デジタル絶縁抵抗計を用いて抵抗率を測定した。

(3) 機械的性質

樹脂単独の硬化物の圧縮強度、引張強度試験ならびに CFRP の引張強度試験を JIS に規定されている方法に準拠して供試体を作製し、行った。試験は、いずれも供試体を 20 雰囲気下で 7 日間養生した後にいった。

(4) コンクリート供試体における導電性および付着強さ

JIS A 5304 に規定されているコンクリート平板 (300^B × 300^L × 60^t mm) の表面をサンディング処理した後、(1)の導電性樹脂を用いて炭素繊維シートを接着し、20 雰囲気下で 7 日間養生した後、図-2 に示す方法で抵抗値を測定した。

また、同様にして作製した試験体にて一軸引張試験機を用いて付着強さの測定を行った。

2.2 RC はり供試体の通電および防食特性

(1) 供試体

供試体は、2-D13 (SD295A) の単鉄筋はりで、かぶりを 20mm とした。また、電気防食の対象は主筋とし、スターラップには防錆処理を施した。コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比 60% の配合とし、過酷な腐食環境とするために NaCl=10kg/m³ を外割で混入した。作製した供試体を図-3 に示す。2.1 と同様の炭素繊維シートを、導電性プライマーおよび 2.1(1)の CB 添加率 8.0% の導電性樹脂 (以下、高導電性樹脂) を用いて、供試体下面の支点間に軸方向 1 層接着した。

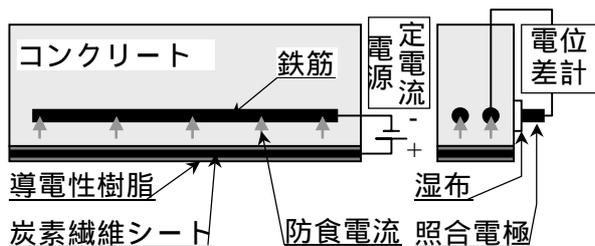


図-4 鉄筋の電位測定方法

(2) 養生条件

供試体の養生は、脱型後 20 日の室内で材齢 21 日まで湿布養生を行い、材齢 28 日で炭素繊維シートを接着した。その後、7 日間の 20 日室内養生ののち、乾湿繰返しの腐食促進養生に移行した。乾湿繰返しの環境条件は、高温多湿状態（温度 60℃，湿度 90%）を 3 日間、低温乾燥状態（温度 15℃，湿度 60%）を 4 日間というサイクルとした¹⁾。

(3) 測定方法および試験項目

鉄筋の電位測定方法を図-4 に示す。測定は、照合電極（飽和塩化銀電極）を用いて、供試体中央の鉄筋高さ位置の供試体両側面から表面に湿布を介して、2 本の主鉄筋を対象に行った。通電は、初期の通電電流量を設定するための分極試験と防食効果を確認するための復極試験を行った²⁾。復極試験は通電遮断後 24 時間の目標復極量を 100mV とし、満足しない場合には電流量を調整して再度通電することとした。また、比較のために、無補強無通電供試体の自然電位測定も行った。

2.3 曲げ補強部材の耐荷特性

(1) 供試体

曲げ試験には、2.2(1)と同様の供試体を用いた。ただし、樹脂の種類が補強部材の耐荷性状に与える影響を検討するために、炭素繊維シートの含浸・接着樹脂として高導電性樹脂の他に CB 添加率 5.0% で作業性を考慮したもの（以下、高施工性樹脂）と通常の耐震補強で用いられる樹脂（以下、普通樹脂）を使用した。曲げ試験供試体は、無補強および普通樹脂がそれぞれ 2 体ずつ、高導電性および高施工性樹脂がそれぞれ

