

RFID によるコンクリート施工情報管理システムの開発

Development of Construction and Quality Management System for Concrete Structures by Using RFID

松 元 和 伸^{*1}

Kazunobu Matsumoto

原 田 進^{*3}

Susumu Harada

阿 保 寿 郎^{*2}

Toshiro Abo

築 地 功^{*4}

Isao Tsukiji

松 田 浩 朗^{*1}

Hiroaki Matsuda

滝 波 真 澄^{*5}

Masumi Takinami

【要旨】

建設現場における RFID の信頼性・適用性を高めるためには、RFID を利用できる環境条件を明確化することが求められる。そこで、本研究では、建設現場特有の環境条件下での安定的な RFID 運用のために、HF 帯および UHF 帯 RFID 認識距離の評価を行い、HF 帯ではアンテナサイズの大きなカードタイプ IC タグが、UHF 帯ではアンテナサイズが大きく金属対応の IC タグが現場運用に適していることを明らかにした。そして、これらの結果を踏まえ、現場での RFID システムにそれぞれの IC タグを適用し、安定的運用が可能であることを確認し、建設現場特有の環境条件に最適な RFID の選定を可能とした。さらに、施工・品質情報を供用時にも活用し、トレーサビリティを確保することでコンクリート構造物の維持管理に活用できる、RFID によるコンクリート施工情報管理システムを開発した。今後、供用時も継続して管理者が活用できるように維持管理への適用を提案していく。

【キーワード】 RFID IC タグ トレーサビリティ 維持管理

1. はじめに

製品の生産管理や流通過程のトレーサビリティ確保のため、食品産業¹⁾や流通産業を中心に、RFID (Radio Frequency Identification) の導入が進められ、その有効性が認められてきている。また、社会資本整備を推進する建設分野では、建設構造物の品質を確保することが求められており、この分野でも RFID の導入により、コンクリートの品質管理や検査などの合理化・省力化さらにトレーサビリティの高度化に寄与することができると期待されている。

近年、建設分野において、RFID の実用化^{2), 3), 4)}への取り組みが、調査・測量・施工・維持管理領域で進められつつある。しかしながら、建設現場で情報通信技術を使用する場合、重機や建設資材など金属が多く存在すること、地下水や降雨など多くの水分が存在すること、現地の地形や構造物の形状によっては IC タグとアンテナが通信に良好な方向や距離に設置や移動ができないこと、などの特有の条件（ここではこれらを建設現場特有の環境条件と呼ぶ）を克服することが求められる。建設現場における RFID の信頼性・適用性を高めるためには、こう

した課題への対応が必要となる。

また、これまで建設現場では、施工・品質情報を紙や電子媒体で個別（ばらばらの）管理をしていたため、供用時の維持管理の段階になって、情報収集に大きな労力がかかったり、情報欠損があったりという問題が発生し、情報の一元管理を要望する声が高まっていた。近年、施工時の情報を一元化して管理する取り組みが広がっており、このような要求に応えることができる RFID などの情報通信技術を利用した施工時の品質管理システムが各機関で開発されつつある。しかしながら、施工時と供用時の情報が連結された管理がなされておらず、構造物を維持管理する上では不便なものとなっている。

本稿では、建設現場特有の環境条件下での安定的な RFID 運用のために実施した、HF 帯および UHF 帯 RFID 認識距離の評価と、建設現場への適用性について述べる。さらに、施工時および供用時の情報を連結し一元管理することで、トレーサビリティを確保できる、RFID によるコンクリート施工情報管理システムを示し、RFID の維持管理への適用を提案する。

1. 建設事業本部 技術研究所 第一研究室 2. 東北支店 建設事業部 企画 T 3. 大阪支店 北陸統括営業所
4. 建設事業本部 企画統括部 トンネル T 5. 首都圏土木支店 圏央道笠森トンネル作業所

表－1 RFIDの主な方式と特徴

方式	周波数帯	特徴
電磁結合方式	中波帯(MF帯) 400~530KHz	・モーターや動力線などによるノイズに強く、金属に対応しやすい ・近距離通信であり、FA分野での実績が多い
電磁誘導方式	長波帯(LF帯) <135KHz	・水の影響を受けにくい ・金属の影響を他周波数帯より受けにくい ・アンテナコイルを多く巻く必要があるため、小型化、低価格化に難点
	短波帯(HF帯) 13.56MHz	・水の影響を受けにくい ・電波方式に比べて通信距離は短い ・アンテナコイルを長波帯に比べ巻かないで良いため、小型化、低価格化が進む ・最も汎用性が高い
電波方式	極超短波帯(UHF帯) 860~960MHz 300MHz	・通信距離が他周波数帯に比べて長い ・HF帯に比べて指向性が強い ・導電体や、水分の影響を受けやすい
	マイクロ波帯 2.45GHz	・指向性が強く直線通信に優れるが障害物に弱い ・水分の影響を受けやすい ・電波環境(無線LAN, Bluetooth)から影響を受ける

