# 不飽和化地盤におけるコーン試験時に生じる 間隙水圧挙動挙動に関する簡易模型実験

永尾 浩一1・中澤 博志2・神宮司 元治3・末政 直晃4

<sup>1</sup>正会員 佐藤工業 技術研究所(〒160-0004 神奈川県厚木市森の里青山14-10) E-mail: nagao@satokogyo.co.jp

<sup>2</sup>正会員 防災科学技術研究所 減災実験研究領域(〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1) E-mail: nakazawa@bosai.go.jp

<sup>3</sup>正会員 産業技術総合研究所 地質調査総合センター (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1) E-mail: m.jinguuji@aist.go.jp

<sup>4</sup>正会員 東京都市大教授 総合研究所兼工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1) E-mail: nsuemasa@tcu.ac.jp

不飽和化工法は,安価かつ施工がシンプルなことから,2011年東北地方太平洋沖地震以降,住宅の液状 化対策としての利用が考られている.本工法は既に施工性の確認はなされているものの,出来型の確認手 法は計測孔や注入孔を利用した土壌水分計(TDR)や比抵抗計測等の部分的な飽和度の確認までに留まっ ているのが現状である.そこで,著者らは東北地方太平洋沖地震で液状化が確認された千葉県浦安市の運 動公園内における不飽和化地盤において,間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験を実施し,簡易的に不 飽和化の確認を試みた.この調査では,液状化層の不飽和化前後において,コーン打撃時に生じる過剰間 隙水圧計測結果に違いが認められた.本研究では室内で土槽地盤を用いた簡易的なコーン試験を実施し, の間隙水圧応答特性把握を行った.その結果,若干ではあるが,コーン内部のセンサーで捉えた間隙水圧 とコーン近傍で発生する過剰間隙水圧に違いがあることが認められた.

*Key Words* : *unsaturated ground, liquefaction countermeasure, dynamic cone penetration test, excess porewater pressure test, model test* 

# 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では,関東地方の平野 部において,大規模な宅地地盤の液状化被害が生じた. 特に浦安市を始めとする首都圏では,これまで経験した ことのない大規模な被害となり,市民の日常生活を脅か した.以来,宅地地盤を対象とした液状化対策工法の開 発が精力的に行われている.

浦安市では、戸建て住宅を対象とした液状化対策方法 の実現可能性の検討<sup>1)</sup>を行い、区画を対象とした格子地 盤改良と不飽和化工法が有力な工法として取り上げられ ている.特に、不飽和化工法は、安価で比較的施工が容 易・迅速に実施が可能な地盤改良工法の一つとしての特 徴を有している一方、対象土質の限界、耐久性、あるい は施工管理・出来型確認方法についての合理的な判断指 標が確立されていないのが現状である.そこで、浦安市 内の試験サイトにおいて、格子状モルタル連壁に囲まれ た実地盤への気泡を混入させたマイクロバブル水の現場 注入実験が行われ、その施工性と改良効果の確認が行わ れた<sup>3</sup>. この際、間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試 験が実施されたが、地盤の飽和度が低い程、コーン打撃 時のコーン内部のセンサーで計測された過剰間隙水圧応 答値の顕著な増加が見られた<sup>3</sup>.本来、不飽和地盤では、 間隙水中の空気の圧縮性により打撃時の間隙水圧応答値 が小さくなることが予測されたが、上述の調査・計測で は逆の結果が得られたことから、コーン近傍地盤での過 剰間隙水圧発生傾向を反映したものかどうかを判断する ため、室内模型地盤において確認を行うこととした。

本報告では、浦安市で実施した地盤の不飽和化前後で のコーン打撃時の過剰間隙水圧の傾向を整理した.次に、 室内で模型実験を実施し、飽和・不飽和地盤におけるコ ーン内部およびコーン周辺地盤の間隙水圧挙動や傾向を 整理し、出来形確認手法としての適用性や今後の展望に ついて述べるものとする.

