流動する生コンクリート中における RFID タグの通信性能評価 および実地試験

EVALUATING THE COMMUNICATION PERFORMANCE OF RFID TAGS MIXED-IN AND FLOWING INSIDE READY-MIXED CONCRETE

藤本郷史 — * 1 大久保孝昭 — * 2
吉峰侑吾 — * 3 平原悠生 — * 4

Satoshi FUJIMOTO — * 1 Takaaki OHKUBO — * 2
Yugo YOSHIMINE — * 3 Yuki HIRAHARA — * 4

キーワード：
生コンクリート, 建設物流, 電子情報技術, 通信性能, RFID

Keywords:
Ready-mixed concrete, Construction logistics, Electronics and information technology, Communication performance, Radio Frequency Identification

Technical feasibility to mix-in IC tags into ready-mixed concrete is discussed, focusing on RF communication performance under flowing conditions. Firstly, flowing conditions (i.e. flow speed, concrete thickness) at agitating truck chute and pumping pipe is summarized based on on-site measurement and standard specifications. Secondary, experimental method and RF communication performance index for RF communication is proposed. It has been estimated that 20-40% of IC tags could be found and captured, while non are data read-writable. On-site experiment result was highly consistent with the experimental estimation.

1. はじめに

RFID (Radio Frequency Identification)技術の普及が進みつつある¹⁾。建設分野においても、トレーサビリティの確保や履歴情報の管理手段として、RFID 技術を活用しようとする提案^{例えば 2-4)}が、近年、多くみられる。これらのうち、コンクリート材料については、RFID タグが“剥がれて紛失しない”, “衝撃等の外力から保護される”といったメリットが期待できる⁵⁾ことから、RFID タグをフレッシュコンクリート中へ埋設しようとする提案が複数みられる⁶⁻⁸⁾。これらの提案を概観すると、どの時点でタグを投入・設置するかという点のみにおいても、RFID システムの用途や性能等に応じて複数の方法がありうる。例えば、コア供試体への投入⁹⁾(案 A)、型枠内鉄筋への設置⁷⁾(案 B)、ミキサへの投入⁸⁾(案 C)などの提案がこれまでに示されている。これらの方法は一長一短であるが、材料のトレーサビリティ確保の観点からは、できる限り資源フローの始点に近い時点で RFID タグをコンクリート中に投入・設置することが望ましいであろう。本報は、このような観点から、案 C の実現性を検討するものである。

図 1 に、生コンクリートの一般的な資源フローの例を示す。案 C を採用する場合、RFID タグはコンクリートと共に、ミキサからアジテータ車、コンクリートポンプ車やバケット、そして型枠へと移動していく。したがって、トレーサビリティ確保の観点からは、各段階で RFID タグがコンクリートと共に移動したことを確認する必要がある。具体的には、RFID タグが、

- アジテータ車のシュートを通して排出されたこと
- 圧送時に輸送管を通して型枠へ移動したこと。

の 2 点の確認が必要である。アジテータ車のシュート口や圧送時の輸送管内ではコンクリートは流動しており、静止状態にない。RF

通信にはある程度の時間が必要であるので、フレッシュコンクリートという不均質な材料中における RFID タグの移動は、リーダライタ(以後、RW と表記)との通信に影響を及ぼすことが予想される。したがって、前述の a), b) の環境下で RFID タグの通過を確認する(あるいは情報の読み書きを行う)には、フレッシュコンクリートの存在とその流動が通信にどのような影響を与えるかを定量的に把握しておく必要がある。以上の観点から、本報では以下の手順で検討をおこなった。

- 各種指針や現場測定を参考に、コンクリートの各製造段階において想定されるコンクリートの流動条件を分析する。
- 手順 1) の想定条件を参考に、フレッシュコンクリート中の流動が RF 通信に与える影響を評価する実験手法と指標を提示する。
- 手順 2) の手法を用いて、現状入手可能な RFID システムにおける通信性能を実験的に評価する。
- 実地試験を行って、手順 3) の評価結果と実際の工事現場における測定結果との整合性を検証する。

図 1 生コンクリートの一般的な資源フローの例⁹⁻¹¹⁾および RFID タグを用いたトレーサビリティ確保において必要な確認事項

¹⁾ 広島大学大学院工学研究院社会環境空間部門 助教・博士(工学)
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²⁾ 広島大学大学院工学研究院社会環境空間部門 教授・工博

³⁾ 広島大学大学院工学研究科建築学専攻 元大学院生(平成23年度修了)

⁴⁾ 広島大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

¹⁾ Assist. Prof., Social Environment and Space Div. Graduate School of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

²⁾ Prof., Social Environment and Space Div. Graduate School of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.

³⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Hiroshima Univ.

⁴⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Hiroshima Univ.

2. 物流の各段階におけるコンクリート流動状態の想定

アジテータ車シュートや圧送時の輸送管内でのコンクリートの流動速度 S_c (km/h)やコンクリート厚さ d_c (mm)を、アジテータ車のカタログおよび指針等^{9,11)}を参考に概算して想定値とした。式(1)、式(2)に算定式を、表1に想定値の一覧を示す。なお、アジテータ車からの排出速度は、積載量 V_{ag} と排出に要する時間 t_{ag} 断面積 A_{ag} を現場実験(5章参照)で測定した。また、本報の以降の検討では、コンクリートの流動速度 S_c と RFID タグの移動速度 S_{RFID} は等しいと仮定した。アジテータ車シュートにおける流動速度 $S_c^{agitate}$ 、輸送管内の流動速度 S_c^{pump} と表すと、

$$S_c^{agitate} = \frac{V_{ag}}{t_{ag} A_{ag}} \quad (\text{km/h}) \quad (1)$$

$$S_c^{pump} = \frac{S_{ej}}{\pi R_{pump}^2} \times 10^3 \quad (\text{km/h}) \quad (2)$$

ただし、輸送管の毎時吐出量 $S_{ej} = 20 \sim 60 [\text{m}^3/\text{h}]$ ⁹⁾、公称外径 100A を仮定し $R_{pump} = 100 [\text{mm}]$ ⁹⁾ とした。アジテータ車の積載量 $V_{ag} = 4.25 (\text{m}^3)$ は納入書の値を用いた。アジテータ車 7 台からの排出所要時間 t_{ag} (h) は秒単位で計測した。シュートを流れるコンクリート断面積 A_{ag} (m^2) はカタログ値と現場実験での実測をもとに概算した。

表 1 コンクリートの流動状態に関する本報の想定

対象	流動速度 S_c (km/h)	コンクリートの厚さ d_c (mm)
アジテータ車シュート口	2~5km/h	60~80mm
輸送管の内部	2.5~7.6km/h	100-150mm

3. フレッシュコンクリート中を移動するタグの通信性能評価法

3.1 実験装置の概要および実験の方法

RFID タグの移動速度、RW との距離およびコンクリートの厚さの影響を検討するために、図2に示す試験装置を考案した。RFID タグの移動速度は、往復運動を行うスライド式電動アクチュエータをプログラム制御して設定した。パンタグラフ機構^{例えは12)}を用いてアクチュエータの往復運動を増幅し、タグ設置部分で表2に示す速度範囲となるように設計した。導電体(ex. 金属材料)と近接しないようにするために試験装置には土台を設け、RFID タグを貼り付ける棒材には塩化ビニル樹脂を用いた。RW は、アンテナ中心からの鉛直線が RFID タグの可動範囲中心点と一致するように設置した。以上の実験装置を用いて、以下の手順で実験を行った。

- 1) アクチュエータを稼働させ、パンタグラフ機構に取り付けられた RFID タグが RW の下部を N 回往復する
- 2) RW と RFID タグ間の通信コマンドの履歴(3.3 節に後述)を制御 PC によって記録する。

3.2 実験の条件および使用材料

表2に実験の因子と水準を示す。コンクリート厚さは、 $d_c \leq 100 \text{mm}$ ≡ 圧送管の直径の水準とした。試験装置は、 $d_{pi} = 800 \text{mm}$ 、 $d_{p2} = 200 \text{mm}$ 、 $d_{RW} = 150 \text{mm}$ 、 $d_m = 400 \text{mm}$ (i.e RW のアンテナ直径 ≡ 190mm)、RFID タグの往復回数 $N_p = 100$ 回と設定した。RFID タグは、13.56MHz 帯を通信帯域とするパッシブ型タグ 2 種類を用いた。いずれも既報¹³⁾の方法を用いて通信距離の異方性を確認し、最も通