2. RFIDの主な方式と特徴および選定

RFIDの主な方式と特徴を表－1に示す。これらの中で、HF帯は、水の影響を受けにくい、通信距離が短いという特徴がある。UHF帯は導電体や水の影響を受けやすいが、他の方式に比べて通信距離が長く、指向性が高いという特徴がある。建設現場に適用することを考えるとHF帯の水の影響を受けにくい、UHF帯の通信距離が長い、という特徴は非常に有用であり、これらが建設現場に適用できる可能性は高い。本研究では、この電磁誘導方式のHF帯と電波方式のUHF帯のRFIDを選定し、認識距離の評価のための実験を実施した。これらの実験は室内で実施し、以下の項目について検討した。

HF帯については、

- ・ICタグ角度と認識距離の影響、
- ・ICタグと後方金属の距離と認識距離の影響、

UHF帯については、

- ・建設現場特有の環境条件下でのICタグの認識距離の影響。

これによって、施工時、供用時ともに建設現場特有の環境条件に対して最適なRFIDを選定するためのデータベースを構築する。

3. HF帯RFIDの認識距離の評価⁵⁾

3.1 HF帯RFIDの認識距離測定実験

(1) 実験に用いたHF帯RFID機器

実験には、HF帯の2種類のリーダライタ(図－1)および2種類のICタグを用いた。リーダライタは、①内蔵アンテナタイプ(出力レンジ100mW)と②外部アンテナタイプ(出力レンジ1W)である。また、ICタグは、ISO15693規格⁶⁾に準拠し、かつ、入手が容易なシールタイプとカードタイプの2種類とした。

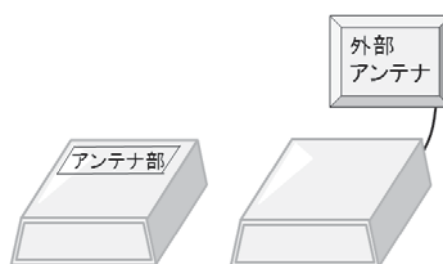
(2) ICタグ角度と認識距離の関係の評価実験の概要

ICタグのアンテナに対する角度(以下、ICタグ角

度と呼ぶ)とICタグ認識距離の関係を評価する実験の概要を図－2に示す。アンテナ位置を固定して、ICタグのアンテナに対する角度を変化させ、ICタグの認識可能距離を測定した。ICタグ中心とアンテナ中心を同一線上に配置し、アンテナとICタグとの認識距離はそれぞれの内面の中心間距離とした。ここで、内蔵アンテナタイプは認識距離が短く、現場での運用時にはICタグとアンテナは接触に近い(ICタグ角度0°)場合がほとんどであるため、内蔵アンテナタイプに対するICタグ角度を変化させた実験は省略した。表－2に比較検討ケースを示す。

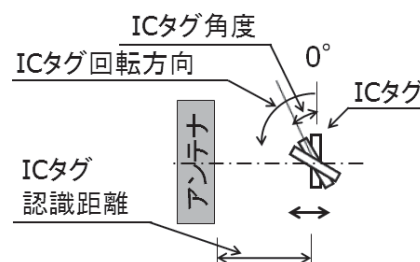
(3) ICタグと後方金属の距離と認識距離の関係の評価実験の概要

金属未対応ICタグへの金属の影響を評価するため、ICタグの後方の一定距離にアンテナより幅広のステ



①内蔵アンテナタイプ ②外部アンテナタイプ

図－1 HF帯RFIDの実験に使用したリーダライタ

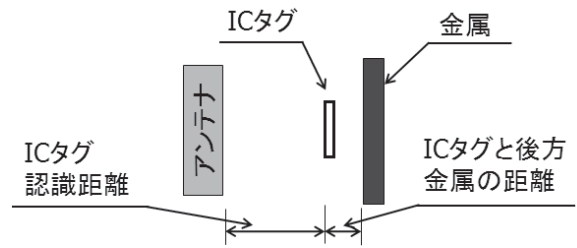


図－2 ICタグ角度と認識距離の関係を評価する実験

表－2 HF 帯 RFID の認識距離実験比較検討ケース (IC タグ角度と認識距離)