#### 2. 不飽和化工法の概要

飽和度低下による液状化対策工法は、これまで低コス トであることから、広範囲での液状化対策工法として有 効な工法になり得るとされてきたが、気泡の混入工法や 残留性能などの課題があった.マイクロバブル(以下, MB)は、直径が約10~100µmの微細な気泡であるため 浸透能力が高く、地盤内を効率よく飽和度を低下させる ことが可能性である.MBの発生方法は、気液二相流体 混合せん断方式、細孔方式、超音波方式など様々な方法 があるが、本工法では、渦崩壊を利用したタービン翼型 気泡発生ノズルを使用した装置%を使用している.なお、 MB注入工法の現場レベルでの施工性の確認と効果の検 証は、制御発破による人工液状化実験等、いくつかの現 場やプロジェクトにおいて実施されている<sup>9</sup>.

一方,本工法は,原位置における面的な改良効果確認 方法が確立されていない等の課題がある.現状では,地 盤の不飽和化を対象とした出来型確認手法としては, PS検層,比抵抗探査およびTDR土壌水分計等による計測 <sup>例えば3),0</sup>が試されているが,いずれも計測孔を設置・管理 せざるを得ないデメリットがある.

なお、MB水を混入した砂地盤の液状化強度に関して は、豊浦砂による $D_r=60\%$ 、 $\phi=5cm$ 、h=10cmの供試体 にMB水を通水し、飽和度を80%とした条件の下、飽和 砂の1.7倍程度となることが報告されている<sup>の</sup>.

#### 3. 試験施工および地盤調査の概要

本試験施工の詳細については、永尾ら<sup>2</sup>により詳しく 述べられている.試験施工では、格子状改良壁に囲まれ た実地盤にMB水を注入し、飽和度の確認を行いながら 約半年間の耐久性の確認が行われた(MB水注入試験). 半年後、MB水による再改良を目的に、MB水注入地盤 に対し、地盤内のMB水の制御、地盤内空気の耐久性向 上を高める目的でシリカ薬液注入工法を施工し、MB水 の再注入が行われている(再注入試験).本報告におけ る模型実験が、不飽和化改良前後による動的コーン貫入 試験時の間隙水圧応答特性の把握を目的としているため、 この再注入試験結果の紹介は割愛する.

#### (1) MB水注入試験

試験施工は、図-1に示す千葉県浦安市の運動公園にて 行われた.事前ボーリング調査結果を基づく試験地盤の 地質・地層構成を表-1に、粒度分布を図-2に示す.試験 地盤は、1965~1975年に埋め立てられた浚渫地盤であり、 GL-6mまでは細粒分を多く含むシルト質地盤、GL-6m~ GL-13mまでは旧海底面以下のN値15以下の砂質地盤で



表-1 地盤構成

地質区分	深度(m)	N值
埋土	0~1.6	12
シルト質細砂	1.6~2.7	3
砂混じりシルト	2.7~3.9	0
シルト混じり細砂	3.9~5.6	2~8
砂混じりシルト	5.6~6.2	6
細砂	6.2~10.8	5~15



ある. 今回, 注入対象とする層はGL-3.0m~GL-8.0mの 細粒分の多い粒径の揃ったシルト質細砂地盤である. 地 下水は, 潮位により変動すると考えられるが, 後述の動 的コーン貫入試験時にはGL-2m程度であることが確認さ れた.

実験断面図を図-3に示す. MB水注入箇所は, 直径 φ 250mmのモルタル杭連壁で深さGL-13mまで格子状囲ま れた4m×4mの連壁内地盤であり, MB水の注入孔は, 狭 い宅地でも施工が可能な小型のロータリーボーリングマ シンで削孔し, 複数箇所から注入ができる多点注入結束 細管を設置した. 注入深度は, それぞれGL-3.5m, 4.5m, -5.5m, -6.5m, -7.5mの5深度とし, MB水は, 水道水を用



図-3 実験概要(断面図)



図-4 ピエゾドライブコーン装置の概要

い現場で生成した.また,MB水の生成・送水圧力は 0.5MPa,総流量を約351/min(1箇所当たり2~31/min程度) とし,注入と同時にMBが発生する仕組みになっている.

