

ピエゾドライブコーン（液状化ポテンシャルサウンディング）の適用事例 —レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検—

澤田 俊一*・吉澤 大造*・藤井 紀之*・植村 一瑛*・伊藤 亮太*・古田 一郎*

Application examples using Piezo Drive Cone (Earthquake proof performance inspections of river dikes)

Shun-ichi Sawada*, Daizo Yoshizawa*, Noriyuki Fujii*, Kazuaki Uemura*,
Ryouta Itou* and Ichirou Furuta*

Abstract

Piezo Drive Cone (PDC) is a newly developed dynamic sounding tool which can estimate SPT- N values and soil classifications by the measurements of cone penetration depths and excess pore pressures during the dynamic penetration into ground. The penetration blow numbers (N_d values) by the PDC are converted to equivalent SPT- N values. The fine contents (F_C) of soils are also estimated by the residual cumulative pore pressure ratios. The liquefaction susceptibility of soils can be evaluated using these SPT- N and F_C data.

After reviewing damages of river dikes by “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport has announced methods for future earthquake-resistant measures for these river dikes. The earthquake-resistant measures require the evaluation of liquefaction susceptibility for each precisely subdivided layer.

This technical note shows application examples of the PDC which is effective for the earthquake-resistant inspections for river dikes, and the PDC data acquisition system developed for general purposes.

Keywords: In situ, Liquefaction, Sounding, River dike, Earthquake-resistant measures

(要 旨)

ピエゾドライブコーン（液状化ポテンシャルサウンディング）は、動的貫入試験装置の先端コーンに内蔵した間隙水圧計で打撃貫入時に地盤内で応答する過剰間隙水圧を計測し、地盤の N 値と共に土質区分が推定できる新しいサウンディング調査法である。打撃貫入することにより1打撃毎に貫入量から N 値、過剰間隙水圧の残留値から細粒分含有率 F_C を評価することができ、各種設計基準に準じた液状化判定を行うことができる。

2011年東北地方太平洋沖地震の発生に伴って、国土交通省では地震による河川堤防の被害を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方を示し、全国の河口部の河川堤防でレベル2地震動に対する耐震対策を推し進めている。河川堤防の耐震対策には、より精緻に液状化する土層断面に着目して細分した区間毎の液状化判定が必要となる。

この“技術ノート”では、河川堤防の耐震点検において優れた機動性を発揮するピエゾドライブコーンの適用事例と、汎用型として新たに開発したデータ収録装置の特徴を紹介する。

キーワード：原位置試験、液状化、サウンディング、河川堤防、耐震対策

* 応用地質(株)エンジニアリング本部

* OYO Corporation

1. まえがき

地震時の土構造物の被害を予測する上で重要となる地盤の強度に液状化強度がある。各種土木・建築構造物の設計基準・指針等では、簡易法として調査ボーリングにおける標準貫入試験結果のN値と掘進時に確認される地下水位、さらには調査ボーリングによって得られる攪乱試料を用いた室内土質試験による粒度試験結果から液状化強度を算出している。

原位置でのN値と採取した試料の粒度特性が必要となるため、調査ボーリング後に室内土質試験の結果を待たないと液状化判定が行えない。道路盛土や河川堤防のように縦断方向に延長が長く連続した構造物の液状化予測においては、地盤状況に応じて区間を細分化して、各々の区間に対して液状化判定をする必要がある為、多くの地点での調査が必要となる。このことから、液状化判定を行う場合には、調査期間が長期化すると同時に相当の調査コストを要する。

この“技術ノート”で紹介するピエゾドライブコーン（液状化ポテンシャルサウンディング: Piezo Drive Cone (以降“PDC”)）は原位置試験のみで地盤の液状化強度が評価できる新しいサウンディング調査法である。PDCをボーリング調査の補間として用いることにより、延長の長い土構造物の液状化調査の大幅な調査工期の短縮は勿論のこと、調査コストの大幅な縮減も可能である。

2. 河川堤防の耐震対策推進の経緯

河川堤防の耐震化は、平成7年兵庫県南部地震を契機として、レベル1地震動（中規模地震動）に対する耐震点検マニュアルと共に液状化対策設計施工マニュアル（案）が示され、全国の河川堤防の液状化に伴う二次被害を軽減することを目的として点検と対策が押し進められている。平成7年以降の今日までの河川堤防の耐震点検、液状化対策設計に関する経緯を時系列で図-2-1に示す。

