

コンクリート構造物の表層品質測定を対象とした非破壊試験

岸 利治*1・半井 健一郎*2・上田 洋*3

コンクリート構造物の表層品質は、材料や施工によって変動し、とくに物質移動抵抗性に関連した表層品質は構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす。これに対し、構造物表層における透気性や吸水性を非破壊で測定する手法が開発され、近年、精力的に研究が進められている。本稿では、表層透気試験や表面吸水試験といった代表的な非破壊試験手法に加え、簡易法として新たに開発された繰返し流水試験などの表層品質試験の概要を紹介する。また、非破壊試験の活用事例として、日本初の本格的なポストテンション PC 桁である第一大戸川橋梁における表層品質の測定結果の概要を紹介する。

キーワード：表層品質、非破壊試験、耐久性

1. はじめに

コンクリートの品質は、一般には配合要因である水セメント比によって捉えられてきたが、その一方で、とくに表層品質は材料や施工の影響によって大きく変動することもよく知られている。硬化後のコンクリート構造物の表層品質に関する検査の重要性が指摘されているものの、設計上の特性値である物質移動抵抗性などの耐久性に関連した品質は、圧縮強度とは異なり、実構造物では直接に確認されてこなかった。

その一方で、コンクリート構造物の表層品質の測定に関する研究の歴史は長く、とくに近年の研究では、コンクリート表層における吸水性や透気性を従来とは異なる新しい方法で評価する手法が開発されるとともに、従来法を用いた有効活用策も提案されている。たとえば、著者らが中心となって活動した土木学会の「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）¹⁾」や「歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（216 委員会）³⁾」をはじめ、さまざまな検討が国内外で行われている。これらの研究の成果を受けて、コンクリートの表層品質の測定結果を施工段階の品質管理に活用したり、あるいは、既設構造物の品質評価に活用したりする事

例も数多く報告されるようになってきた。

本稿では、上記の委員会活動の成果を含め、各種非破壊試験による表層品質評価について紹介する。

なお、ここでの「表層品質」における「表層」とは、養生や環境の影響を受けて品質が変動し得る領域である¹⁾。その範囲は、一般には数 cm 程度であるが、コンクリートの配合などによって変化する。また、表層の「品質」には、強度や化学抵抗性なども含まれるが、本稿では物質移動抵抗性のみを対象とする。この物質移動抵抗性に関する表層品質が、かぶり厚さとともに、構造物の耐久性能の主要な支配要因になる。さらに、コンクリートが曝される環境条件によって、構造物の耐久性が決定する。

2. 表層品質に関する非破壊試験

コンクリート構造物の表層品質を非破壊あるいは微破壊によって測定する研究は、1973 年の Figg の研究⁴⁾に代表されるように古くから行われており、また、RILEM の委員会（TC116-PCD, TC189-NEC, TC230-PSC）の継続的な活動など、とくに欧州で精力的に研究が進められてきた。国内では、建築分野の笠井らが先駆的な研究を行っていた。さらに近年では、国内の土木分野でも関連研究が活発となり、新たな手法の考案を含め、数多くの研究成果が



*1 Toshiharu KISHI

東京大学
生産技術研究所 教授



*2 Kenichiro NAKARAI

広島大学大学院
工学研究院 准教授



*3 Hiroshi UEDA

鉄道総合技術研究所
コンクリート材料室長

発表されている。本章では、コンクリートの透気性及び吸水性によって表層品質を評価するものの各種試験法を概説する。

なお、より詳細には、本稿で紹介する各試験法に関する原典のほか、各種解説文^{5, 6, 7, 8, 9)}が参考となる。

2.1 透気試験

コンクリート構造物の表層品質を透気性から評価する手法が数多く提案されている。二酸化炭素や酸素の透過性と直接に関係するデータが得られ、耐久性との相関も高い手法である。