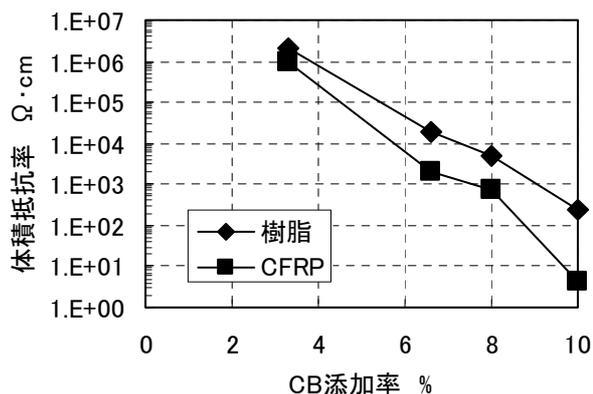


図-5 樹脂および CFRP の抵抗率

4 体ずつである。

(2) 載荷方法および測定項目

載荷は、スパン長 1400mm に対し曲げスパン 300mm の一方向対称 2 点載荷とし、降伏変位の奇数倍で 1 回の繰返しを行った。降伏荷重時変位 δ_y は、無補強供試体の荷重-変位曲線の屈曲点から定めた $\delta_y=5.22\text{mm}$ とした。また、終局はポストピーク領域で、荷重が降伏荷重まで低下した点とした。荷重、スパン中央変位、両支点変位およびスパン中央の炭素繊維シートひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 樹脂および CFRP の導電性、機械的性質および付着強さ

(1) 導電性

CB 添加量と抵抗率の関係を図-5 に示す。樹脂および CFRP の抵抗率は、CB 添加量の増加にともない小さくなり、コンクリートの抵抗率（ $10^3\Omega\cdot\text{cm}$ 程度）を満足するためには、樹脂単独の場合 8% 程度、CFRP にした場合 6.6% 程度の CB 添加量が必要である。一方、CB 添加量の増加にともない樹脂の粘度が増加し、作業性が低下したことから、作業性に関する改善策が必要であると考えられる。また、コンクリート平板に施工した場合の抵抗値は、樹脂の抵抗率に比例する傾向が見られた。