MB注入時の飽和度Sは、挿入式のTDR土壤水分計に より計測された. TDR (Time Domain Reflectometry)とは、 電磁波を用い地盤の誘電率より、体積含水率を求めるも ので、専用の計測管にプローブを挿入することにより、 計測箇所の深度方向の体積含水率の分布が把握できる. 計測箇所は連壁内の4箇所であったが、計測箇所の正確 な間隙比の把握が困難なため、注入前に計測したSを 100%と仮定し、MB注入後の値を求めた.

# (2) ピエゾドライブコーンによる改良効果確認調査a) 調査概要

図-4に示す様に、本研究で用いた動的コーン貫入試験 はピエゾドライブコーン(以下,PDC)である<sup>7</sup>.本サ ウンディングは、打撃貫入時に先端コーン位置で間隙水 圧応答を計測し、N値、地下水位、細粒分含有率F<sub>c</sub>等を 簡易的かつ短時間で取得が可能であるため、調査後、迅 速に液状化判定による評価ができる.本研究では、液状



図-5 残留過剰間隙水圧と細粒分含有率の関係。

化判定が目的ではなく、地盤の不飽和化に伴う、コーン 打撃時に発生する過剰間隙水圧の程度の変化を捉えるこ とを目的としている. 試験実施時期は、MB水注入から1 日後とした.

#### b) 貫入機構

先にも述べたとおり、PDCは、動的貫入試験装置の先端コーン部に打撃貫入時に発生する地盤の過剰間隙水圧 を測定する調査方法であり、重錘落下による動的貫入試 験装置の先端コーン部に間隙水圧計が設置され、打撃貫 入時の間隙水圧を計測する.使用する重錘は、ミニラム サウンディング試験と同様に、重さ30kgであり、高さ 35cmから自由落下させて先端コーンが地盤内に20cm貫 入する打撃回数Nm値を計測する方式である.Nm値は標 準貫入試験SPTによるN値に換算した換算N値Naと式(1)の 関係がある<sup>8</sup>.

$$N = N_d = \frac{1}{2} N_m \tag{1}$$

#### c) 地盤評価法の概要

動的打撃時には重錘がノッキング・ヘッドに打撃する タイミングでトリガーがかかり,打撃直後の貫入変位量 及び間隙水圧量を高速( $\Delta t = 100\mu sec$ )でデータ収録する. 打撃貫入時に発生する過剰間隙水圧の消散は,細粒分の 多い地盤ほど,過剰間隙水圧  $u_e$  (動的打撃時に得られる 02s 後の応答値)の残留値が大きくなり, $F_c$ が高い地盤 として算定される. 図-5 に示す SPT で採取した攪乱試 料の $F_c$ と残留過剰間隙水圧比  $u_e/\sigma$ , の関係により, 土質 区分が判別される 9. なお,本研究では土質判別を目的 としていないため, $u_e$  は議論せず,コーン打撃時の最 大・最少過剰間隙水圧に着目した検討を行っている.

#### (3) 調査結果のとりまとめ

#### a) PDCとTDRによる調査結果

図ー6にMB水注入試験前後のPDCとTDRの調査結果および液状化判定結果を示す. MB水注入前後のNa値, Fe,最大間隙水圧Autman, Sr等の深度分布を示す. Na値の全体傾向は, N値と同一深度でほぼ同様な分布を示し,注入前後において概ね一致する傾向を示している. 一方, ue



(b) MB 水注入後調査結果 図-8 MB 注入試験の調査および液状化判定結果

から推定されるF<sub>c</sub>は,注入後に若干課題な評価を与えて いるものの,比較的調和傾向にあると考えられる.これ は,MB水注入により,土骨格のせん断剛性が不変であ ること,まら,前節で述べたように,PDCによる土質判 別が一打撃毎のu<sub>e</sub>により判別されるため,液状化層の透 水性があまり変化していないことを意味する.

次に、東北地方太平洋沖地震時の当該地付近の条件

(マグニチュードM=9.0,  $\alpha_{max}$ =200gal) で実施した,建 築基礎構造設計指針<sup>10</sup>による液状化判定結果をの事前調 査に限って見ると、GL-7m付近を除き、全体的に液状化 安全率Eが1を下回っている.震災当時、当該地で噴砂 が確認されていることから<sup>11</sup>,本判定結果は概ね妥当な 結果を与えているものと判断される.なお、MB水を注 入してもEの傾向にあまり変化が無いのは、N値とEに 変化が見られないからである.