信距離の長い方向を上向きにしてパンタグラフ部材に設置した。コンクリートは練り混ぜ後、直ちにプラスチックケースに打ち込んで測定を行った。読出しデータ量(後述図3参照)は 4byte と設定した。

表3に本報で用いたコンクリートの計画調査表を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材には広島県産石英斑岩碎石、砕砂を用いた。AE 減水剤には、広島県内の調査実績を考慮してリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合型を用いた。

図 2 試験方法の概要

表 2 実験の因子と水準

因子	記号	水準
移動速度 (km/h)	S_{RFID}	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7.6
コンクリート厚さ(mm)	d_c	無し, 50, 100
通信距離(mm)	d_{RW}	50, 100, 150
RFID タグの種類		タグ A, タグ B

表 3 コンクリートの計画調査表

調査強度	スランプ	空気量	水セメント比	細骨材率	単位水量	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
			W/C	s/a	W	C	S	G	
N/mm ²	cm	%	%	%	kg/m ³				C×%
30	18.0	4.5	65	49.0	185	286	874	922	0.9

3.3 通信性能の考え方と評価法

RFID タグが移動する場合 (RFID タグと RW との相対位置が変化する場合)、RF 通信可能な相対位置にある時間に上限が生じることなどが原因で、通信が途中で途切れる可能性が高まる。13.56MHz 帯の RF 通信は、複数のコマンドにより実現されるので、どのコマンドまで時間内に通信できたかを測定することによって、RFID タグが移動する場合における通信性能 (通信の可否, 安定性) の定量的評価が可能となる。

以上のような考え方を基に、通信性能の評価式を式(3)、式(4)に示す。図3に本報の実験で用いた RF 通信のコマンド一覧と測定項目を示す。本評価ではコマンドを内容ごとに分類し、分類ごとに通信が成功した回数、成功した場合の所要時間を計測する。コマンドの概要説明から読み取れる通り、 b_c が真であれば RFID タグの通過を検出したと考えてよい。また、全コマンドの通信が成功すれば RFID タグのデータを正常に読み取ることができたと考えてよい。すなわち、評価式(3)は RFID タグの通過検出性能を評価する指標であり、評価式(4)は RFID タグとの通信全体の安定性を評価する指標と解釈できる。RFID タグの往復回数 N 回における b_c の集合 B_c のうち、

タグ捕捉に成功した元の集合を $C_c = \{c_c \in B_c \mid b_c = \text{true}\}$ とすると、

$$\text{タグ捕捉率 } R_c = \frac{\text{card } C_c}{N_p} \times 100 \quad (\%) \quad \text{式(3)}^{(注1)}$$

RFID タグの往復 N_p 回における b の論理積 $b_a \wedge b_f \wedge b_k \wedge b_r \wedge b_{de}$ の集合 B について、ポーリングからタグの解放までの全コマンドが成功した元の集合を $C_{all} = \{c_{all} \in B \mid c_{all} = \text{true}\}$ とすると

$$\text{通信成功率 } R_{all} = \frac{\text{card } C_{all}}{N_p} \times 100 \quad (\%) \quad \text{式(4)}^{(注1)}$$

ただし、集合 X の元の個数を $\text{card } X$ とする。

以降、③～⑨を RFID タグの往復運動が N_p 回終了するまで繰り返す。
※REQB コマンドは成功するまでリトライ。成功したら次のコマンドを実行。

図3 RF通信のコマンド概要および本報の測定項目

なお、REQB コマンドの応答には、タグのユニーク ID(PUPI)の情報が含まれる。したがって、予め工場出荷時等に PUPI と情報を紐付けしておけば、タグの捕捉が成功した段階で（通信成功率 0% であっても）どの RFID タグが通過したのか判別可能である。

また、図3から明らかなように、評価式(3)、(4)は制御端末—RW間を含むシステム全体(RW, タグ, 制御端末等の組合せ)の通信を評価の対象としている。すなわち、本報の評価法は実際に用いるシステム全体の通信性能評価に適しており、本来的には制御端末から RFID タグの設計・選定まで全てのシステム構成が定まった上で適用すべきものである。本報では各種の制約から市販のノート PC を制御端末として測定を行ったので、次節以降に示す測定結果は PC の性能などといった RF 通信とは関係のない因子の影響を受けている。また、タグや RW の性能だけでなく、REQB コマンドの頻度といった通信設定によっても結果が異なる。したがって、本報の結果は、各因子に対する定性的な傾向を表すものと解釈すべきである。