まず、Fig⁴⁾により、微破壊試験である削孔法が提案された。コンクリートの表面から10 mmの径で削孔してプラスチック製のプラグで栓をし、中に差し込んだ中空の針を通して孔内部の圧力を下げ、規定された圧力変化に要する時間を求めるものである。Dhirらによる改良手法¹⁰⁾のほか、笠井¹¹⁾も同様の試験方法を提案している。後述するようごく表層の脆弱層の影響などを緩和できるものの、完全非破壊ではないという点などに課題がある。

非破壊試験としては、シングルチャンバー法^{12, 13)}、ダブルチャンバー法¹⁴⁾、シール法¹⁵⁾などの表層透気試験が開発されている(図-1)。いずれもコンクリート表面にチャンバーを取り付け、減圧または加圧を行って圧力変化を計測するものである。減圧した場合には、それによってチャンバーをコンクリート表面に密着できる。

最初に開発されたシングルチャンバー法¹²⁾は、機構が明快で、非破壊かつ短時間で測定が可能な画期的な手法であったが、コンクリート表面の脆弱層を介した巻き込み空

気の影響が大きく、表層品質の評価が困難とされていた。

ダブルチャンバー法は、内外の二重構造のチャンバーによって巻き込み空気の影響を低減するために、Torrentによって開発された手法^{14, 16)}である。外部チャンバーの気圧を内部チャンバーと等圧となるように制御することで、測定対象となる内部チャンバーには深さ方向に一次元の透気流が形成されるようにしている。また、氏家らのシール法¹⁵⁾では、コンクリート表面を円形に気密処理し、その中央に取り付けたチャンバーから空気を吸い出す。これによってコンクリート内部の透気領域を半球状とすることができ、透気係数が算出できる。

表層透気試験のうち、ダブルチャンバー法であるトレント法が、最近、広く活用されている。スイスでは、SIA 262/1に規格化され、試験の実施方法の手順や評価方法などの詳細が示されている¹⁷⁾。これまでに、円柱試験体を用いた透気試験であるCEMBUREAU法との透気係数の良好な一致が報告されているほか、中性化や塩化物イオンの拡散係数との相関も報告されている(図-2)⁷⁾。

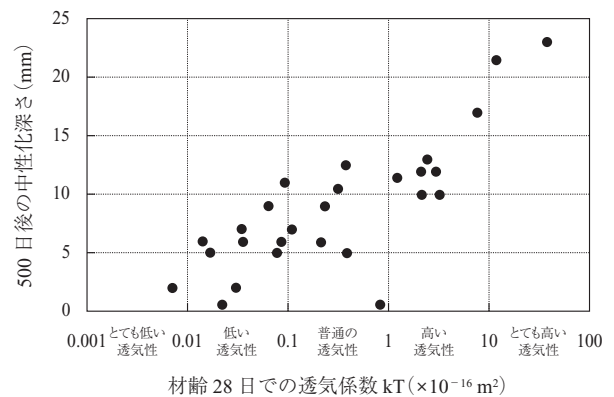


図-2 表層透気試験で計測した透気係数と中性化⁷⁾

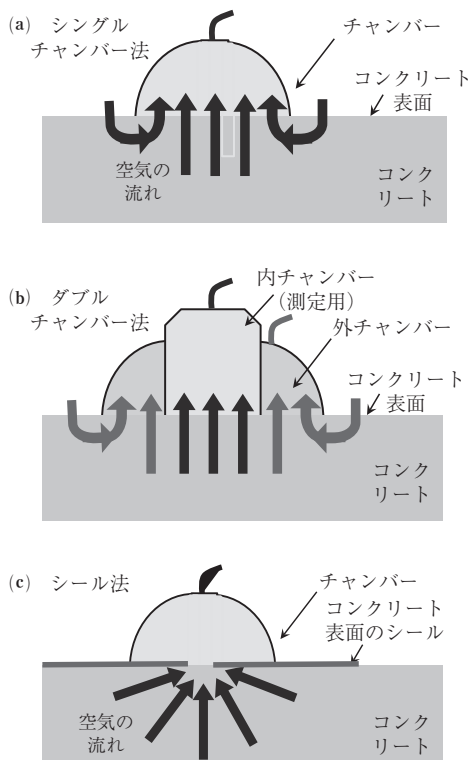


図-1 各種表層透気試験の概要と空気の流れのイメージ

2.2 吸水試験

コンクリートの表層品質を吸水性や透水性から評価する手法も数多く提案されている。コンクリートの劣化の多くには水が強く関与していることから、コンクリートの密実さとともに、劣化要因となる水の浸透可能性を直接的に評価できると考えられる。微破壊試験である削孔法や非破壊試験である表面吸水試験や流水試験、散水試験などがある。

