繊維補強セメント複合材料内にコイルを埋設した

走行中給電用送電コイルの評価

清水修,山田翔太,藤本博志(東京大学) 田中浩一,佐藤正憲(大林組) 角谷勇人,高橋英介,山口宜久,谷恵亮(デンソー)

Evaluation of Transmitter Coil Embedded in High Performance Fiber Reinforced Cement Composite Osamu Shimizu, Shota Yamada, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Koichi Tanaka, Masanori Sato (OBAYASHI CORPORATION)

Hayato Sumiya, Eisuke Takahashi, Nobuhisa Yamaguchi, Keisuke Tani (DENSO CORPORATION)

Short cruise range is a major issue of electric vehicles. Dynamic wireless power transfer (DWPT) is proposed to solve this problem as it can reduce batteries on electric vehicles. The transmitter coil of DWPT system is embedded in the road. Thus the thickness of the road pavement is thicker, the durability of the road pavement is stronger. However, the thickness of the road pavement is thicker, the coupling coefficient of the transmitter coil and the receiver coil is lower. Hence there is a trade-off between the durability and efficiency in the thickness of the road pavement. The transmitter coil that is embedded in the fiber-reinforced cement composite is proposed to solve this problem. It realize both the high durability and the thin pavement.

キーワード:走行中ワイヤレス電力電送,電力伝送効率,舗装技術 (dynamic wireless power transfer, efficiency, pavement technology)

1. 研究背景

交通社会を持続可能にするために走行時に温室効果ガス を排出しない電気自動車 (EV: Electric Vehicle)の普及が求 められている。一方で EV の課題として,電池製造の際に 排出される温室効果ガス (GHG:Green House Gas) 排出量や, 性能的課題としての航続距離が挙げられる。航続距離の伸 長には電池の搭載量を増やすことが効果的ではある。しか し,電池の搭載量を増やすことが効果的ではある。しか し,電池の搭載量を増やすと電池製造に係る GHG 排出量は 増大する。また大量の電池を搭載すると車体重量が増える ことにより,走行抵抗が増加し,走行にかかるエネルギー が増大する。走行にかかるエネルギーが増大すると EV の 充電に係る発電量が増える。多くの国で発電には化石燃料 を用いるため発電時の GHG 排出量が増加する。以上のよ うに利便性を高めるために大量の電池を使用する EV の導 入は,EV 普及の大きな目的の一つである GHG 排出量の削 減と化石燃料の使用量削減の実現を困難にする。

そこでこれらの課題の抜本的解決方法として走行中給電 が提案されている。走行中に車両に給電を行うことで, EV に大きな電力を蓄える必要がなくなり,車両に搭載する電 池を大きく削減⁽¹⁾することができ,製造にかかる GHG 排 出量削減⁽²⁾することが期待される。また車両に搭載する電 池を削減することで,走行にかかるエネルギーを削減⁽³⁾す ることができる。 走行中給電の方式としては接触式給電⁽⁴⁾と非接触式給電 (WPT: Wireless Power Transfer)^{(5) - (9)}があり,国際規格とし て磁界結合方式が提案されている。本研究で扱う走行中給 電システムは磁界結合方式である。

磁界結合方式の停車中給電システムは駐車場に設置する ことを想定しており、送電コイルに乗り上げる際の車両速 度は低い。そのため車両挙動に大きな影響はなく問題なく, 送電コイルを埋設する必要がない。しかし走行中給電シス テムでは車両速度が高い状態で給電することがあり、車両 速度が高い状態で車両が送電コイルに乗り上げると車両挙 動が不安定になり、事故につながる可能性がある。このよう に走行中給電用の送電コイルを路面上に配置すると危険で あることから、送電コイルを路面内に埋設する必要がある。

舗装の耐久性を高めるためには舗装の厚さを増すことが 効果的である⁽¹⁰⁾一方,送電コイルの上の舗装の厚さが厚け れば厚いほど,送電コイルと受電コイルの相互インダクタ ンスは低下し,給電効率の低下を招く。そのため,走行中 給電システムにおいては舗装を薄くすることが重要である。 アスファルトは骨材の大きさで最小の舗装厚さが決まるた め,40mm 程度の厚さが必要になる。またコンクリート舗装 は薄くすると荷重に耐えられない。そこで,本研究では薄 い舗装を実現する手法として繊維補強セメント複合材料に コイルを埋設することを提案する。第2章ではシステム構 成ついて述べ,第3章では本研究で採用した繊維補強セメ ント複合材料について述べる。そして第4章で路面構造と 試作,路面単体の評価について述べ,第5章で路面への設 置と評価について述べた後に,第6章にて結論をまとめる。