検討ケース	ICタグ種類	アンテナ	ICタグ角度(°)							
			0	15	30	45	60	75	83	
CASE1	カードタイプ	外部	○	○	○	○	○	○	○	○
CASE2	シールタイプ	外部	○	○	○	○	○	○	○	○
CASE3	カードタイプ	内蔵	○	○	○	○	○	○	○	○
CASE4	シールタイプ	内蔵	○	○	○	○	○	○	○	○

プレス製の金属板を配置した。その状態でアンテナにICタグを接近させた時の認識距離を測定した。ICタグと後方金属の距離と認識距離の関係を評価する実験の概要を図－3に示す。なお、3.2(1)の実験結果からカードタイプICタグの認識距離が大きいことが明らかとなったため、実験にはカードタイプICタグを用いた。表－3に比較検討ケースを示す。



図－3 IC タグと後方金属の距離と認識距離の関係を評価する実験

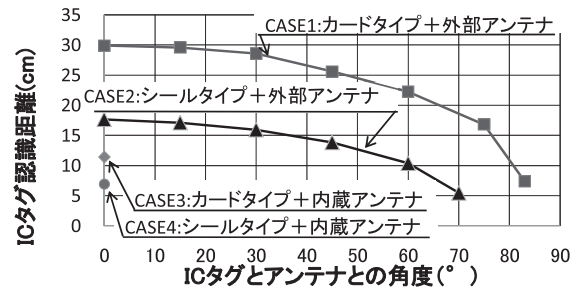
表－3 HF 帯 RFID の認識距離実験比較検討ケース (IC タグと後方金属の認識距離)

検討ケース	ICタグ種類	アンテナ
CASE5	カードタイプ	外部
CASE6	カードタイプ	内蔵

3.2 実験結果と性能の評価

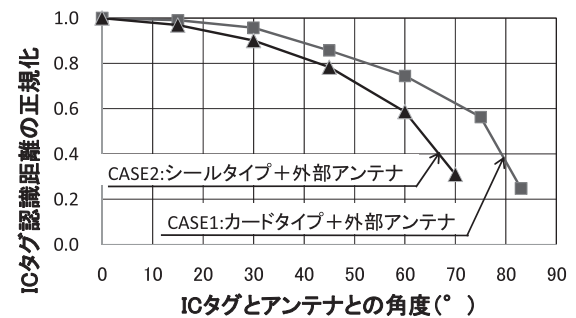
(1) ICタグ角度と認識距離の関係

IC タグ角度と認識距離の関係を図－4に示す。CASE1, CASE2ともにICタグ角度が大きくなるにしたがって、アンテナから放射される磁力線がICタグ内のアンテナループを通過する量が少なくなるため、認識距離は短くなることを示している。また、カードタイプ (CASE1 (■), CASE3 (◆)) の方がシールタイプ (CASE2 (▲), CASE4 (●)) より認識距離が長いことがわかる。これは、ICタグのアンテナ外形のサイズ (大きいほど磁力線通過量が多くなる) の影響によるものである。さらに、ICタグ角度 0° の時の認識距離に着目すると、外部アンテナタイプのリーダライタではCASE1 (■) で29.9cm, CASE2 (▲) で17.6cm, 内蔵アンテナタイプのリーダライタではCASE3 (◆) 11.4cm, CASE4 (●) では6.9cmとアンテナタイプの差異により約2.6倍の差が現れている。これは、出力レンジの違い(100mWと1W)によるものである。



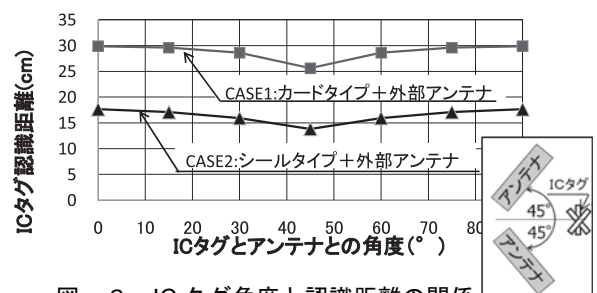
図－4 IC タグ角度と認識距離の関係

図－5には、CASE1とCASE2のそれぞれのデータをICタグ角度0°の時の最大認識距離で正規化した結果を示す。ICタグ角度が45°の時の認識距離は、ともに8割程度まで減少している。そこで、2台のアンテナを90°ずらして配置した場合の認識距離の関係を図－6に示す。カードタイプICタグで外部アンテナの場合、アンテナの方向を意識することなく25cm程度の離隔までICタグを認識できることがわかる。