#### c) PDCによる不飽和化地盤の解釈

MB水注入試験前後におけるコーン貫入打撃時の過剰 間隙水圧と貫入量の時刻歴データを図-9にそれぞれ示す. これらの図は、埋立て地盤と在来地盤の大別されており、 事前ボーリング調査で得た各地層における代表的なデー タを示している.各地層の違いは、細粒分の多さ、土被 り圧、あるいは地盤の成因(埋立てか在来地盤か)等の 各種要因が挙げられる.MBの有無による過剰間隙水圧 Δuの特徴の違いについてはこれらの要因を加味して判 断すべきであるが、通常、間隙水に空気が混入すると、 体積弾性係数Kが減少することから、MB水注入後の打 撃時 Δuのピーク Δumaが小さくなると予測される. MB水 注入前後の調査地点間(1.5m離れ)の地盤の相違がない ことを前提に各時刻歴を確認すると、事前の予想に反し 逆転現象が認められ、全体的な傾向としては、MB水注 入後に Δumaが増加している.

時刻歴のピークに絞り図-8に示す間隙水圧uおよび Δumacの分布傾向を確認すると、MB注入範囲全体にわた り、MB注入後の間隙水圧応答が明瞭に大きくなってい る様子がわかる.TDR計測結果からは、S<sub>0</sub>の90%程度ま での低下を確認しており、MBが確実に注入できていた ことは事実であると見られる.したがって、測定系のメ カニズムとコーン周辺地盤の間隙水圧応答の把握の上、 MB注入効果の確認手段の一つとなり得るか、判断すべ きであると考えられる.

なお、澤田等<sup>10</sup>は、地下水位以浅の不飽和土中で大き な*Aumax*を発生させる理由について、間隙の空気の体積 弾性係数*Ka*が大きいため、打撃慣性力による圧力センサ ーのダイアフラムの衝撃変形に対する拘束力が小さくな ることを指摘しており、必ずしも地盤の特性を反映して いないものと推察される.



図-10 MB注入試験前後のPDCにおける各地層の代表的時刻歴データ(過剰間隙水圧および貫入量)

### 4. 室内簡易模型実験

浦安における原位置における計測結果から,PDCによ り、地盤の飽和度が低下した際の様相を定性的に捉える ことが可能なことを確認した.しかし、飽和度の定量的 な評価するにはコーン打撃時の過剰間隙水圧の発生メカ ニズムを明らかにする必要がある.そこで、現場計測結 果の検証を兼ね、小型の砂土槽地盤を用い簡易的なコー ン打撃による飽和度確認実験を実施し、打撃時の地盤の 間隙水圧応答について室内模型実験を行った.

#### (1) 模型実験概要

図-10に試験概要および計測位置を示す.試験土槽は 幅600mm×奥行き350mm×高さ600mmの小型アクリル容 器を使用した.試験地盤は,飯豊硅砂6号( $\rho$ =2.621g/cm<sup>3</sup>, *emax*=0.858, *emin*=0.543, *D*<sub>50</sub>=0.299mm, *U*<sub>c</sub>=2.2)を使用し, 空中落下法により層厚350mm,相対密度*D*<sub>c</sub>を約60%で作 成した.その後,土槽下部から二酸化炭素を通気後,脱 気水を浸透させ飽和地盤とした.飽和地盤の不飽和化に はMB水を用い,土槽下部より注入圧は400kPaで注入を 行った.模型地盤作製時の地盤の品質確認や実験前後の 地盤の状態を調べるため,簡易小型動的コーン貫入試験 PANDA<sup>13</sup>による打撃貫入試験を試験に影響のない場所 で行った.

本実験では、土被りが小さいこと、およびより詳細な 挙動を把握するため、PDCの間隙水圧計の付いた先端ロ ッド部分のみを用い、重さ2.5kgfのランマーを高さ30cm からロッド上部に自由落下させ、その際の地盤内へのコ ーン打撃時の間隙水圧を計測した.これは、通常、現場 で行われている試験の1/14の落下エネルギー量に相当す る.また、PDCの他に比較対象として、地盤飽和度の計 測に挿入式のTDRおよびベンダーエレメントBEを用い た.TDR計測では、プローブ長が30cmであるため、計 測値は図中の設置箇所地盤周辺全体の平均的な値となる. 一方、BEは、発信器と受信機を土槽底盤と地表面に設 置しており、設置箇所の底盤から地表面までの平均的な 弾性波速度値となる.