2. システム構成

非接触給電システムの構成を Fig. 1 に示す。送電側,受 電側それぞれのコイルと共振コンデンサを直列に接続する SS(Series-Series)方式である。送電周波数は停車中給電の規 格範囲内である 85 kHz である。送電側のコイルと共振コン デンサがコンクリート内に埋設され,ACDC コンバータと インバータは歩道や路側帯といった地上に配置することを 想定している。コンクリートから出た配線は地中を通って, インバータに接続されるため道路上に配線はない。受電側 のコイル,共振コンデンサ,整流器と充電制御回路は車両 に搭載される。

送電コイルの構造を Fig.2 に示し,主要諸元を Table 1 に 示す。送電コイルはケース,蓋,ボビン,スペーサ,巻き線, フェライトで構成される。ケース内にはコイルだけでなく, 共振コンデンサを配置し,コイルに接続することが可能で ある。ケースの役割はコイルの絶縁と荷重に耐えることで あり,ボビン役割はコイルの形状保持である。スペーサの 役割は巻き線とフェライトの絶縁であり,フェライトの役 割は漏れ磁束の低減である。本研究ではコンクリートにコ イルを埋設するため,耐アルカリ性の樹脂を用いる必要が ある。そこで,樹脂部品の材料はすべて PP(Polyepropylene) を使用することとした。ケースと蓋,ボビン,スペーサの材 料は PP,フェライトの材料は PC95 である。巻き線はリッ ツ線を使用している。AWG22 の導線を孫撚り5本,子撚り 5本,親撚り 250本の構成となっており,計 6250本使用し た撚り線である。



Fig. 1 System Configurations of Chargers.

Table 1 Specification of Transm			ansmitter	Coil
	parameter	unit	value	
	length of case	mm	650	
	width of case	mm	360	
	height of case	mm	50	
	length of coil	mm	405.4	

width of coil turns of coil

layer of coil

mm 205.4

7

2

3. 繊維補強セメント複合材料

コンクリートは圧縮強度が高い一方,引張強度は圧縮強 度の10分の1程度であるため,たわみに弱い。たわみに 耐える道路構造部材として使用するために,鉄材による補 強を行うことが一般的である。送電側と受電側のコイル間 ギャップをきわめて小さくすると鉄筋が配置できなくため, 鉄筋の代わりに鋼繊維を混入した繊維補強コンクリートを 使用することとなる。

しかしながら、磁界結合方式の走行中給電システムでは 金属を送電コイル上に用いると金属内で渦電流が発生し, 損失増加や発熱が懸念されるため鉄材を使用できない。そ のため、本研究では鋼繊維の代わりに PP の繊維を使用して 引張軟化特性を向上させることに着想した。

本研究で使用した繊維補強セメント複合材の PP 繊維の混 入量は 27 kg/m³ である。セメントコンクリートと本研究で 使用した繊維補強セメント複合材のひずみと引っ張り応力 の関係を Fig. 3 に示す。繊維補強セメント複合材はひずみ が大きくなっても引張応力が残ることから、セメントコン クリートよりも大きな輪荷重に耐えられることがわかる。

4. コンクリート試験体の試作と評価

〈4・1〉 コンクリート試験体の構造 公道での路面敷設 をする際には、新設の道路の場合を除いて、交通規制が必 要となる。公共交通の定時運行や渋滞への影響が少ない夜 間に既設の路面撤去から敷設までの工事を完了するために は、9時間程度ですべての工程を終えることが望ましい。繊 維補強セメント複合材料の強度が発現するまでの養生期間 が10日かかることから、現道での敷設は困難である。そこ で、本研究ではあらかじめ繊維補強セメント複合材料の中 にコイルを埋設し、コンクリートとコイルが一体となった



Fig. 2 Structure of Transmitter Coil.

試験体を用いることで工事期間の短縮を狙っている。本論 文ではこの試験体をコンクリート試験体と呼ぶ。本方式は 高速道路等の床盤に使用されるプレキャストコンクリート と似た方式である。

コンクリート試験体の構造の断面形状とコイルのレイア ウトを Fig. 4 に示す。ここに示した断面は路面横断方向の 断面である。コンクリート試験体は鉄筋コンクリート部分 と繊維補強セメント複合材料部分で構成されている。鉄筋 コンクリートで全体の剛性を確保し、繊維補強セメント複合 材料でコイルへの荷重を分担する構造となっている。コイ ル上に敷設する繊維補強セメント複合材料の厚さは 25 mm である。鉄筋コンクリート側に磁束が漏れないようにコイ ルの下部には、樹脂でコーティングされたアルミ板による シールドを設けている。そしてアルミ板とコイルの間には モルタルを敷いてコイルの位置決めと固定をしている。

試験体に10tf相当の荷重をかけた場合の有限要素法によ



Fig. 3 Strain vs Tensile Stress.