4. 実験の結果と考察

4.1 静止状態の通信時間からみた RF 通信の必要条件

各コマンドを安定的に実行するための必要条件を把握するために、静止状態における実行所要時間を測定した。図4に結果を示す。RW アンテナの前面を通過するのに要する時間を概算して表4に示す。

（実際には若干異なるが）アンテナの鉛直空間でのみ通信可能と仮定し、本報の実験条件での REQB コマンド発信可能回数を参考値として合わせて示した。ただし、13.56MHz 帯では実用されている RW のアンテナ直径=20cm 程度であることを考慮してある。

表4によれば、本報の RFID システムの設定（REQB コマンド：50msec/回）では、RW の前面を1回通過するごとに1回以上発信される。一方で、移動速度 4km/h 以上の水準では通信可能な位置の滞在時間がポーリングの通信所要時間 150msec を下回る。すなわち、安定的なタグの捕捉が難しくなると予測できる。また、図4によれば、全コマンドの実行に 600msec 近く要する。したがって、時速 1km の水準を除けば RW 前の滞在時間よりも全コマンドの実行所要時間の方が大きい。以上の結果から、アジテータ車からの排出（3～5km/h、表1参照）を想定すると、本 RFID システムではデータの安定的な読み書きはできないと予測できる。以上のように、各コマンドの所要時間を計測することで、RFID システムにおける RFID タグ移動の影響を予測することが定性的にはある程度可能である。

図4 コマンド分類ごとの実行所要時間、左：タグA、右：タグB
コンクリート厚さ $d=100\text{mm}$ 、通信距離 $d_{RW}=150\text{mm}$ 、静止状態

表4 RFID タグの速度と RW アンテナ前面の通過時間

移動速度 (km/h)	1	2	3	4	5	6	7	7.6
RW 前の滞在時間 (msec)	720	360	240	180	144	120	103	95
発信可能回数(回)	14.4	7.2	4.8	3.6	2.9	2.4	2.1	1.9

※滞在時間：該当時速での RW アンテナの概算直径 200mm の通過時間

※発信可能回数：本報の試験条件 REQB コマンド 50msec/回から算定

4.2 移動速度と通信距離の影響（コンクリートを設置しない場合）

コンクリートが存在しない場合の RFID タグ移動の影響についての実験結果を図5に示す。移動速度が速いほど、タグ捕捉率は低下した。4.1節の考察と比較すると、ポーリングの発信や実行時間が十分に確保できる 2～3km/h の範囲でもタグ捕捉率は低下した。すなわち、コマンドの実行時間だけでは RFID システムの通信性能を十分に評価できない。タグ A、B のいずれも移動しない場合には 100% のタグ捕捉率を示したが、移動した場合にはタグ B の方がタ

図5 タグ捕捉率 R_c に対する通信距離 D_{RW} の影響

左：タグA、右：タグB（コンクリート厚さ $d=0\text{mm}$ の場合）

グ捕捉率が高かった。タグ B は通信距離(最小動作磁界強度¹⁴⁾)や復調回路などの点でタグ A を改良したタイプである。本結果から、通信距離や復調回路などの性能が高いほど、RFID タグの移動の影響を受けにくくなるものと示唆された。移動速度が低い($\leq 2\text{km/h}$) 場合、通信距離 D_{RW} が大きくなるとタグ捕捉率は低下する傾向が観察された。この傾向についても、タグ A よりもタグ B の方が低下量が小さく、前述と同様に通信性能の改良の効果であると推測される。以上のように、タグ捕捉率を指標とすることで RFID システムごとにタグ移動の影響を定量的に相対評価できることを確認した。

なお、図 5、図 6 では移動速度 4km/h 付近に屈曲点が観察された。これは、4km/h 付近で RW 前の滞在時間がポーリング通信時間($\approx 150\text{ msec}$)を下回る(4.1 節参照) ことの影響と考えられる。図 7 に移動速度ごとのポーリング所要時間を示す。4km/h の水準のみ顕著に値が高かった。これは、4km/h 前後で通信が不安定となり REQB のリトライを繰返した影響であり、上述の考察の傍証といえる。