平成7年兵庫県南部地震以降、中央防災会議等において東海地震や東南海・南海地震等のレベル2地震動（大規模地震動）に対する新たな検討結果が公表されると共に、平成13年の「土木学会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）」、平成14年の「国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本」等によって、土木構造物に対する設計地震動や耐震性能、照査方法等に対して今後の耐震設計の方向性が示された。このような背景の中、河川堤防では平成18年までは従来のレベル1地震動（中規模地震動）に対する耐震対策事業を継続してきたが、平成19年3月に、将来的に考えられる最大級の強さを持つ地震動、いわゆるレベル2地震動に対する耐震性能照査を規定した「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」（以降“指針（案）”）が策定された（平成24年2月に改定され“（案）”が

削除）。

指針（案）では、河川堤防の耐震照査には液状化を考慮し、堤防の地震後の変形を静的に解析する方法を用いて、地震後の堤防高が耐震性能の照査において考慮する外水位（以降“照査外水位”）を下回らないことを照査することとしている。

2011年東北地方太平洋沖地震（以降“3.11地震”）の発生に伴い国土交通省では“河川堤防耐震対策緊急検討委員会”を開催し、今回の地震の東北・関東地方での河川堤防の被害を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方を示した。この進め方の提示を受け全国の河川を管理する事務所ではレベル2地震動に対する耐震点検を本格的に実施し、耐震対策を押し進めている。

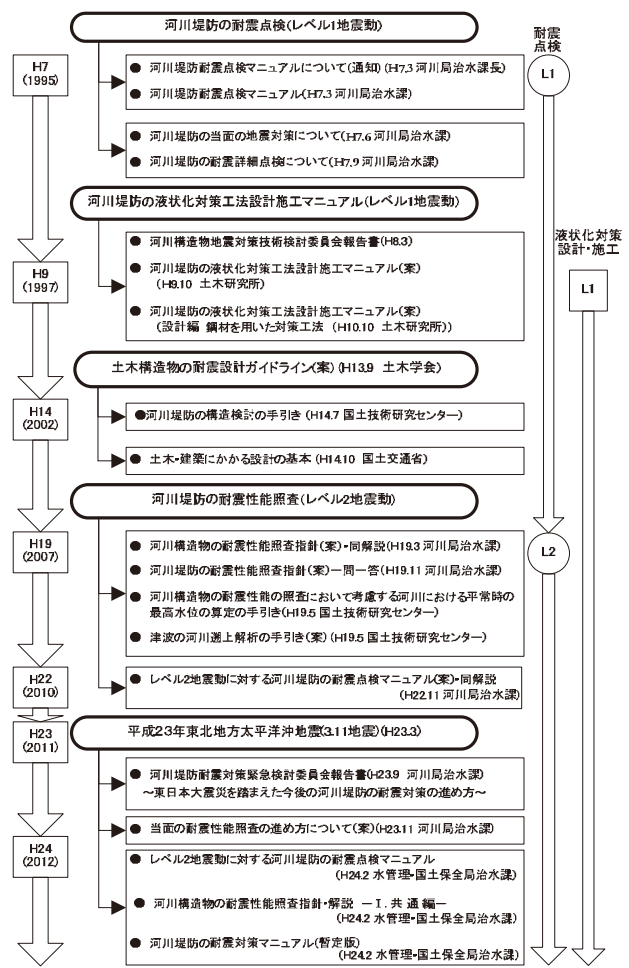


図-2-1 河川堤防の耐震点検・液状化対策工法設計施工マニュアルの経緯

Fig. 2-1 Circumstances for seismic performance evaluation and remediation against soil liquefaction on river dikes

3. 河川堤防の耐震点検を実施する上でのPDCの有効性と適用事例

3.1 二次点検での有効性と適用事例 ～適切な細分区間の設定～

指針（案）では、レベル2地震動に対する河川構造物の耐震性能が明示された。この河川堤防の耐震性能

を点検する技術マニュアルとして「レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル(案)・同解説」(以降「L2点検マニュアル(案)」)が平成22年11月に通達され(平成24年2月に改定),本格的にレベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検が始まっている。このL2点検マニュアル(案)では,河川堤防の耐震点検方法を3段階に階層化し,一次,二次,三次点検と規定している。