削孔法は、透気試験と同様に、コンクリート表面に小さな空洞を設け、そこから吸水させるものである。透気試験と吸水試験を併用する場合も多い。後述する表面吸水試験などの課題である、測定深さが10~15 mm程度と一般的ななかぶりに対して小さいこと、表面被覆やレイタンス、炭酸化などの表面状態の影響が大きいことなどを改善するために提案された手法である。Fig⁴⁾、Dhirら¹⁰⁾、笠井ら¹¹⁾、月永ら¹⁸⁾など数多くの研究がある。

表面吸水試験は、構造物表面に容器を取り付けて水を満たし、吸水量の時間変化を測定するものである(図-3)。LBS 1881-5 (1996年よりBS 1881-208)に規格化されたISAT (Initial surface Absorption Test)、透気試験や透水試験

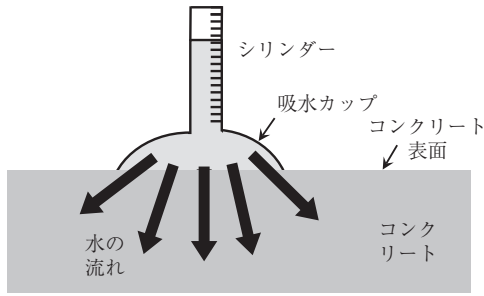


図 - 3 表面吸水試験装置の概要と水の流れ

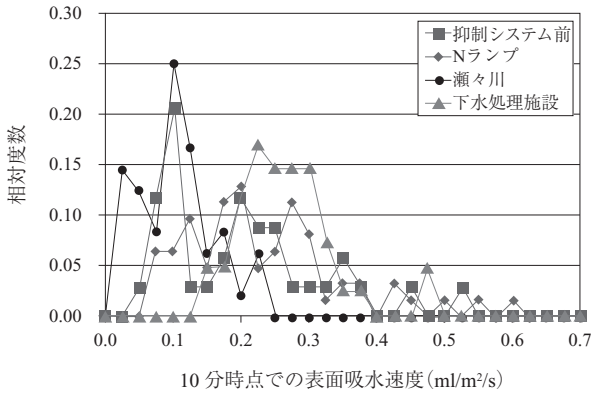


図 - 4 実構造物で測定された吸水速度の分布²⁰⁾

と組み合わせた Autoclam^{12, 19)} の2つの手法がよく知られている。国内では、最近、装置の固定や水の供給方法などを改良した SWAT (Surface Water Absorption Test) が林・細田^{20, 21)} によって提案されている。SWATでは、真空ポンプを用いて吸水カップを固定するとともに、5秒という短時間で注水を完了し、自動計測を行うことができる。図 - 4は SWATで計測した実構造物の結果である。注水から10分時点での表面吸水速度の相対度数分布より、ひび割れ抑制システムによって施工の基本事項の遵守が徹底された後の構造物 (Nランプおよび瀬々川) では、それ以前の構造物と比べて表面吸水速度の平均値やばらつきが小さくなり、表層品質が向上していることが示されている。

さらにより簡便な表層品質の測定手法として、流水試験や散水試験が提案されている。いずれも、コンクリート表面に与えた水は、表層品質が劣って吸水性が高い場合にはすぐに吸収され、品質が高い場合には吸収されずに流下するという現象を活用している。