4.3 コンクリートの厚さの影響

図 6 にコンクリート厚さごとのタグ捕捉率の測定結果を示す。移動速度が小さい領域でコンクリート厚さが小さい方がタグ捕捉率が高い傾向が若干みられたものの、コンクリート厚さの影響は移動速度の影響に比べると小さく、ほぼ無視できる範囲であった。

4.4 流動するコンクリート中におけるタグ捕捉に関する考察

前節までの検討を踏まえると、アジテータ車からの排出時や圧送時の輸送管においてタグの通過を検出しようとする場合、2 章に示した想定範囲でコンクリートの流動条件が多少変動しても、20～40%程度(図 6 参照)の RFID タグを捕捉可能と予測できる。トレーサビリティ確保の観点からアジテータ車 1 台あたり最低 1 個の RFID タグの通過確認を条件と考えると、1 台あたり 5 個程度投入すれば 98%以上($=1-0.3^5$)の確率で通過を確認できることになり、通過確認としては一定の性能があるものと評価される。今後の研究開発でタグ捕捉性能を向上するには、1) タグ通過経路上で RW を多段に設置する、2) ポーリングの所要時間を短くする、といった方策が考えられる。

4.5 流動するコンクリート中におけるデータ読書きの可能性

図 8 に通信成功率 R_{all} の測定結果の一例を示す。いずれの水準においても、移動速度 2.0km/h を超えると通信成功率は 0%となった。したがって、本報で用いた RFID システムの範囲では、RFID タグの移動中(i.e. アジテータ車排出時や輸送管内にある場合)にはデータ読み書きを行うことは不可能と予測できる。4.1 節では、本報で用いた RFID システムの全コマンドの所要時間が RW 前面の通過時間を大幅に上回ることが判明しており、本結果と整合する。

図 9 に各コマンドの所要時間を移動時と静止時を比較して示す。ポーリング以外では変化がなかった。すなわち、移動やコンクリートの存在によってコマンド実行時間自体が影響をうけることは無く、今後の研究開発を通じて空気中における各コマンドの所要時間を低減できれば、流動コンクリート中にある RFID タグについても通信性能の向上が期待できる。

5. 建築現場における通信性能の検証

5.1 現場実験の概要

アジテータ車からの RFID タグの排出確認がどの程度可能であるか

図 6 タグ捕捉率 R_c に対するコンクリート厚さ d_c の影響
(左) タグ A, (右) タグ B (通信距離 $D_{RW}=15\text{cm}$)

図 7 移動速度別のポーリング所要時間(msec)

左: タグ A, 右: タグ B (コンクリート厚さ $d_c=10\text{cm}$ の場合)

図 8 通信成功率 R_{all} に対するコンクリート厚さ d_c の影響
左: タグ A, 右: タグ B (通信距離 $D_{RW}=15\text{cm}$)

図 9 静止状態と移動状態(2km/h)におけるコマンド所要時間比較
左: タグ A(コンクリート厚さ $d_c=5\text{cm}$), 右: タグ B ($d_c=10\text{cm}$)

を確認するために、実際の建築現場においてもタグ捕捉実験を実施した。検証実験を行った工事の概要を表 5 に示す。なお、第 4 章までの検討では RW にノート PC を接続して評価値(式 3,4)を算定したが、現場の作業の支障となるため、タグを捕捉すると点灯する方式の RW を使い、タグ捕捉個数=点灯回数として測定した。

5.2 現場実験の方法

図 10 に現場実験の流れを示す。想定する資源フロー(第 1 章 案 3 参照)と同様に、生コンクリート工場内で RFID タグを投入した

後、建築現場に到着したアジテータ車シュート部に手持ち型 RW を設置してタグの捕捉を試みた。図 11 に用いた RW の外観、図 12 に測定の様子を示す。4.4 節では RW を多段にすることで通信性能の向上が図れる可能性を指摘した。これを受けてアンテナを多段にした RW も用いた。また、一般に 13.56MHz 帯の RFID タグが金属近傍にある場合、通信性能が低下することが知られている¹⁵⁾。そこで金属製のシュートから遠ざけることを意図して、合板製の治具（図 12 右参照）を用いた通信試験も実施した。