一次点検では耐震性能照査区間の設定として,過去の河川堤防の地震被害で堤防天端の沈下量を堤防高で正規化した堤防の沈下率の最大値75%を用いた選別であり,堤防の高さのみが照査要因となり二次点検区間が抽出される。

この一次点検に引き続き行われるのが二次点検である。二次点検では,基礎地盤の土質構成,堤防構造あるいは背後地の土地利用等を踏まえて,河川堤防の縦断(河川水)方向の想定土層断面による地盤情報から照査区間を細分化する。二次点検では河川堤防の被害程度を左右する地盤の液状化の可能性のある層厚に着目する。このとき,液状化の可能性のある層厚を迅速かつ効率的に見極めて細分化することが肝要となる。細分化にPDCを活用したS川での適用事例を次に紹介する。

S川河口部には,堤体土の直下に,礫層(T_G 層),その下位に砂層(U_{S-f} 層)が層厚25~30mで堆積している。これらの層は,液状化の可能性のある層である。また,既存調査では連続的に堤防縦断方向を把握できるほどの地盤情報がなかったが,PDCを採用した事により,短い工期内に液状化の判定を含む適切な細分化を行うことができた。

L2点検マニュアル(案)では,液状化を考慮した地震後の堤防天端の沈下変形量に着目しているため,細分区間の設定には「液状化層厚」が重要な判断基準となる。S川河口部右岸の想定土層縦断断面を図-3-1に示す。 T_G 層及びその下位に堆積する U_{S-f} 層の N 値は,右岸0.7kより下流側では平均 N 値=28,上流側では平均 N 値=42となっている。両層は土質の粒度特性から,液状化判定対象層であるため,断面A及び断面Bで液状化判定を行った。結果を図-3-2に示す。断面Aでは T_G 層及び U_{S-f} 層ともに「液状化する」と判定された。一方,断面Bは, U_{S-f} 層下部では「液状化する」と判定されるものの, T_G 層及び U_{S-f} 層上部では「液状化しない」となりA断面と異なる液状化判定結果となった。この結果より右岸0.7kより下流側の区間Aと,上流側の区間Bでは,液状化する層厚が異なるものとし両者を細分した。本適用事例では, N 値の大きい砂礫地盤を調査対象とすると同時に調査深度が堤外法尻でG.L.-25m,堤内法尻でG.L.-21mと想定されたため,打撃貫入試験装置には,従来の軽量型ラムサウンディング(以降「ミニラム」)の代わりに,オートマチックラムサウンディング(以降「SRS」)を採用した。室内土質試験で得られた F_C ($F_{C,lab}$)と,