流水試験は、デジタルマイクロピペットを用いてコンクリートの表面に一定量の水を流下させ、流水距離を測定するもので、表層品質が高いほど流水距離が長くなる (図 - 5)²²⁾。地濃らは、リバウンドハンマーによる反発度と流水距離との相関性を検討した²³⁾ が、家辺らは、1回の流水ではごく表層の影響を強く受けるとして、同じ個所から水を繰り返し流下させて内部に水を浸透させる「繰り返し流水試験」を提案している²²⁾。

図 - 6は屋外に作製された中規模柱試験体における測定例である。材齢15か月において、流水試験によって流

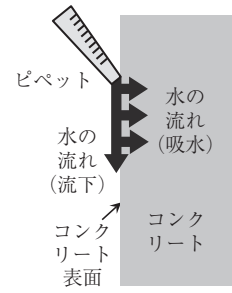


図 - 5 流水試験の様子²²⁾ と原理

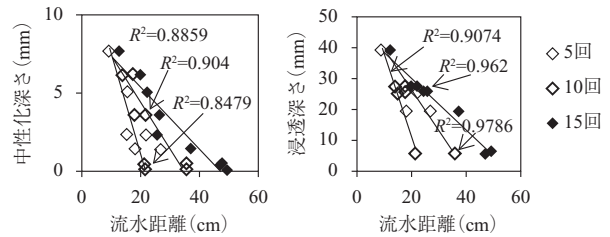


図 - 6 繰り返し流水試験で得られた流水距離と中性化深さおよび塩化物イオン浸透深さとの関係²²⁾

水距離を測定したうえで、採取したコアの中性化深さの測定と室内での塩化物イオンの浸透試験を行い、相関を分析した。いずれも良好な相関を示したが、流水1回の試験では、中性化深さと0.7296、浸透深さと0.8547であった決定係数が、繰り返し流水試験では向上していることが示された。

散水試験は西尾らにより提案されたものであり、手動式のスプレーを用いてコンクリート表面の同一箇所に一定量の水を繰り返し散水し、表面色の変化の観測を行うものである²⁴⁾。鉛直面への散水の場合には、余剰水の流水距離も測定される。表層品質が高いほど少ない散水回数でコンクリート表層が飽和し、表面色の変化が収束するとともに流水距離が長くなることを定量的に評価している。

2.3 その他の試験

これまでに、強度や硬度の測定を目的とした非破壊試験は、すでに多くの研究成果や実績がある。コンクリートの密実性を評価するという観点からは、耐久性を左右する物質透過性に関する表層品質を、間接的に評価できるものと考えられる。リバウンドハンマー試験のほか、たとえば、超音波試験 (透過法、土研法) や衝撃弾性波 (接触時間) 試験による検討事例も報告されている^{1) 2)}。

また、さらに簡便な方法として、コンクリート表面の性状を目視観察により点数化する目視評価に関して、表層品質との相関も分析されている²⁵⁾。

3. PC 構造物における表層品質の測定例

近年、コンクリート構造物の表層品質の測定事例は飛躍的に増え、数多くの事例が報告されている。ここではとくにプレストレストコンクリート構造物の測定例として、土木学会の335委員会および216委員会による、第一大戸川橋梁の調査報告を紹介する。

第一大戸川橋梁は、信楽高原鐵道(株)の勅旨・玉桂寺前駅間(滋賀県甲賀市)に位置し、一級河川大戸川を渡る単線4主桁のPC橋梁である(写真-1)。日本初の本格的なポストテンションPC桁として、1954(昭和29)年に当時の日本国有鐵道により架設されたもので、支間30m、支間中央の桁高は1.3mである。



写真-1 第一大戸川橋梁

この橋梁については、建設の陣頭指揮を執られた仁杉巖博士により詳細な報告がなされている²⁶⁾。PC桁の配合は表-1のとおりで、セメントには早強ポルトランドセメント(浅野ペロセメント)が使用された。最初に製作された桁はスランプが3.0cmで、その後に製作された3つの桁はスランプが2.0cmと小さい。また、このコンクリートでは硬化初期の発熱が懸念されたため、施工後7日間は上面を濡れむしろで覆い、さらに上側に配置した竹樋から15~16℃の冷水を絶えず流して桁全面を湿潤状態におくとともに、シース内に同様の冷水を順次流通させてコンクリートの温度上昇を防いでいる。