図－5 IC タグ角度と正規化認識距離の関係

以上の結果より、10cm程度以下の近距離での利用には、内蔵アンテナタイプのリーダライタ (図－1の①) で十分対応が可能であるが、アンテナの存在を意識せずに自動的な認識、または非接触での認識が必要な場合には、出力レンジの大きい外部アンテナタイプのリーダライタが適していることがわかる。また、アンテナサイズが大きく、持ち運びに便利なカードタイプICタグは、現場作業員に携帯させる場



図－6 IC タグ角度と認識距離の関係 (2台のアンテナ設置時)

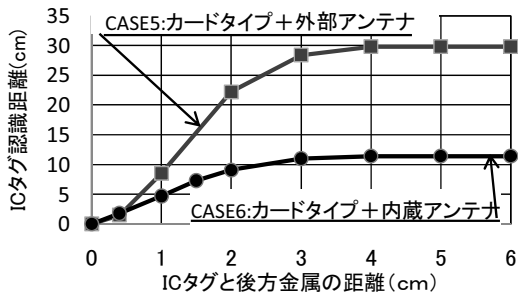


図-7 ICタグと後方金属の距離と認識距離の関係

合に適している。

(2) ICタグと後方金属の距離と認識距離の関係

ICタグと後方金属の距離と認識距離の関係を図-7に示す。CASE5, CASE6ともにICタグと後方金属の距離が短いほど、金属が電磁誘導の妨げになり十分な電流がICタグ内に発生しなくなるためにICタグの認識距離が低下することがわかる。金属にICタグが直接接触している場合は認識できないが、金属との離隔を3cm以上確保すれば、金属の影響がない場合とほぼ同様（95%以上）の認識距離でICタグを認識できることがわかった。

4. UHF帯RFIDの認識距離の評価⁷⁾

4.1 UHF帯RFIDの認識距離測定実験

(1) 実験に用いたUHF帯RFID機器

実験には、UHF帯用の7種類のICタグ（図-8）と外部アンテナタイプ（出力レンジ1W）のリーダライタを用いた。ICタグは、実用サイズの大きさで、EPC Class-1 Gen2規格⁸⁾に準拠し、かつ、入手が容易なアンテナサイズの異なるシールタイプ（4種類①～④）とセラミック加工金属対応シールタイプ（3種類⑤～⑦：以下、金属対応シールタイプと呼ぶ）である。

(2) 建設現場特有の環境条件下でのICタグの認識距離の評価実験の概要

ICタグの認識距離を評価する実験の概要を図-9に示す。ICタグおよびアンテナの中心高さを床より1mの位置に固定して、ICタグの認識距離を測定した。ここで、ICタグとアンテナとの認識距離は、それぞれの内面の中心間距離とした。建設現場環境を想定して、ICタグを貼り付ける材料を変えた。用いた貼り付け材料はプラスチック、金属、水を入れたPETボトルである。表-4に比較検討ケースを示す。

4.2 実験結果と性能の評価

図-10に、プラスチック、金属、水を入れたPETボトルにICタグを貼り付けた場合のそれぞれの認識距離を示す。まず、プラスチックの場合は、CASE1（シールタイプ（①～④：3.5m～9m）の方がCASE2

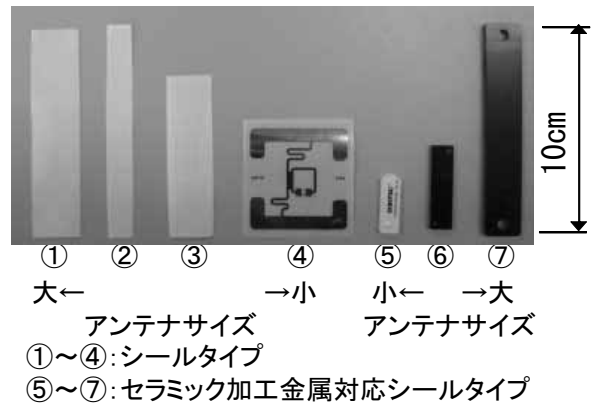


図-8 実験に使用した7種類のICタグ

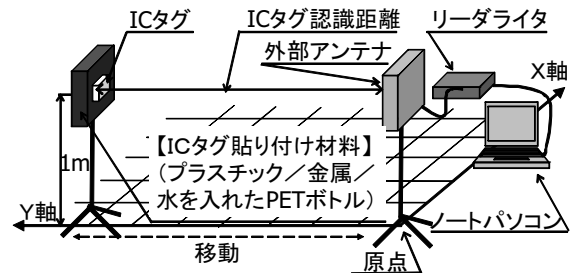


図-9 ICタグの認識距離の関係を評価する実験

表-4 UHF帯RFIDの認識距離実験比較検討ケース（建設現場特有の環境条件下でのICタグ認識距離）

ICタグを貼り付ける材料		プラスチック	金属	水を入れたPETボトル	
ICタグの種類	シールタイプ	①	CASE1	CASE3	
		②			
		③			
		④			CASE5
	金属対応シールタイプ	⑤	CASE2	CASE4	
		⑥			
		⑦			CASE6