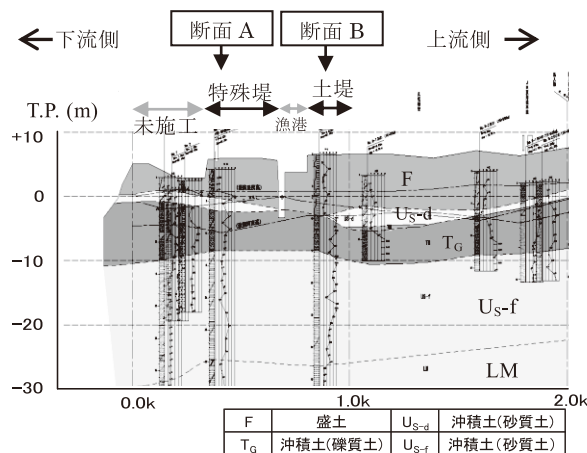


図-3-1 S川右岸河口部の想定土層縦断図

Fig. 3-1 Soil profile at the right side dike on the mouth of S river

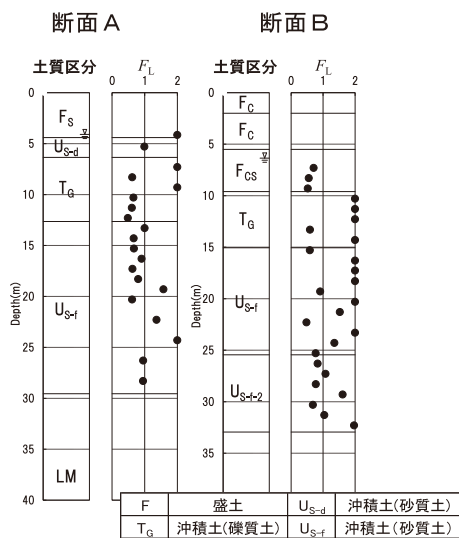


図-3-2 S川右岸河口部の液状化判定結果図

Fig. 3-2 Calculated F_L values at the right side dike on the mouth of S river

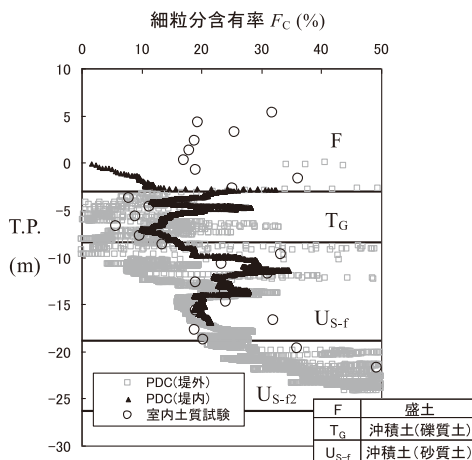


図-3-3 S川右岸河口部の細粒分含有率 F_C の標高分布

Fig. 3-3 Elevation distribution of F_C value at the right side dike on the mouth of S river

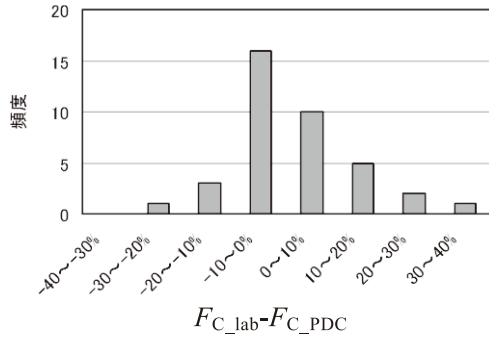


図-3-4 S川右岸河口部の $F_{C,lab}$ と $F_{C,PDC}$ の差の頻度分布図
 Fig. 3-4 Histogram of gaps between fines content on laboratory test and on PDC at the right side dyke on mouth of S river

SRSを用いたPDCで推定された F_C ($F_{C,PDC}$) の標高分布を図-3-3に、また同標高どうしの $F_{C,lab}$ と $F_{C,PDC}$ の差の頻度分布を図-3-4に示す。両図より、ミニラムでの推定式 $F_C = 18 \times (u_R / \sigma'_v)$ を用いた $F_{C,PDC}$ と $F_{C,lab}$ は概ね整合する分布を示し、両者の差が10%未満となるものが全数の68%、差が20%未満となるものが全数の89%となり、中心値も概ねゼロという結果になった。

3.2 三次点検での有効性と適用事例 ～静的変形解析の精度向上～

河川堤防の耐震点検における三次点検では、二次点検でさらに照査が必要と選定された細分区間内で1つの代表断面を設定し、堤防横断方向の堤体と堤防周辺の基礎地盤土層断面をモデル化し地震後の堤防天端の変形量を解析する。レベル2地震動に対する河川堤防に求められる耐震性能は、「河川の流水の河川外への越流を防止すること」で、「地震後の堤防天端高が照査外水位を下回らないこと」を照査する。つまり、解析で得られる地震後の堤防天端高と照査外水位との高さ比較を行い耐震対策の必要性の有無を判断する。

指針(案)で推奨される地震時変形解析は精緻な有限要素法による静的変形解析ALIDである。有限要素法では、河川堤防の横断面に対し2次元の地盤モデルを作成する必要がある。しかし、2次元の地盤モデルの作成と言いつつも、堤防横断方向に複数の調査ボーリングを実施して土層構成の詳細まで把握することは少ないのが現状である。多くは堤防横断面に対し、1箇所のボーリング調査結果を基に、堤防直下の基礎地盤では水平成層に土層構成をモデル化している。これでは、複雑で緻密な解析手法を用いても妥当な解を得ることが出来ないことは明らかである。本来、緻密な解析を実施するのであれば、地盤情報に関しても堤防横断面に対して、少なくとも堤防堤内、天端および堤外と3箇所以上で地盤調査した結果を用いることが望ましいと言える。

液状化に伴う堤体および基礎地盤の流動を解析する場合には、基礎地盤の液状化層の分布は当然のこと、

堤防横断方向の分布状況(連続性、傾斜)を把握することが重要となる。図-3-5は、A川で実施した地質調査で得られた堤防横断方向の土層断面である。(a)は1箇所のボーリング調査結果により作成した断面、(b)はPDCを追加実施して作成した断面である。PDCを実施したことにより堤内側から堤外側への土層の傾