(2) 機械的性質および付着強さ

CB 添加量と樹脂の圧縮、引張強さおよび CFRP 引張強さの関係を図-6 に示す。圧縮、引

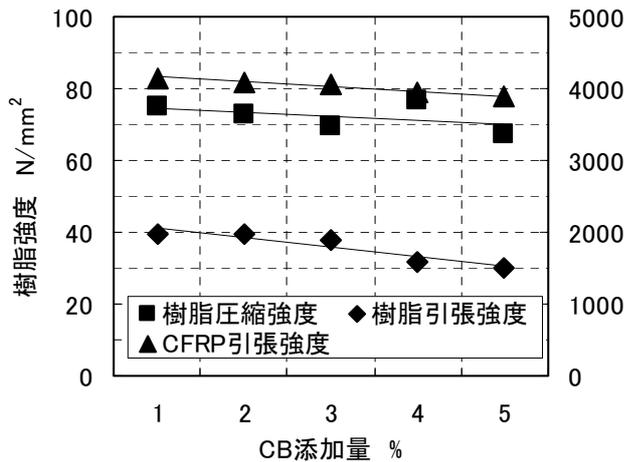


図-6 樹脂およびCFRPの機械的性質

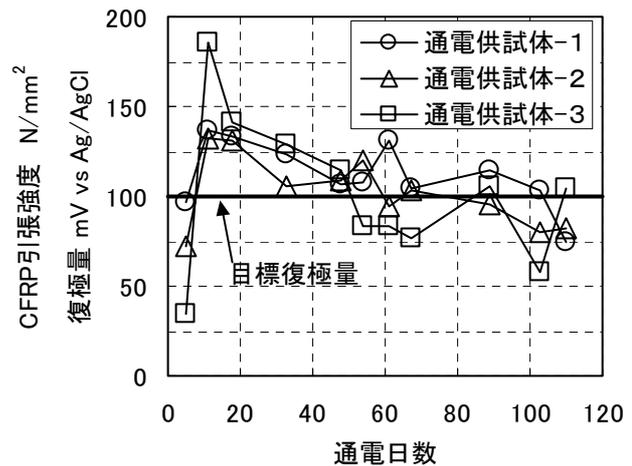


図-8 復極量の経時変化

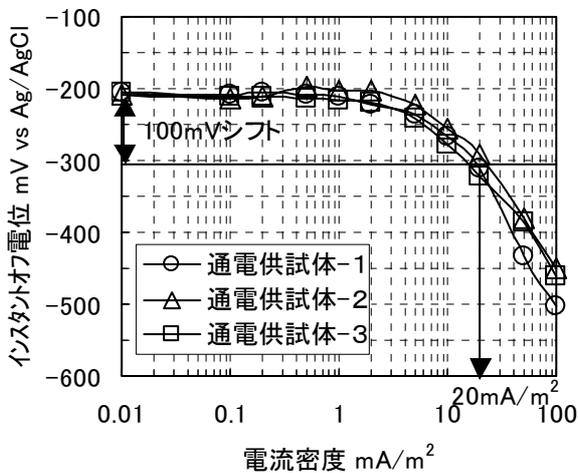


図-7 分極試験結果 (E-log I 関係)

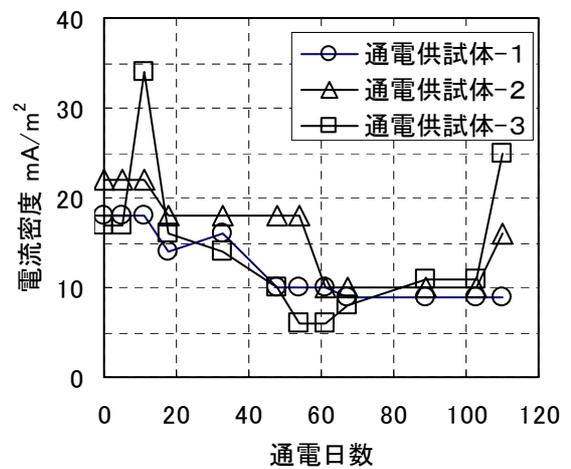


図-9 電流密度の経時変化

張強さともに CB 添加量の増加にともない低下する傾向が見られた。ただし、低下の程度は顕著でなく、いずれの添加量においても CFRP の引張強度は補強に要求される特性値を満足している。一方、付着強さでは、CB の有無、添加量による変化は見られず、いずれもコンクリート母材破壊を示した。

3.2 RC はり供試体の通电および防食特性

(1) 分極試験

分極試験の結果 (E-log I 関係) を図-7 に示す。電気防食を実施した 3 体の供試体は、いずれも 2mA/m² 程度の電流密度でインスタントオフ電位が卑な方向に変化し始めた。また、100mV の分極量を得るのに必要な電流密度は、いずれの供試体も約 20mA/m² となった。

(2) 復極試験

通电遮断後 24 時間の復極量の経時変化および電流密度の経時変化をそれぞれ図-8, 図-9 に示す。復極量は通电 20 日程度まで若干ばらつきが見られたが、通电調整することでおおむね目標とした復極量 100mV を満足することができた。しかし、所要の復極量を得るのに必要な電流密度は、材齢の経過にともない、通电日数 100 日程度までは小さくなる傾向を示したものの、その後は急激に大きくなる傾向を示した。また、一定の電流密度を保つために必要な電源電圧は、通电開始後から増加する傾向を示した。アノード側となる CFRP 中の炭素に何らかの反応が生じ、導電性が低下していると推察できるが、詳しい原因については今後の課題である。