表-1 PC桁の配合²⁶⁾

桁番号	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
1	25	3.0	36	162	450	549	1 263
2~4	25	2.0	36	156	430	560	1 292

この橋梁の建設にあたっては、主桁と同一断面を有し、同一条件で製作されかつ同一条件におかれた無載荷の桁(標準桁)が2体作製され、現在も第一大戸川橋梁の近くに静置されている(写真-2)。

前述の土木学会335委員会では、コンクリートの表層品質評価に関する研究の中で、耐久性に優れた構造物を定量的に検証・実感するためのフラッグシップと位置付けて、第一大戸川橋梁におけるコンクリートの品質調査を2007(平成19)年に実施した¹⁾。この調査では、表-2に示す項目について調査が行われ、実桁のほか標準桁も活用された。

調査時には建設から53年を経過していたが、標準桁の



写真-2 線路脇に静置されている標準桁¹⁾

表-2 第一大戸川橋梁調査における実施項目¹⁾

		調査項目
現地調査	外観調査	外観調査(外観の状況、中性化の状況、表面含水率測定)
	物質移動抵抗性等	表層透気試験、表面吸水試験
	強度特性等	テストハンマー試験、弾性波試験
採取したコアによる調査	材料・配合等	配合推定、粗骨材の比表面積測定、粉末X線回折分析、EPMA分析
	空隙構造等	空隙構造分析、気泡間隔係数測定
	物質移動抵抗性等	透気係数測定、透水係数測定、中性化深さ測定、促進中性化試験、酸素拡散係数測定、水分逸散・乾燥収縮試験
	強度特性等	圧縮強度・静弾性係数・ポアソン比測定、動弾性係数測定、微小硬度分布測定

中性化深さはほぼ0mmであり、調査メンバーはその品質の高さを目の当たりにした(写真-3)。図-7は、非破壊試験における測定結果の一例として^{27, 3)}、第一大戸川橋梁のPC桁における表層透気係数は、他のさまざまなコンクリート構造物と比べてきわめて小さいことがわかる。このコンクリートではリバウンドハンマー試験における基準反発度も高い値を示しており、その他の非破壊試験や標準桁からの採取コアを用いた各種試験においても、物質移動抵抗性に優れた高い品質を示すデータが得られている。



写真-3 標準桁の中性化深さ測定¹⁾

この委員会では、第一大戸川橋梁に用いられたコンクリートの表層品質を検証することを通じて、品質評価手法のレベルアップを目指したが、結果的に第一大戸川橋梁に用

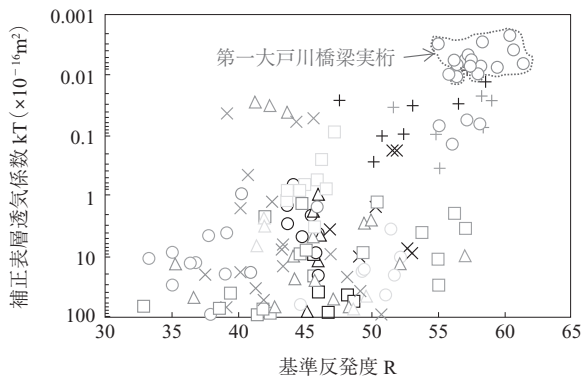


図 - 7 表層透気試験と基準反発度の測定結果
(*文献²⁷⁾をもとに文献³⁾の情報を加えて作成)

いられた PC 桁の高い品質を再認識することになった。そして、建設時の材料や配合の適切な選定および基本に忠実で丁寧な施工がコンクリートの表層品質も高めること、また各種の非破壊試験によってその表層品質を評価可能であることが示された。