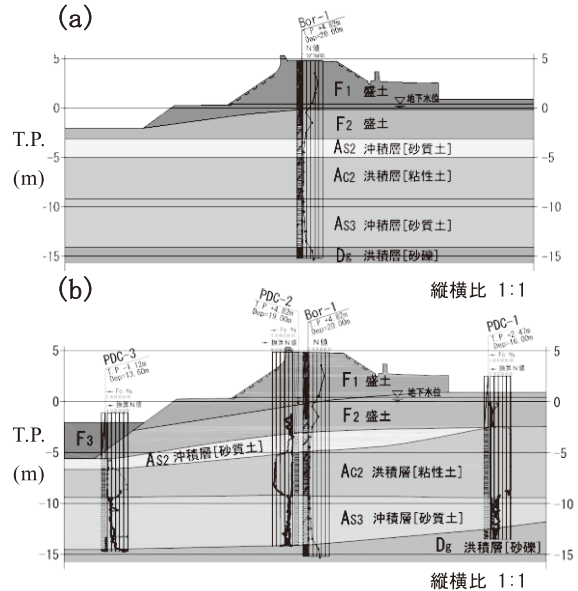
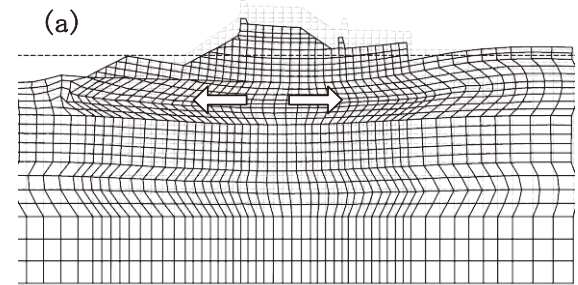
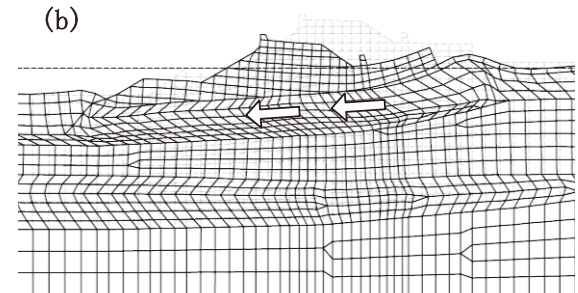


図-3-5 A川河口部右岸想定土層横断面図
 Fig. 3-5 Soil profiles at the right side dike on mouth of A river



堤防天端の変形量
 水平変位: 6cm(川表側へ) 鉛直変位: 174cm(沈下)



堤防天端の変形量
 水平変位: 367cm(川表側へ) 鉛直変位: 203cm(沈下)

図-3-6 液状化による地盤の剛性低下を考慮した静的地盤変形解析結果変形図

Fig. 3-6 Computed deformations of river dikes using ALID

斜を確認することができる。また、砂質土層（A_{S2}層）が堤内側で消失すること、さらには堤体直下には分布しない粘性土層（F₃層）が堤外側に分布することが新たに明らかとなった。

図-3-6は、図-3-5の土層断面について実施したALIDの解析結果（地震後の地盤変形図）である。堤防天端1箇所のみ調査結果(a)を用いた場合は液状化層が堤内側と堤外側の両方向に伸びるように変形している。一方、PDCを追加して土層断面の精度を上げた(b)は液状化層が堤内側から堤外側の1方向へ流動する変形となっている。変形量に関しても、水平変位と鉛直変位の何れについても(b)に比べて(a)の方が小さく危険側の解析結果となっている。本適用事例では、堤防横断方向の土層断面の精度を上げる事の重要性が確認でき、PDCの有効性が検証された。

4. 打撃貫入装置の種類と選定方法

PDCは、重錘落下による打撃貫入試験の先端コーン部で、打撃時に発生する過剰間隙水圧を計測する調査方法である。従来PDCは打撃貫入試験に、300Nの重錘を用いるミニラムを標準仕様としている。一方、標準仕様とはしていないが、635Nの重錘を用いるSRSにも装着可能なアタッチメントも準備されている。写真-4-1はミニラムへのPDC装着状況、写真-4-2にはSRSへのPDC装着状況、さらに写真-4-3