表 5 現場実験を行った建築工事の概要

項目	概要
構造種別など	鉄筋コンクリート造 2F 建て 新築工事
工事種別 (工区と部材種別)	コンクリート打設 A 工区 (スラブ), B 工区 (スラブ, 柱, 梁)
コンクリート呼び方	普通 33-18-20N
コンクリート打設量	A 工区 144.5m ³ , B 工区 233.75 m ³
RFID タグの個数	A 工区 86 個, B 工区 158 個

図 10 本報で実施した現場実験のフロー

図 11 現地実験で用いた RW (左) ハンディ型、
(右) アンテナ多段型 ※○印の部分が RW アンテナ部

図 12 アジテータ車シュート部分における測定の様子
(左) ハンディ型、木枠を設置しない場合
(右) アンテナ多段型、木枠を設置する場合

5.3 現地実験の結果

表 6 に実験結果を示す。ハンディ型 RW では、およそ 3 割 (8 個/25 個=32%) のタグの通過を検出した。4.4 節ではアジテータ車のシュート付近では、およそ 20~40%程度のタグ捕捉が期待できると予測した。現地検証実験の結果は、この予測と整合している。現地実験での検証は、アジテータ車 7 台 (コンクリート 22.5m³) にとどまっており十分なサンプル数とは言えないが、本結果はタグ捕

捉率の評価指標としての有用性を示唆するものと考えている。すなわち、今後十分な検証を行えば、実験室内のタグ捕捉率評価に基づいて現場での通信性能予測の実現につながる。

多段型 RW を用いた場合、4 個のタグ通過を検出し、ハンディ型を上回った。4.4 節では確率的な観点からアンテナを経路に複数設置することによるタグ検出性能向上が期待できることを述べたが、本結果はこの考察と整合する。今後の技術開発の一つの方向性を示す有用な知見と考えている。

なお、図 12 に明らかなように、現場実験で用いたハンディ型 RW のアンテナはシュート直径と比べてかなり小さく、アンテナの横 (通信圏外) を通り過ぎた RFID タグが存在するものと推測される。したがって、コンクリートの流動面全体をカバーするように RW の配置や形状を改善するだけでも捕捉の確率は高まると思われる。また、生コンクリート工場の RFID タグ投入機器の故障により、計画投入個数の 6 割しかアジテータ車に投入されなかった。したがって、前述のタグ捕捉割合 (≒32%) は実際にはもっと高かった可能性があることを付記しておく。

表 6 現地実験の結果まとめ (タグの捕捉個数)

号車	使用した RW	木枠の有無	RFID タグの計画投入個数	RFID タグ捕捉個数
A	ハンディ型	なし	5 個	2 個
B	ハンディ型	なし	5 個	0 個
C	ハンディ型	なし	5 個	1 個
D	ハンディ型	なし	5 個	2 個
E	ハンディ型	あり	5 個	3 個
F	アンテナ多段型	あり	5 個	4 個

※RFID タグの投入個数は工場での計画投入個数を表示している。
実際には、計画個数の 59.5%しか投入されていないことが判明済み

6. まとめ

本報は以下のようにまとめられる。

- 1) 現場実験における測定と各種指針の文献調査をもとに、アジテータ車排出時のシュート部や圧送時の輸送管内のコンクリート流動速度やコンクリート厚さを概算した。
- 2) 上述 1)の条件を再現できる試験装置を考案し、流動コンクリート中にある RFID タグと RW の間の通信性能の評価法として、RFID システムの通信手順に基づく評価指標を提示した。すなわち、タグの通過検出可能性を評価する指標としてタグ捕捉率 (式 3)、タグ内に保管される情報を読み書きを行うための通信全体の安定性を評価する指標として通信成功率 (式 4) を提示した。
- 3) 上述 2)の試験装置と評価指標を用いて、タグの捕捉と通信の可能性を実験的に予測した。想定されるコンクリートの流動条件下 (表 1 参照) では、コンクリートの厚さや距離の数 cm 程度の差異に関わらず、3 割程度のタグが捕捉できると予測された。また本報で用いた RFID システムでは、タグに保管されたデータの読書きを流動コンクリート中で行うことはほぼ不可能であることが示された。
- 4) 実際の建築現場で検証実験を行った。限定されたサンプル数ではあるが、アジテータ車のシュート部で RFID タグの通過確認がある程度可能であることを確認した。RFID タグの通過

