

10. 多段載荷累積変位法による地盤診断法の開発と適用事例

— スーパーFWD (SFWD) —

清水建設(株) 土木技術本部基盤技術部
同 上

川崎 廣貴
○ 長澤 正明

1. はじめに

建設分野においては、巨大地震に対する耐震性や豪雨などの自然災害に強いという安全・安心な道路や堤防などの土木インフラ造りが求められている。これには、より強く、高耐久性という構造物の性能品質を直接的に施工管理することが重要である。さらに、施工における高い性能品質の確保はもちろんのこと、土木構造物の維持更新時代を迎え、過去に遡った際にはトレーサビリティによる施工履歴や性能品質が簡便に可視化表示でき、後からの設計検証を容易にして更新コストを合理化できる技術が求められる。

一方、道路や堤防などの盛土施工の締固め管理は、従来から一般的に乾燥密度や空気間隙率による施工管理で行われている。しかし、これらの管理手法は、盛土材料単体毎の相対値管理であるため、粘性土・砂質土・礫質土などで盛土材料の変形強度特性に起因する性能品質としての絶対値管理が不可能であり、施工時に土構造物の沈下やすべり安定性に関する性能が直接的に把握できないものである。巨大地震に対する耐震性や豪雨などの自然災害に強いという性能を直接的に施工管理できれば土構造物の設計・施工での合理性がより高められる。このためには、施工時に土構造物全体の変形強度特性という性能品質をより高い精度で明示できる技術が重要と考える。加えて、現場での土構造物の性能特性に関する動態挙動や実態状況を捉えながら、性能施工管理法との対応を検証する研究開発が同時に必要と考えられる。

こうしたニーズに応えるため、筆者らは、舗装診断用のFWD計測機における簡便な計測原理に着目し、独自に自動化や多段載荷累積変位法などの考案を行い、高精度に地盤変形強度特性が得られる「スーパーFWD (SFWD)」を新たに開発し、これを建

設工事に適用している。

SFWDは、最先端の精密ICT技術を結集して誕生したものであり、現存技術の中で平板載荷試験のK値ともっとも等価な地盤挙動を得ることができるものであり、土構造物の変形強度特性という性能評価を建設現場で迅速・簡便・高精度で精緻に行い、適正な性能品質の検証を行うことができる。これにより、施設構造に直接影響する変形強度特性という地盤品質の良否を瞬時に判定し、早期の施工フィードバックと地盤剛性や地耐力などの可視化表示ができるため、造成地盤の品質保証がより明確化できると考える。

ここでは、初めに、盛土の沈下性状と締固め度との相関性を明らかにし、施工時の性能評価技術を用いた施工管理法のさらなる発展性について展望する。次に、地盤の性能評価技術の全般を概説し、SFWDの概要と適用事例について報告する。

2. 締固め特性と圧縮沈下ひずみ

表-1に示す礫質土を対象とし、締固め度 D_c をパラメータにして、大型一次元圧縮沈下試験を実施した。なお、試料の粒度調整は、最大粒径 $D_{max}=53\text{mm}$ のせん頭粒度で実施した。試験条件は、供試体寸法 $\phi 300 \times H354\text{mm}$ 、荷重段階は $\sigma_z = 40, 80, 160, 320, 640, 1280\text{kN/m}^2$ の6段階で不飽和条件とし、

表-1 盛土材料の材料特性と締固め特性

項 目		値
土粒子の密度 G_s		2.697 g/cm ³
自然含水比 w_n		9.6 %
粒 度	石 分	4.2 %
	礫 分	57.6 %
	砂 分	24.1 %
	細粒分	14.1 %
	最大粒径	200 mm
	50%粒径 D_{50}	4.8 mm
	均等係数 U_c	317
室 内	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.968 g/cm ³
	最適含水比 w_{opt}	12.0 %