には、打撃貫入装置及び油圧装置等を搭載したクローラー仕様のミニラムへのPDC装着状況を示している。PDCは、必要打撃貫入能力の違いにより使い分けすることができる。現時点ではミニラム仕様とSRS仕様の2種類となっているが、現在並行してハンディータイプ仕様も開発が進められている。ここではこれまでの経験から、ミニラム仕様とSRS仕様の選定方法を紹介する。想定されるN値の深度方向の単純平均値を N_{mean} 値として予定調査深度を D_{max} （単位:m）としたとき、その積を N_D 値と定義する（ $N_D = N_{mean} \times D_{max}$ ）。打撃貫入装置は、 N_D 値 < 200の場合にミニラムを選定、 N_D 値 \geq 200の場合にはSRSを選定することになる。



写真-4-1 軽量型ラムサウンディング（ミニラム）の装着状況
Photo. 4-1 PDC on lightweight ram sounding (called "Mini Ram")



写真-4-2 オートマチックラムサウンディング（SRS）の装着状況
Photo. 4-2 PDC on Swedish ram sounding (called "SRS")



写真-4-3 ミニラムクローラー搭載型の装着状況
Photo. 4-3 PDC of lightweight ram sounding on crawler type base machine

5. 新しく開発した汎用型PDC装置の特徴と適用性

写真-5-1に、操作パネルを採用した汎用型PDC装置の全景を示す。これまで現場作業は、打撃貫入操作員に2人、データ収録員1人として合計3人の体制で実施していた。新しく開発した汎用型PDC装置では、手元操作盤としてタッチパネル式の操作パネル(写真-5-2)を採用することにより、データ収録員1人を削減することができるようになった。このことにより、2人体制での調査が可能となり、現場コストを30%削減することが可能となった。この操作パネルは、打撃貫入装置の脚部に固定でき、専門の技術者でなくてもデータ収録操作が容易に行えるよう計測方法の標準化を行った他、複雑な地上配線系も集約したことで取り扱いを容易にした。

汎用型PDC装置の開発上の特徴及び適用性を以下に示す。

- ① これまで研究目的に付加していたデータ収録装置の余分な機能を省き、地盤の液状化判定に目的を絞り操作を標準化した。
- ② タッチパネル方式のコンパクトな手元操作盤を設けることによりデータ収録装置の作動/停止の指示、およびデータ収録の動作確認を打撃貫入操作員でも行えるようにし、専用のデータ収

録員を削減した。

- ③ 従来はデータ収録装置の性能により内部データのシーケンシャルファイル番号の桁数が3桁に縛られ、1地点で数度メモリーカードの交換が必要であったが、桁数を4桁まで増やし、メモリーカードの交換をしなくて良い新しいデータ収録装置(写真-5-3)を開発した。
- ④ メモリーカード交換忘れによるデータの上書き損失を防止するため、データのフェイル・セーフ化を進め上書きによるデータ損失を防止する仕組みを採用した。

6. あとがき

PDCは、地盤の動的貫入強度(N_d 値)と同時に土質判別が可能である。このことにより従来、調査ボーリングを実施して採取した試料を用いた室内土質試験結果を待って算定していた液状化判定が、原位置試験のみで短時間に低コストで行えるようになった。