Fig. 4 Structure of Test Piece



Fig. 5 FEM Result of Test Piece.

る解析結果を Fig. 5 に示す。ひずみは最大でも 885 µと十 分に小さく、コイル上の 25 mm の厚さでも 10 ff の荷重にも 耐えられる構造となっていることが分かる。

〈4・2〉 コンクリート試験体の試作 コンクリート試験 体の繊維補強セメント複合材料打設工程は下記のとおりで ある。

1. 鉄筋コンクリート上へのコイルの設置

2. アルミとコイルの間をモルタルで間詰め

3. 繊維補強セメント複合材料の打設



(a) Coil Setting.

(b) Coil Fixing.



(c) Casting

(d) Curing



(e) Finished Test Piece Fig. 6 Manufacturing Procedures of Test Piece.

4. 繊維補強セメント複合材料の養生

それぞれの工程と完成品を Fig.6 に示す。コイルはアル ミシールドから 20 mm 離した位置に配置するため,モルタ ルをコイルの下部に敷いている。コイルから出た配線は樹 脂製のコルゲートチューブで保護している。繊維補強セメ ント複合材料の打設は人力で行っているが,機械化するこ とが可能である。完成品の白色に近い灰色の部分が繊維補 強セメント複合材料であり,その他の部分が鉄筋コンクリー トで構成されている。コイルから出た配線はコンクリート 試験体側面から取り出している。

5. コンクリート試験体製造工程におけるコイル抵 抗値の変化の評価

セメントに直接コイルを埋設する場合に,コイル抵抗値 へ影響を与えること⁽¹¹⁾ が報告されている。そのため,ここ では繊維補強セメント複合材料を打設する過程でのコイル パラメータの変化について検証を行った。検証方法はLCR メータによる測定である。

今回製作したコンクリート試験体外の配線長は約 11m あ り、コンクリート試験体を作成した工場内では十分な広さ を確保できなかったため、配線を人の手で持ち上げて計測 していた。そのため、インダクタンスの計測値が不安定で あったことから本研究では評価対象外としている。抵抗値 の測定結果を Fig. 7 に示す。打設直後には抵抗値の上昇が 確認できる。しかし 11 日の養生後には、セメントが完全に 硬化した後に計測した際には元の値に戻っていることが確 認できた。打設直後はセメントの凝固と共にセメントの電 気抵抗率が上昇したものと考えられる。また既往研究と異 なる点はコイルの線材を直接埋設する方式ではなく、線材 の外側に樹脂製のケースを設けたことにより、繊維補強セ メント複合材料とコイルの間の寄生容量を低減でき、コイ ルからの漏れ電流が低減できたためと考えられる。



Fig. 7 Parameter Change by HPFRCC Pavement.

6. コンクリート試験体の設置と評価

アスファルト舗装は表層,基層,路盤,路床,路体とい う5つの構造で構成されているため,それぞれの層で整地 と締固めを行い,層毎の構造を構築していく。それに対し て,本研究で開発したコンクリート試験体は表層から路盤 までの構造が一体の構造となっている。そのため,設置の 工程は下記のようになる。

- 1. 路面の掘削
- 2. 整地
- 3. コンクリート試験体の設置
- 4. 試験体間へのコンクリート打設
- 5. 試験体周辺の埋め戻し

本研究では2つの試験体を埋設している。路面の掘削と 整地はアスファルト舗装と同様に行い,試験体の設置には クレーンを用ている。試験体の側面にはクレーンを引っ掛 けるための吊り治具を取り付けられるように,あらかじめ, 金属の長ナットが埋設されている。コンクリート試験体間 には一夜での工事が可能なように速乾性のコンクリートを 打設している。そして,コンクリート試験体の側面から出



(a) Excavation.



(b) Setting Test Piece .

(c) Paving around Test Piece.

Fig. 8 Setting Procedures of Test Piece.

Table 2 Specification of Transmitter Coil

parameter	unit	value
length of case	mm	230
width of case	mm	250
height of case	mm	30
length of coil	mm	185.4
width of coil	mm	185.4
turns of coil	-	7
layer of coil	-	2

たコイルの配線は樹脂製の配管に通して埋め戻しの際の転 圧による荷重から保護している。コンクリート試験体周辺 の埋め戻しには通常の道路舗装で使用される砕石や舗装用 アスファルトを使用している。