表-2に示す様に、PDCによる測定は、乾燥地盤、飽和 地盤、MB水注入後(30分),MB水注入後(90分)の4 工程終了時にそれぞれ行った。図中に示す計測箇所は、 飽和地盤はPDC1、MB水注入後はPDC2にて行ったがそ れぞれ間隙水圧計から3~5cmの離隔がとられている。

#### (2) 実験結果

TDRによるS、は、飽和砂、MB水30分およびMB水90分 の各試験ケースに対し、それぞれ100%、81%および82% であった. MB水注入30分および90分でほぼ同じ結果と なったが、これはプローブが土槽下部の飽和度を捉え、



表−2 試験ゲーム			
試験ケース	PDC	PANDA	
乾燥砂	PDC1脇	PANDA1	
飽和砂	PDC1	PANDA1脇	
MB水30分	PDC2	PANDA2	
MB水90分	PDC2脇	PANDA2脇	

気泡の拡散の差が出にくい深度であった可能性がある. また、BEによる弾性波計測結果については、乾燥砂で は $V_p$ =150m/s、 $V_s$ =90m/s程度であった.一方、飽和砂、 MB水30分およびMB水90分の各試験ケースでは、受信点 で得られる到達波の立ち上がりがあまり明瞭でなかった ことから、精度はあまり良くないと思われるが、飽和砂 で $V_p$ が1000~1200m/s、 $V_s$ が60~80m/s程度、MB水注入後 の $V_p$ については400~700m/s程度を示し、 $V_s$ はほぼ不変で あった.

試験の深度分布結果を図-11に示す。PANDAによる貫 入抵抗値qaおよびPDC打撃時のコーン貫入量は、表層付 近では、深度方向にqaが増加かつ貫入量は減少するが、 全体的にほぼ同様な値を示し、概ね一様な地盤が形成さ れていると判断される.

図-12にPWP深度付近のPDC深さGL-21cm貫入時のPDC コーン内部の過剰間隙水圧の時刻歴を示す.乾燥砂でも 計測を行ったが,±15kPa程度の圧力を検出しているが, 打撃時の衝撃に伴う慣性力の影響であると思われる.飽 和後を見ると,飽和地盤に対し,不飽和化地盤では過剰



図-12 PDC計測結果(PDCGL-21cm時)

間隙水圧の最大値Aumaxが増加し、最小値Auminも同様な傾 向が見られる. 図-11に示した深度分布においても,注 入前後でAumaおよびAumiが大きくなっており,浅層を中 心にMB水の量が多くなるに従い、PDCの応答値が増加 し、飽和度の変化を反映しているものと考えらえる.

一方, PDC深さGL-21cm時周辺地盤の間隙水圧PWPの

### 5. まとめ

本報告では、PDC試験時に測定される過剰間隙水圧に 着目し、MB注入効果確認に関する整理を行った.過去 の試験施工現場でのPDC試験結果では、MB注入前後の 過剰間隙水圧のピーク値に差が見られ、PDCが定性的な 判断材料となり得ることが示された.しかし、地盤の不

1

飽和化の評価に関しては、原位置飽和度の定量的評価に 向け、不飽和化に伴い間隙水圧応答値が大きくなること を解明する必要があると思われる.

今回, PDCにより計測される過剰間隙水圧とコーン打 撃時に周辺地盤で発生する過剰間隙水圧を確認するため, 小型の土槽を用いた簡易な模型実験を実施した.今回の 地盤条件では,有効上載圧や静水圧が小さいため,気泡 の収縮による水圧低減変化を捉えることは難しいと考え られるが,飽和度変化によるPDCの過剰間隙水圧最大最 小値や現場計測結果と同様な傾向を把握することができ た.一方,地盤内に生じる過剰間隙水圧は,不飽和化に 伴い応答値が低下しており,間隙水内の気泡の圧縮の影 響によるものと考えられる.