注) 室内締固め試験：モールド $\phi 300$ 、B法

最終段階 $\sigma_z = 1280 \text{ kN/m}^2$ において水浸させて飽和条件とした。

締固め度 D_c と荷重段階 $\sigma_z = 320, 640, 1280 \text{ kN/m}^2$ の圧縮沈下ひずみ ε_c の関係を図-1 に示す。同図より、圧縮沈下ひずみ ε_c は、締固め度依存性が強く、 $D_c = 90\%$ 以下では急激に圧縮沈下ひずみ ε_c が大きくなる傾向を示す。また、試験荷重が大きくなるにしたがって、圧縮沈下ひずみ ε_c も大きくなる傾向を示すことから、沈下量を規定した場合の盛土施工では、より高い締固め度が要求されることになる。試験結果の不飽和と飽和の比較では、飽和条件の圧縮沈下ひずみ ε_c が不飽和の2倍程度となるため、盛土の水浸には十分な注意が必要であることが明らかである。さらに、盛土の転圧締固めにおいて、締固め度 D_c を95%以上にできれば、当該盛土材料では沈下が極めて発生しにくくなることが読み取れる。

礫質土の沈下挙動調査では、礫質土の粒径が大きいことから、大型供試体を用いた室内試験とする必要があるが、試験は、大きな手間と期間や費用が掛かるものである。盛土施工時に盛土の地盤剛性を迅速に精度良く評価できるSFWDなどの性能評価技術を用いた性能施工管理法が適用できれば、将来的には動態観測の沈下と地盤剛性の関係から、目標沈下量に対して施工仕様などのグレードを制御できる新しい情報化施工が可能になるものと考ええる。土構造物の変形強度特性の施工時管理を通じて、最終性能品質を保証することができる、新しい革新的な施工管理法の創造という観点から、今後の研究開発と実用化が望まれる。

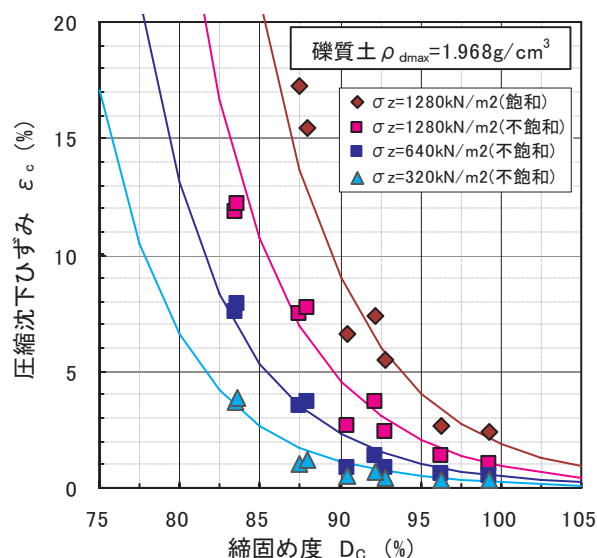


図-1 締固め度 D_c と圧縮沈下ひずみ

3. 地盤の性能評価技術

地盤の性能特性の一つである地盤剛性を採り上げ、これを評価できる技術を整理し、地盤性能評価技術としてその一覧を表-2 に示す。当該技術は、変位を直接的に評価して剛性を求める方法（平板載荷試験・現場CBR試験・FWD・小型FWD・SFWD）と、加速度指標値の換算から間接的に剛性を評価する方法（簡易支持力測定器・ローラ加速度法）に分類できる。なお、載荷板を用いた地盤性能評価法の適用範囲は、調査深度が載荷板径の2倍程度で、調査地盤の最大粒径は載荷板径の1/3以下である。

平板載荷試験は、もっとも一般的な試験法であるが、本試験では大きな反力装置が必要であり、しかも1点当りの計測に数時間を要するため、手間と時間が掛かるという問題がある。一方、加速度指標値を用いる間接法は、簡便ではあるが適用地盤範囲と精度的な面に難点がある。例えば、ローラ加速度法は、転圧中の振動打撃毎の沈下やローラ傾斜により、振動輪接地面積が同一にならないという計測境界条件のばらつきの問題があるため、地盤剛性の大きな目安値を調査する場合に適用されている。

FWDや小型FWDの地盤剛性評価法から求まる K_{FWD} は、平板載荷試験の単調載荷時の荷重変位挙動から求まる K 値とは、本質的に異なったものになっている。これについては次章で詳述する。

SFWDは、FWDのハード的な原理を利用したものであるが、新しく考案した多段載荷累積変位法を用いる点で、FWDの地盤剛性評価法と根本的に異なっている。多段載荷累積変位法とは、漸増荷重の連続多段載荷を実施して同時に累積的に増加する変位