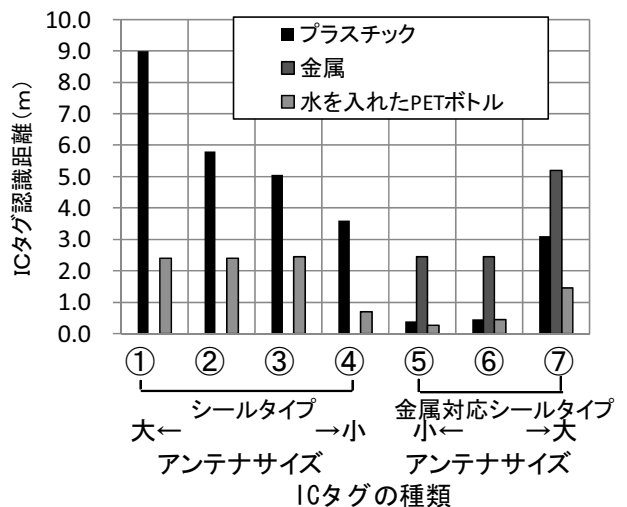


図-10 ICタグの種類・貼り付け材料の組み合わせごとの認識距離

(金属対応シールタイプ (⑤～⑦ : 0.4m～3m)) より認識距離が長いことがわかる。CASE2の中でも金属対応シールタイプ (⑤, ⑥) は、アンテナサイズが小さいことから認識距離が短い、⑦は3mと比較的良好な結果を得た。次に、金属の場合は、CASE3 (シールタイプ (①～④)) では認識不能となったが、CASE4 (金属対応シールタイプ (⑤～⑦)) では、2.5m～5m程度まで大きく認識距離が伸びることを確認できた。また、水の場合は、CASE5 (シールタイプ (①～④)) ではプラスチックの場合の1/4～1/2程度に、CASE6 (金属対応シールタイプ (⑤～⑦)) では最大で1/2程度に、認識距離が短くなる結果となったが、⑦は1.5mと水に対しても比較的良好な認識距離となった。

以上の結果より、金属類が周囲に多く存在し、降雨や湿度の影響で水分が多いような、環境条件の悪い建設現場への適用には、金属対応シールタイプでアンテナサイズが大きい⑦のICタグが最も適していることがわかった。

5. 建設現場への適用性の確認

5.1 建設現場への適用

RFIDの適用性を評価する室内実験結果を踏まえて、実際の建設現場でのRFIDの適用性を検証した。ひとつはHF帯RFIDをトラックミキサー運行管理システムに適用したもので、長期間の安定的運用を検証した。もうひとつはUHF帯RFIDを用いて、建設現場特有の環境条件下でコンクリートにICタグを貼り付けた場合の認識距離を検証した。

5.2 HF帯RFIDの建設現場への適用²⁾

(1) トラックミキサー運行管理システムの特徴

トラックミキサー運行管理システムは、二次覆工コンクリートの品質を確保することを目的に、外気温が高い場合でも品質的に低下しないコンクリートの使用制限時間(可使時間)を設定し、ICタグを活用して運搬打設計画の実施状況を確認するものである。これによって、品質の悪いコンクリートの打設を排除し、トラックミキサーの運行管理による運搬打設計画の改善を図ることができる。本システムは、ICタグ、プラント側と現場側に設置する機器(リーダライタ、PC、パトライト)、管理用ソフトとデータベースによって構成される。図-11にシステムのイメージ図を示す。

(2) 現場に適用したRFID機器

現場で適用したICタグはHF帯のカードタイプで、水(降雨)の影響を受けにくい、近傍に金属がない、運転手が持ち運びできる、という条件から選定したものである。また、コンクリート出荷伝票の取得および提出のため、運転手は出荷・入荷時に車を降りることがわかったため、本現場では近接領域でICタ