(3) 自然電位の経時変化

自然電位の経時変化を図-10 に示す。通电開

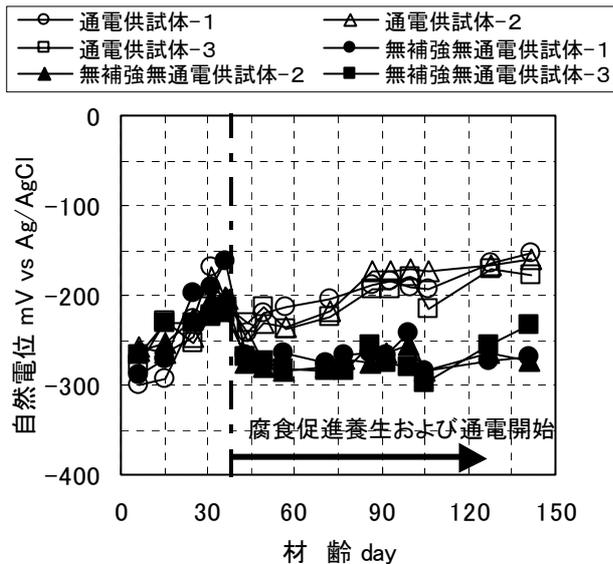


図-10 自然電位の経時変化

始前の自然電位は、いずれの供試体も 100mV 程度貴な方向へ推移した。これはかぶりの含水率や強度などの品質変化によるものと考えられる。一方、通電直後からの自然電位は、通電の有無による違いが見られ、その差は材齢の経過ともなって大きくなっている。材齢 140 日では、通電供試体の自然電位が無補強無通電供試体に比べて 100mV 程度貴な方向にシフトし、防食効果が確認できる。

3.3 曲げ補強部材の耐荷特性

(1) 荷重-変位曲線

シートは、はく離時付近までの荷重-変位曲線を図-11 に示す。図中にははく離時の変位をあわせて示した。部材降伏後の剛性に差は見られないものの、CB を添加した樹脂とプライマーを用いたものの方が、はく離時の変位が小さくなった。はく離は、載荷点直下の曲げひび割れの起点から支点に向かって生じたが、普通樹脂では、はく離したシートにかぶりが付着し、コンクリート中に破壊面を有するものであったのに対し、導電性を付与したものでは、導電性プライマーとコンクリートの界面で生じたと見られるものであった。3.1(2)の付着試験では、コンクリートの母材破壊であったことから、普通樹脂と同程度の付着強さを示したが、この曲げ試験で見られたピーリングをとまなうはく離に対し

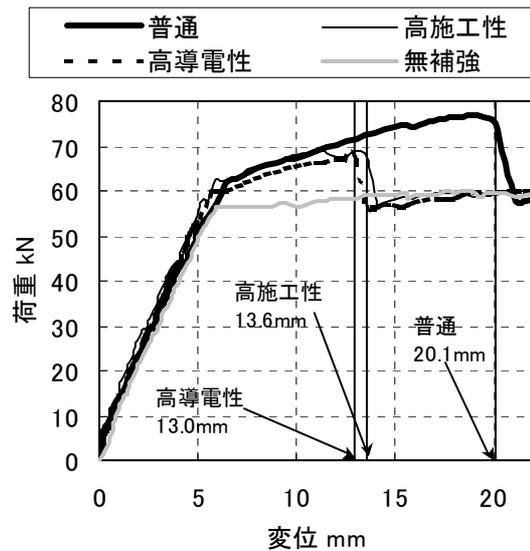


図-11 荷重-変位曲線

ては、導電性を付与した樹脂およびプライマーの付着強さが、接着に関与しない CB が添加されていることで、普通樹脂およびプライマーの組合せに比べて小さくなったといえる。したがって、曲げ補強への適用では、導電性樹脂およびプライマーの接着性あるいはコンクリートの表面処理方法に改善が必要であると考えられる。(2) はく離時シートひずみおよび最大荷重

CB 添加量がはく離時におけるスパン中央のシートひずみに与える影響を図-12 に示す。図中には、平面保持およびシート完全接着を仮定した曲げモーメント-曲率解析において、部材終局時、すなわち上縁コンクリートが終局ひずみに達したときのシートひずみ計算値をあわせて示した。ひずみゲージの位置と曲げひび割れの状態により、ひずみの値にばらつきは見られるものの、導電性を付与した樹脂の方が、普通樹脂よりも、はく離時のシートひずみが小さくなった。しかし、破断ひずみ (1.6%) の約 50%、またシート完全接着を仮定した部材終局時のシートひずみの約 58%まで、シートの引張強度を利用できた。一方、CB 添加量による影響は、認められなかった。このことは、導電性樹脂ではなく、導電性プライマーの特性で、はく離時期が決定した可能性があることを示している。