本模型実験からも、地盤内における空気有無の差は明 瞭であり、地盤の不飽和化に伴う飽和度把握の可能性が 示され、かつ出来型管理は可能であると判断されるが、 PDCと地盤に生じる過剰間隙水圧挙動の差異については、 今後も議論が必要であると考える.

謝辞:本研究における簡易模型実験を実施するにあたり, 東京都市大学の上村健太郎氏と三森章太氏の協力を得た. ここに記して感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会:液状 化対策実現可能性技術検討委員会ホームページ, http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokoukai/shingikai/t oshiseibi/1002853/1003131.html(平成27年9月4日閲 覧)
- 2) 永尾浩一,末政直晃,神宮司元治,中澤博志:浦安市地盤における戸建て住宅を対象としたマイクロバブル水液状化対策工法の実証実験,佐藤工業技術研究所報, No.38, pp.27-34, 2013.

- 3) 中澤博志,永尾浩一,末政直晃,神宮寺元治:間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験による不飽和化地盤の現場確認調査,日本材料学会,第11回地盤改良シンポジウム論文集,pp.425-430,2014.
- 山田麗徳,坂入信之,金子公久,京籐敏達:空気吸い込み渦の崩壊に伴う微細気泡の生成,日本流体力学会,年会2005講演要旨集,AM05-24-002,2005.
- 「野高弘,中澤博志:液状化対策に関する実物大の 空港施設を用いた実験的研究,港空研資料,No.1195, 354p, 2009.
- 6) 永尾浩一,末政直晃,畔上洋一,中澤博志,神宮司 元治,岡庭一憲:マイクロバブル水を利用した不飽 和化による液状化対策工法に関する実大規模液状化 実験,土木学会海洋開発論文集,Vol24, pp.291~296, 2008.
- 7) (公社)地盤工学会:地盤調査の方法と解説 第6編 サウンディング 第13章 規格・基準以外の方法, pp.462-464, 2013.
- 8) 伊藤義行,小川重之,岩崎智久,村田芳信,佐藤 将:小型オートマチックラムサウンディング試験に よる地盤評価,第 37 回地盤工学研究発表会発表講演 集,pp.103-104,2002.
- 澤田俊一:地盤の液状化判定を目的としたサウンディング調査法に関する研究,東京理科大学博士論文, 2006.
- 10) (一社) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,第4
   章 基礎構造の計画 4.5 節 地盤の液状化, pp.61-72, 2001.
- 11) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会:資料 2-4-3 建築物の被害・液状化対策, http://www.city.urayasu.lg.jp/\_res/projects/default\_project/ \_\_page\_/001/002/934/06\_siryo2-4-
  - 3kenchikubutunohigai.pdf, 平成 27 年 9 月 4 日閲覧
- 12) 澤田俊一,塚本良道,石原研而:間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その5地下水位-,土木学会第60回年次学術講演会(部門 III), pp.961-962,2005.
- Langton, D.D. : The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, Ground Engineering Septemer, pp.33-34, 1999.

# SIMPLE MODEL TESTS ON EXCESS PORE WATER PRESSURE BEHAVIOR AT DYNAMIC CONE PENETRATION IN UNSATURATED GROUND

# Koichi NAGAO, Hiroshi NAKAZAWA, Motoharu JINGUUJI and Naoaki SUEMASA

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused many damages due to liquefaction in residential areas of the Kanto Plane. After the earthquake, several countermeasures against liquefaction have been developed energetically; one of these countermeasures is an unsaturation method such as the microbubble water injection method by some researchers from our research group. During their developing process, there was no or few direct-confirmation technique of degree of saturation of a liquefaction layer in-situ, so it was difficult to quantitatively estimate effectiveness of liquefaction countermeasures. In this study, to develop estimation procedure of in-situ saturation degree for evaluation of an unsaturation method for liquefaction countermeasures, a series of simple tests by Piezo-Drive Cone Penetrator Tests called as PDC on un saturated model ground were carried out. As a results, different excess pore water responses between by a sensor inside the corn and around the unsaturated model ground were confirmed. The study suggests that application of PDC has enough possibility of estimating saturation degree.