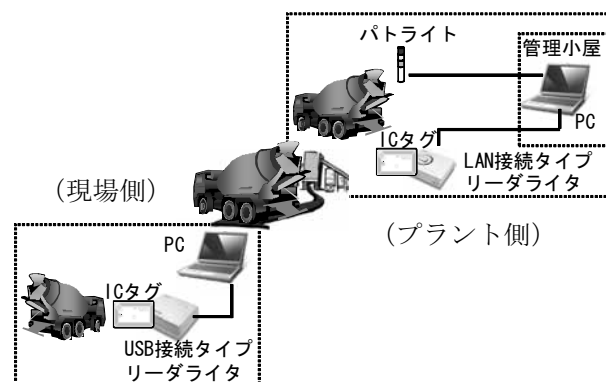


図-11 トラックミキサー運行管理システムのイメージ図



写真-1 ICタグの認証状況

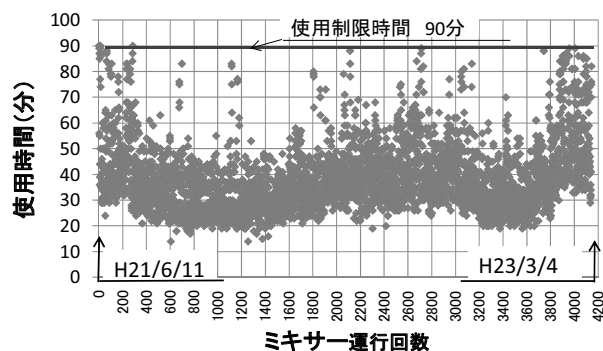


図-12 HF帯RFIDの現場運用の結果(使用時間の管理結果)

グを認識するアンテナ内蔵型のリーダライタ(図-1の①)を選定した。写真-1に、ICタグの認証状況を示す。

(3) 適用性の確認

平成21年6月11日から平成23年3月4日までの1年9ヶ月の間、本システムを建設現場に適用した。図-12に、HF帯RFIDの現場運用結果(使用時間の管理結果)を示す。全期間で使用制限時間内の管理が実施されていることがわかる。この期間に発生したシステム上のトラブルは、現場側のPCが破損した1件のみで、ICタグの認識に関するトラブルはなかった。この現場適用によって、環境条件の悪い現場環境下において、HF帯RFIDの長期間にわたる安定的運用を検証することができた。

5.3 UHF帯RFIDの建設現場への適用

5.2で示したトラックミキサー運行管理システムのデータをUHF帯ICタグに書き込み、施工中のトンネル現場でUHF帯RFIDの認識距離の検証を行った。4.2の室内実験結果を踏まえて、遠隔よりデータの読み書きができ、金属類が周辺に多く存在し水分が多い実際の現場環境に対応できるICタグを選定するためのものである。写真-2は、建設現場環境におけるICタグ認識実験状況である。

図-13は、ICタグをプラスチックに貼り付けた室内実験結果に加えて、建設現場でコンクリート(トンネルの二次覆工コンクリート)にICタグを貼り付けた場合の認識距離結果を示している。

シールタイプ(①~④)では、プラスチックに貼り付けた場合の1/5程度以下までICタグの認識距離は短くなるが、金属対応シールタイプ(⑤~⑦)では、認識距離の低減は少ない。特に⑦は、認識距離が2.5mあり、シールタイプを含めても最も長いことがわかった。

以上の結果より、金属類が周囲に多く存在し、高湿度で水分が多い建設現場において、UHF帯RFIDを適用した場合、遠隔からの認識が必要なケースでは、金属対応シールタイプでアンテナサイズが大きい⑦のICタグが適していることを確認した。