ここでは送電用コイルの評価としてコイルパラメータの 変化と電力伝送での評価を実施している。埋設前後でのコ イル抵抗値の変化を Fig. 9 に示す。

抵抗値は 7.6mΩ 上昇した。コンクリート試験体の設置前 と設置後の変化点はコンクリート試験体外の配線の経路で ある。

試作した工場内の計測では, 配線を人の手で持ち上げて 計測していた。それに対し, 設置後は十分な広さがある一 方, 一度試験体の下面の高さまで配線を下した後に, 地表 まで配策している。リッツ線はリッツ線自身の屈曲や周囲 からの圧力によって線同士の距離が変わることで抵抗値が 変化することがあるため, 配策の経路の違いによる影響と 考えられる。漏れ電流も要因としては考えられるが, 樹脂 製の保護管の中を通しているおり, 土壌とは直接接してお らず, 配線と土壌の間には空間ができていることから, 漏 れ電流の影響は小さいと考えられる。

電力伝送実験で使用した受電コイルの諸元を Table 2 に 示しの結果を Fig. 10 に示す。受電コイルも送電コイルと同 様の構造をしており,材料もそれぞれ送電コイルと同様で ある。

電力伝送で使用したインバータの周波数は 85.5 kHz, コ イルケース間の距離は 75 mm である。これは 25 mm の埋設



Fig. 9 Parameter Change by Pavement.



Fig. 10 Parameter Change by Pavement.

深さと 50 mm の車両への受電コイル取り付け高さから得ら れた値である。直流電源は送電側と受電側を共用している ため送電側と受電側の直流電圧は同一である。7.1 kW まで の電力伝送を確認しており,その時の電力変換器の効率を 含んだ DC to DC 効率で 91.7%を達成している。

7. 結論

本研究では繊維補強セメント複合材料内にコイルを埋設 した走行中給電用送電コイルの評価を実施した。本研究に よって得られた結論は下記のとおりである。

(1) 繊維補強セメント複合材料を活用することにより, コイル上の厚さ 25 mm の舗装で 10 t の荷重に耐えうる路面 構造を構築可能

(2) セメント打設前後でコイルパラメータが変化しな いコイルを作成することが可能

(3) コンクリート試験体の設置状況によりコイルパラ メータが変化するため,変化を考慮した設計が必要 本研究では電力伝送まで実施することができているが,共 振の調整等が不十分であることにより本来の性能を発揮で きない可能性があるため,今後は本試験体のさらなる高効 率化,高出力化を制御にて実現する。また,設置状況によ るコイルパラメータの変化の要因分析と分析に必要な実験 を進める。

謝 辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業 (グラント番号:JP-MJMI21E2) の支援を受けたことを付記する。

文 献

- (1) D.Gunji, K.Hata, O.Shimizu, T.Imura, H.Fujimoto "Feasibility Study on In-motion Wireless Power Transfer System Before Traffic Lights Section", 2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (WoW),(2019)
- (2) 清水修,永井栄寿,藤田稔之,藤本博志,郡司大輔,角谷勇人, 高橋英介,山口宜久,谷恵亮: "製造・発送電・走行を考慮し

SPC-22-224 HCA-22-049 VT-22-024

た走行中給電による温室効果ガスの削減効果", 電気学会 論文誌 D, No.142, Vol.10, pp.736-743, 2022

- (3) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto: "Potential for CO2 Reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan", *Energies 2020*, 13, 3342, Jun. 2020
- (4) T.Tajima, W.Noguchi, T.Aruga, "Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV", SAE Technical Paper 2015-01-1686(2015)
- (5) G.Covic, J.Boys, M.Kissin, H.Lu "A three-phase inductive power transfer system forroadway-powered vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.54, no.6, pp. 3370-3378(2007)
- (6) J.Huh, S.Lee, W.Lee, G.Cho, C.Rim "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles",IEEE Transactions on Power Electronics, vol.26, no.12, pp. 3666-3679(2011)
- (7) O.Onar, J.Miller, S.Campbell, C.Coomer, C.White, L.Seiber "A Novel Wireless Power Transfer for in-motion EV/PHEV Charging", 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)(2013)
- (8) A.Kamineni, M.Neath, A.Zaheer, G.Covic, J.Boys "Interoperable EV Detection for Dynamic Wireless Charging With Existing Hardware and Free Resonance", IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol.3, no.2, pp.370 - 379(2017)
- (9) L.Zhao, D.Thrimawithana, U.Madawala "Hybrid Bidirectional Wireless EV Charging System Tolerant to Pad Misalignment", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.64, no.9, pp.7079 - 7086(2017)
- (10) 日本道路協会「舗装設計便覧 平成 18 年度版」,日本道路協会,(2006)
- (11) Cirimele, Vincenzo, Riccardo Torchio, Antonio Virgillito, Fabio Freschi, and Piergiorgio Alotto. 2019. "Challenges in the Electromagnetic Modeling of Road Embedded Wireless Power Transfer" Energies 12, no.14, 2677