次に、CB 添加量が最大荷重に与える影響を

図-13 に示す．導電性を付与した樹脂の方が，はく離が早期に生じ，それに応じて最大荷重が小さくなる傾向を示している．また，シート完全接着を仮定し，上縁コンクリートの圧潰により終局となった計算値よりも小さくなった．ただし，曲げ補強した全ての供試体の最大荷重は，無補強供試体よりも大きいことから，導電性樹脂，プライマーの接着性あるいはコンクリートの表面処理方法の改善を念頭におけば，本陽極システムの曲げ補強への適用は可能である．

4. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて結論とする．

- (1) エポキシ樹脂に対し CB を添加することにより，樹脂に導電性を付与することができた．また，コンクリートの標準状態に近い抵抗率を得るためには，CFRP にした場合 6.6% 程度の CB 添加量が必要であることがわかった．
- (2) 導電性樹脂を用いた CFRP の引張強度は，CB 添加量の増加にともない低下する傾向が見られたが，低下の程度は顕著でなく，補強に要求される特性値を満足した．
- (3) 導電性樹脂を用いた CFRP 陽極システムを RC はり供試体に適用することで，コンクリート中の鉄筋への通電が可能であることがわかった．また，通電日数 100 日程度までの自然電位を指標とする鉄筋の防食効果を確認した．
- (4) 本陽極システムを適用した RC はり部材の通電特性において，通電日数 100 日以降，所要の復極量を得るために必要な電流密度および一定の電流密度を保つために必要な電源電圧が増加する傾向を示したことから，これらの原因を今後検討していく必要がある．
- (5) 導電性樹脂を用いて曲げ補強した供試体では，従来の樹脂を用いたものより，シートのはく離が早期に生じた．ただし，導電性樹脂，プライマーの接着性あるいはコンクリートの表面処理方法の改善を念頭におけば，本陽極システムの曲げ補強への適用は可能である．

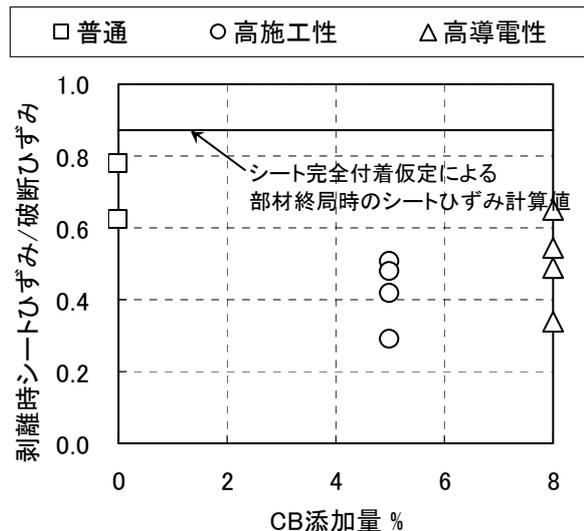


図-12 はく離時のシートひずみ

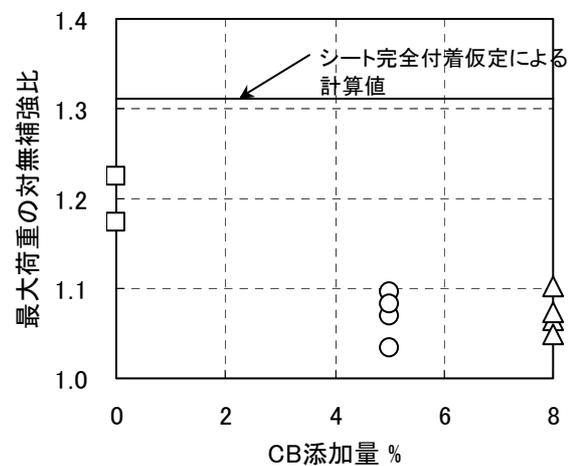


図-13 最大荷重

謝辞

本研究の実施にあたり，京都大学大学院教授宮川豊章先生，同助教授服部篤史先生，ならびに住友大阪セメント(株)川俣孝治氏に多大なご協力，ご指導を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．

参考文献

- 1)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，JCI-SC3，pp.9-15，1987.4.
- 2)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，pp.117-126，1994.10.