原位置で行うことを前提としているサウンディングは、より簡易に短時間で地盤パラメータとなる設計用

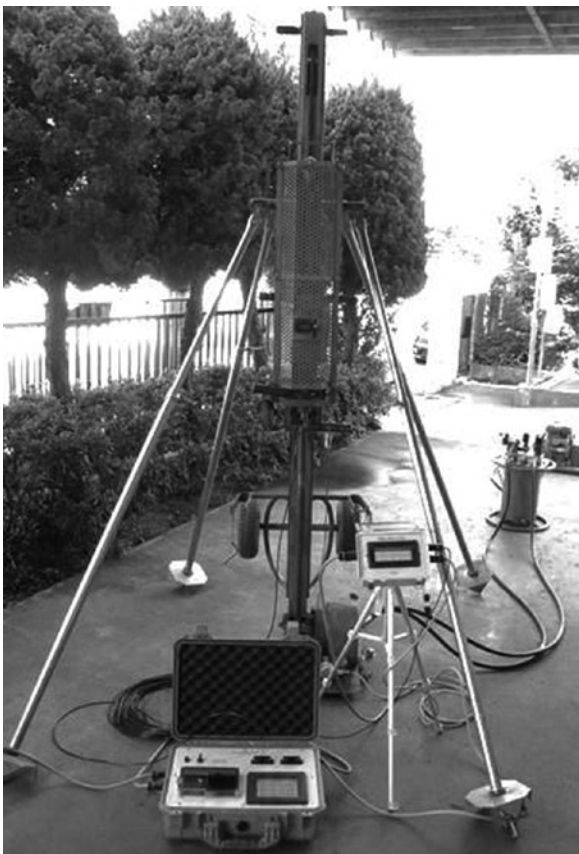


写真-5-1 汎用型PDC (ミニラム) の装着状況
Photo. 5-1 Universal type PDC on lightweight ram sounding



写真-5-2 汎用型PDCの操作パネル
Photo. 5-2 Operation panel of universal type PDC



写真-5-3 汎用型PDCのデータ収録装置
Photo. 5-3 Data logger of universal type PDC

値の測定ができることが最大の特徴である。地盤の不均質性を適切に評価するためには、空間的分解能の高い調査を行うことが重要であり、簡易で経済的なPDCをはじめとするサウンディング技術は不可欠である。この“技術ノート”では、今まさに効率良く地盤の液状化判定を行うことが求められている河川堤防の耐震点検でのPDC適用事例と現場作業の実践を通じてより機動力を増して効率的に作業を行う汎用型PDC装置の紹介を行った。

一方、3.11地震を経験し、昨今では小規模構造物である戸建住宅における液状化被害軽減も新たな技術的命題として示された。このことから、より軽量化し携帯型となる新しいPDCの開発を加速する。

今後も新しい地盤調査法PDCのより有益な活用場を模索し、より質の高い地盤情報を提供していきたい。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所(1997):河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)
- 2) 中央防災会議(2001):東海地震に関する専門調査会
- 3) 土木学会地震工学委員会(2001):土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)
- 4) 国土交通省(2002):土木・建築にかかる設計の基本
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局治水課(2007):河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局治水課(2010):レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル(案)・同解説
- 7) Sawada, S.(2004): Estimation of liquefaction potential using dynamic penetration with pore pressure transducer, *International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, 05-312.
- 8) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その1 試験方法・装置, 第39回地盤工学研究発表会, 新潟, 1927-1928.
- 9) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その2 室内土層実験, 土木学会第59回年次学術講演会, 愛知, 815-816.
- 10) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その3 原位置実験, 第49回地盤工学シンポジウム, 東京, 12-20.
- 11) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その4 土質分類, 第40回地盤工学研究発表会, 函館, 2235-2236.
- 12) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005):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, 愛知, 961-962.
- 13) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その6 液状化強度, 第50回地盤工学シンポジウム, 東京, 1-6.
- 14) 澤田俊一(2006):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その7 間隙水圧の測定位置, 第41回地盤工学研究発表会, 鹿児島, 153-154.
- 15) 澤田俊一(2006):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その8 先端荷重, 土木学会第61回年次学術講演会, 滋賀, 675-676.
- 16) 澤田俊一(2007):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その9 液状化後の沈下量, 土木学会第62回年次学術講演会, 広島, 451-452.
- 17) Sawada, S.(2007): Evaluation of strength of soils against liquefaction using piezo drive cone, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, Paper ID=1146.
- 18) 澤田俊一, 吉澤大造, 比留間誠之, 長瀬雅美, 菅野高弘, 中澤博志(2008):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その10 不同沈下評価, 第43回地盤工学研究発表会, 広島, 187-188.
- 19) 澤田俊一(2009):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その11 空間的分解能の向上, 土木学会第64回年次学術講演会, 福岡, 451-452.
- 20) Sawada, S.(2009):Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone, *17th International Conference on Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 1064-1067.
- 21) 澤田俊一, 菅野高弘, 中澤博志, 竹村淳一(2010):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その12 滑走路下の液状化対策評価事例, 土木学会第65回年次学術講演会, 札幌, 327-328.
- 22) 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之(2011):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その13 地盤情報の相似性, 第46回地盤工学研究発表会, 神戸, 107-108.
- 23) 澤田俊一(2011):間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その14 新しい地下水位設定法, 土木学会第66回年次学術講演会, 愛媛, 717-718.
- 24) 澤田俊一(2011):ピエゾドライブコーン(液状化ポテンシャルサウンディング)性能設計に向けた原位置試験, 応用地質技術年報 No. 30, 75-80.