検出の割合は、実験室でのタグ捕捉率と近い値を示した。この結果から、建設現場における RFID のタグ通過確認の評価を行う場合に、タグ捕捉率が有用であることが示唆された。

なお、本報では、圧送時の輸送管を想定したが、実際にはバケットなど他の運搬方法もある。これらの方法は流動速度が本報の検討範囲(表 1 参照)より遅いと推察される。したがって、これらの方法を用いた場合には、タグ捕捉率は高く、タグの通過確認精度は高まると予測される。

謝辞

本研究には、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B)、課題番号：22360227 の一部を用いた。建築現場における実地試験においては、(株)大林組 甲賀一也所長、山本敬幸工事長にご協力をいただいた。本報の実験の実施にあたっては、広島大学 平成 23 年度学部学生 高橋和也氏の多大な協力を得た。ここに記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本自動認識システム協会：統計調査委員会 活動報告, <http://www.jaisa.jp/action/committee/toukei/index.html> (参照:2011.02.10)
- 2) 蔡成浩, 土橋稔美, 吉田知洋, 中村隆寛：建築工事における建設機械の接触災害の防止に関する研究-無線 IC タグデータに基づく作業者と建設機械の接近状態の推定方法の検討, 日本建築学会計画系論文集, pp.2451-2458, Vol.75, No.656, , 2010.10
- 3) 中島史郎, 中川貴文, 根本かおり, 古賀純子：RFID を活用した建物履歴情報管理手法の開発：システムの概要と改修工事における適用事例, 日本建築学会技術報告集, pp.17-20, Vol. 14, No.27, 2008.06
- 4) 依田浩敏：廃棄物の不法投棄・不適正処理防止のための支援システムの構築とその実証研究, 日本建築学会技術報告集, No.23, pp.229-232, 2006.6
- 5) 杉山央, 大久保孝昭, 中島史郎：コンクリート中に埋め込んだ各種 IC タグの通信性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, pp.9-14, Vol.15, No.29, 2009.02
- 6) L.C. Wang: Enhancing construction quality inspection and management using RFID technology, Automation in Construction Vol.17, p p.467-479, 2008
- 7) 小川彰一, 江里口玲, 佐藤達三：センサ機能付き IC タグのコンクリートへの適用, セメントコンクリート, pp.44-50, No.749, 2009.07
- 8) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:共同研究による産学との連携状況, IC タグを活用したコンクリート製造過程におけるトレーサビリティ確保技術に関する研究, <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kyoudou/renkei/renkei21.htm> (参照：2011.02.10)
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.256-261, 2009
- 10) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, p.90 解説図 3.30, 解説図 3.38 を参考に著者が作図した。
- 11) 日本建設機械化協会：日本建設機械要覧, p11-2 図 11.1-1 を参考に著者が作図した。
- 12) 森田鈞：機構学 (エンジニアリングライブラリ, 基礎機械工学-2), p149, サイエンス社, 1984
- 13) 大久保孝昭, 藤本郷史, 吉峰侑吾, 杉山央, 角倉英明, 古賀順子：コンクリートのトレーサビリティ確保のための IC タグの活用技術-製造時に投入するタグの評価-, 日本建築学会技術報告集, Vol.18, No.38, 2012.02
- 14) Klaus Finkenzeller 著, ソフト工学研究所訳:RFID ハンドブック 第 2 版 非接触 IC カードの原理と応用, pp.69-75, 日刊工業新聞社, 2004.5
- 15) X.Qing, Z.N.Chen: Proximity effect of Metallic Environment on high frequency RFID reader antenna: study and application, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, pp3105-3111, Vol.55, No. 11, 2007

注：

注 1) 評価式(3),(4)は、著者らが別報で提案した通信性能評価式との定義と類似しているが、RFID タグが通過する回数を母数としている点（すなわち、 N_p の定義）で異なる。これは、本報評価式が移動する RFID タグをとの通信を対象としており、移動する RFID タグ 1 個あたり 1 回しか通信機会が発生せず、通信リトライのできない事象（アジテータ車からの排出や輸送管の通過）を想定しているための違いである。

[2012 年 6 月 20 日原稿受理 2012 年 8 月 17 日採用決定]