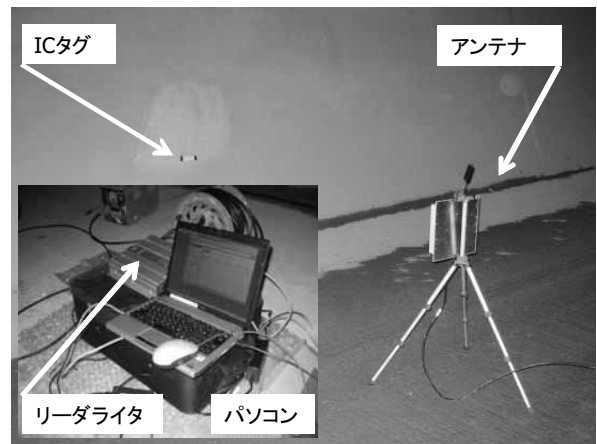


写真-2 建設現場環境におけるICタグ認識実験状況

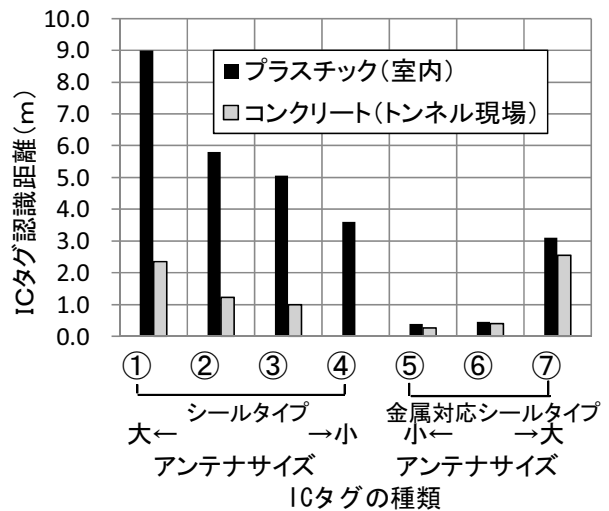


図-13 ICタグの種類・貼り付け材料の組み合わせごとの認識距離

6. RFIDによる施工情報管理システムの開発

RFIDによるコンクリート施工情報管理システムは、室内および建設現場環境における実験によってICタグの特性を評価することで、施工時、供用時ともに建設現場特有の環境条件に最適なRFIDの選定

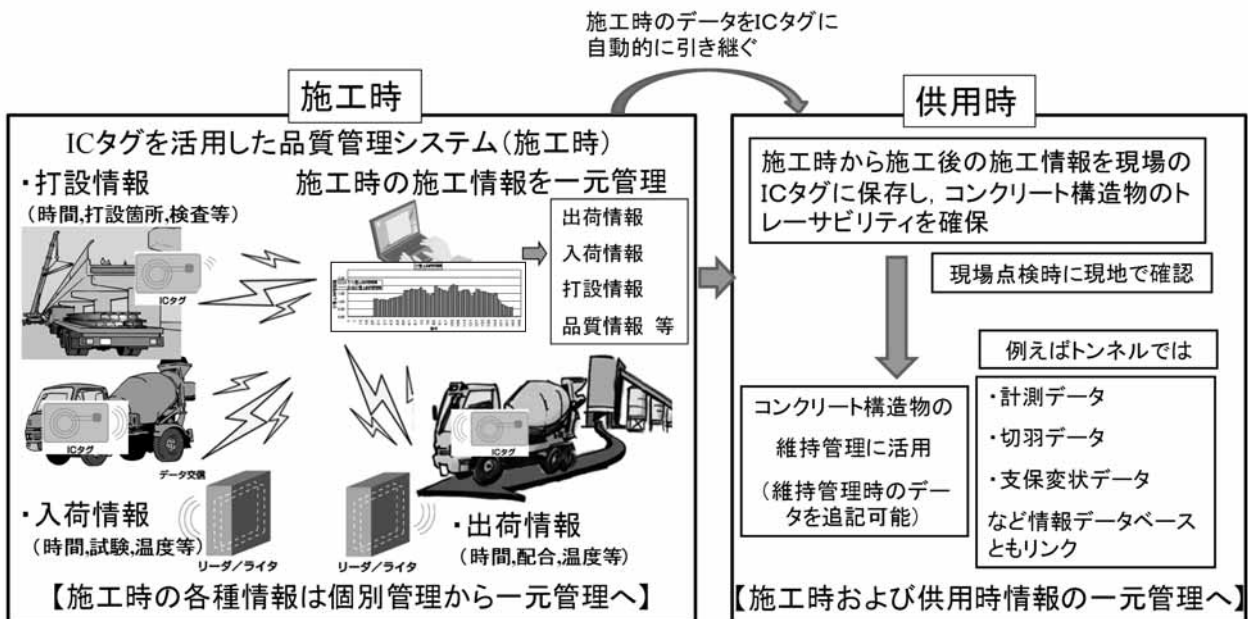


図-14 RFIDによるコンクリート施工情報管理システムのイメージ図

が可能なシステムである。さらに、施工時の品質管理システムと連携することで施工情報を一元管理し、供用時に施工・品質情報を保存したICタグを現場に設置することで、コンクリート構造物のトレーサビリティを確保し、維持管理に活用するものである(図-14)。

筆者らはすでに、従来個別に管理されてきたコンクリート構造物施工時の各種情報を、ICタグを活用して施工時に一元管理するコンクリート品質管理システム²⁾⁹⁾を開発している。これらの施工情報を自動的に引き継ぎ、供用時の維持管理情報と併せて管理する本システムでは、点検時には、情報端末を用いて、その場で情報を確認し、必要な情報はRFIDに追記することができる。施工・品質情報を保存したICタグを現場に設置することで、現地で構造物に関する情報を確認、追記するなどインターネットなどの使えない通信環境の悪い地点でも力を発揮できる。