第一大戸川橋梁は、建設時にもプレストレストコンクリートの発展に大きな功績を残したが、その良好な品質をもとに、コンクリートの表層品質評価技術の発展においても大きな功績を残したといえる。

4. おわりに

物質移動抵抗性に関するコンクリートの表層品質は、研究上はその重要性が古くから認識されており、室内試験は数多く実施されてきたが、実構造物での計測は一般的ではなかった。しかし、本稿で紹介したように、数多くの手法が開発されるとともに、PC 構造物を含めた実構造物の測定事例も増えつつある。今後、新設構造物を対象とした竣工検査や耐久性検証などに向けた、さらなる活用が期待される。

謝 辞

本稿において紹介した第一大戸川橋梁の調査は、信楽高原鐵道株式会社のご協力のもと、土木学会 335 委員会および 216 委員会で実施したものである。ここに関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ No.80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演論文集, 土木学会, 2008
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ No.80 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演論文集, 土木学会, 2012
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ No.87 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会 (216 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.15-17,

土木学会, 2009

- 4) Figg, J.W. : Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of concrete research, Vol.25, No.85, pp.213-219, 1973
- 5) Hall, C. : Water sorptivity of mortars and concrete : a review, Magazine of Concrete Research, Vol.41, No.147, pp.51-61, 1989
- 6) 氏家 勲 : 実構造物におけるかぶりコンクリートの吸水性, 透水性, 透気性の測定方法, コンクリート工学, Vol.32, No.12, pp.62-66, 1994
- 7) RILEM TC 189-NEC : Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover-State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 189-NEC, RILEM Report 40, 2007
- 8) Concrete Society : Permeability testing of site concrete, Concrete Society Technical Report, No.31, 2008
- 9) 湯浅 昇, 野中 英 : 透水性, 建築技術, No.703, pp.138-139, 2008
- 10) Dir, R.K., Howlett, P.C., and Chan, Y.N. : Near-surface characteristics of concrete : assessment and development of in situ test methods, Magazine of Concrete Research, Vol.39, No.141, pp.183-195, 1987
- 11) 笠井芳夫ほか : 簡易な試験による構造物コンクリートの品質評価の試み, セメント・コンクリート, No.559, pp.20-28, 1993
- 12) Schönlin, K. and Hilsdorf, H. : Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures, ACI SP-100, Concrete durability, pp.207-226, 1987
- 13) Basheer, P. : The Autoclam-a new test for permeability, Concrete, Vol.28, No.4, pp.27-29, 1994
- 14) Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 15) 氏家 勲ほか : 実構造物でのコンクリートの透気係数の測定方法に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.62, pp.197-204, 2008
- 16) <http://www.m-a-s.com.ar/eng/product.php>
- 17) <http://www.m-a-s.com.ar/pdf/ANNEX%20E%20SIA%20262-1.pdf>
- 18) 月永洋一ほか : 簡易試験による表層部コンクリートの透過性評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp.7-14, 1998
- 19) <http://www.amphorandt.com/>
- 20) 林 和彦, 細田 暁 : 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 21) <https://sites.google.com/site/concreteswat/>
- 22) 家辺真理子ほか : 水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.670-675, 2012
- 23) 地濃茂雄, 佐藤茂治 : 打放しコンクリート外壁面における雨水の吸水・流下に関する検討, 第 65 回セメント技術大会講演要旨, pp.156-157, 2011.5
- 24) 西尾壮平ほか : コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.303-310, 2012
- 25) 坂田 昇ほか : コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.601-606, 2012
- 26) 仁杉 巖 : 支間 30 m のプレストレストコンクリート鉄道橋 (信楽線第一大戸川橋梁) の設計, 施工及びこれに関連して行った実験研究の報告, 土木学会論文集, Vol.27, 1955
- 27) 蔵重 勲ほか : 実構造物および室内供試体を対象に非破壊評価したコンクリートの反発度と表層透気性の関係, 土木学会第 64 回年次学術講演会 V 部門, pp.383-384, 2009

【2014 年 10 月 1 日受付】