今後、RFIDによるコンクリート施工情報管理システムを建設現場へ展開し、施工時の品質確保・向上を図るとともに、供用時も継続して管理者が活用できるように維持管理への適用を提案していきたいと考えている。

7. 結論

本研究では、建設現場特有の環境条件下での安定的なRFID運用のために、HF帯およびUHF帯RFID認識距離の評価と、建設現場への適用性について検証した。さらに、施工時および供用時の情報を連結し一元管理することで、トレーサビリティを確保できる、RFIDによるコンクリート施工情報管理システムを開発した。以下に、本研究により得られた知見を列記する。

- ① HF帯RFIDのもつ、水の影響を受けにくい、通信距離は短いという課題に対して、出力レンジが大きい外部アンテナタイプのリーダライタの利用、アンテナサイズが大きく防水性のあるカードタイプICタグの利用、アンテナの複数利用を行うことで、建設現場特有の環境条件下で30cm程度まで認識距離を伸ばす方法を見出した。ICタグにリーダライタが接近できるという使い方をする場合において、HF帯RFIDを、建設現場での有効な手法と位置付けることができた。
- ② UHF帯RFIDのもつ、通信距離が長い、導電体や水の影響を受けやすいという課題に対して、金属対応でアンテナサイズが大きいICタグを利用することで、数mの認識距離を確保する方法を見

出した。ICタグが遠方にありリーダライタが接近できない場合に対して、UHF帯RFIDを、建設現場での有効な手法と位置付けることができた。

- ③ HF帯とUHF帯2つのRFIDの特徴を把握し、各々の課題に対して適切に対応する方法を見出し、数cmの近接から10m程度の遠隔までRFIDを利用できるようにした。これによって、施工時から供用時までの建設現場特有の環境条件に対しても最適なRFIDを選定できるようになった。
- ④ ICタグを活用したコンクリート品質管理システムの施工情報を自動的に引き継ぎ、供用時の維持管理情報と併せて情報の一元管理できるようにシステム化した。
- ⑤ 以上の成果を統合することで、コンクリート構造物のトレーサビリティを確保する、RFIDによるコンクリート施工情報管理システムを開発することができた。

【参考文献】

- 1) 真下祐一, 森谷修, 山本克, 水野善弘: トレーサビリティ・RFIDが創造する生活における価値, 日立論評, Vol.88, No.7, pp.22-25, 2006.
- 2) 築地功, 原田進, 東住也, 滝波真澄, 澤正武, 松元和伸, 松田浩朗: ICタグによるトラックミキサの運行管理システム, とびしま技報, No.58, pp.95-96, 2009.
- 3) 松元和伸, 原島誠, 松下慎治, 大平信吾, 小笠原剛: 土木構造物へのRFIDの適用例, セメントコンクリート, No.749, pp.58-64, 2009.
- 4) 坂村健, 君島健之: コンクリートのトレーサビリティについて, コンクリート工学, Vol.47. No.2, pp.3-6, 2009.
- 5) 松元和伸, 阿保寿郎, 松田浩朗: 現場適用に向けたRFIDの基礎実験, 土木学会第65回年次学術講演会, VI-359, pp.717-718, 2010.
- 6) 国際標準規格, ISO/IEC 18000-3, 2004.
- 7) 松元和伸, 阿保寿郎, 松田浩朗: トレーサビリティ実現のためのUHF帯RFIDを用いた基礎実験, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, VI-108, pp.215-216, 2011.
- 8) 極超短波帯(UHF帯)通信規格, EPC Global, 2006.
- 9) 藤本尚志, 寺尾康成, 渡邊博, 菅原健, 松田浩朗, 寺澤正人, 松元和伸: ITを利用したコンクリート品質向上管理技術の現場適用, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, VI-512, pp.1023-1024, 2010.

Summary In construction, identifying the condition for using RFID is required for improving the reliability and applicability of RFID. In order to steadily operate RFID at the site, laboratory tests were conducted concerning the maximum distance of recognition of HF- and UHF-zone RFID. As a result, it was found that large antenna-size card-type IC tags are suitable for operation at the site in the HF zone and that large antenna-size IC tags applicable to metals are suitable in the UHF zone. Based on the result, respective types of IC tags were applied to the RFID system at the site and it was verified that stable operation was possible. Then, a concrete construction information management system using RFID was developed that can be used for maintaining concrete structures by using the construction and quality control information and ensuring traceability.

Key Words : *RFID, IC-tag, Traceability , Maintenance*