表-2 地盤の性能評価技術一覧

項目		計測項目	変位精度	載荷板径 (mm)	予備載荷履歴	K値算定法	K値との相関性
直接法	剛性評価法	平板載荷試験	変位荷重	高	φ300 ~ φ750	なし	—
	現場CBR	変位荷重	高	φ50	なし	換算	礫質土で低
	FWD	変位荷重	高	φ300 ~ φ450	あり	繰返しを利用	中
	小型FWD	加速度荷重	低	φ100 ~ φ300	あり	繰返しを利用	やや低
	SFWD	変位荷重	高	φ300 ~ φ450	なし	平板試験と等価	高
間接法	簡易支持力測定器	加速度	—	φ50	あり	換算	極低
	ローラ加速度法	加速度	—	ローラ幅	なし	換算	低

ら地盤剛性を定義するものである。これにより、地盤の変形性能をより適正に評価可能となり、平板載荷試験の単調載荷の結果から求まる K 値と等価なものが得られやすいという特長がある。さらに、計測可能な最大変位は 30mm に設定しており、変位計測レンジが大きく、地盤の変形特性をより広い範囲で取得できるものとなっている。

4. SFWDの概要

4.1 SFWDの地盤剛性評価法

SFWD は、図-2 に示すように載荷機能と荷重および地盤の変位量を計測する機能を一体化した載荷・計測装置、GPS 受信機、それら装置をコントロールし計測結果を解析して地盤剛性を評価する制御・解析パソコンにて構成している。荷重は、重錘質量 200kg を使用し、それを地盤面に落下させて、最大 90kN の衝撃荷重を作用できる。地盤剛性は、多段載荷累積変位法によって求め、これを面的分布表示して土構造物の変形性能を解析・評価する。SFWD の特長は、地盤剛性を迅速・簡便・高精度で適正に評価できるオンサイト型全自動計測システムになっていることであり、これにより、地盤剛性の計測作業を大幅に合理化でき、効率

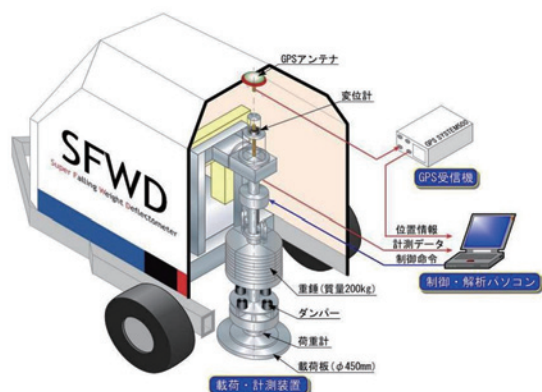


図-2 SFWDの計測装置概念

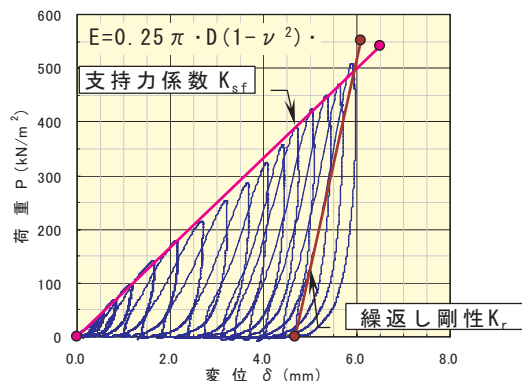


図-3 多段載荷累積変位法 の概念

的な施工と性能品質の簡便な確保を実現で

きる。図-3 には、多段載荷累積変位法の概念を示す。同図において各荷重段階のピーク点を結ぶ勾配を支持力係数 K_{sf} 、各荷重段階の起点からピーク点を結ぶ勾配を繰返し剛性 K_r と定義する。なお、SFWD 変形係数 E_{sf} は、地盤の平板載荷条件による支持力係数 K 値との関係式(1)から算定している。

$$E_{sf} = 0.25\pi(1-\nu^2)D \times K_{sf} \cdots \cdots (1)$$

ここに、 ν : ポアソン比

D : 載荷板径 (φ 450mm)

同図の K_{sf} は、平板載荷試験の単調載荷の結果から求まる K 値と極めて相関性が高く、 K 値とほぼ等価なものが得られ、地盤の変形性能評価の指標として優れたものとなっている。

4.2 SFWDと平板載荷試験、FWDの計測法比較

SFWD 計測、平板載荷試験、FWD 計測における地盤剛性評価法を図-4～図-6 に示す。

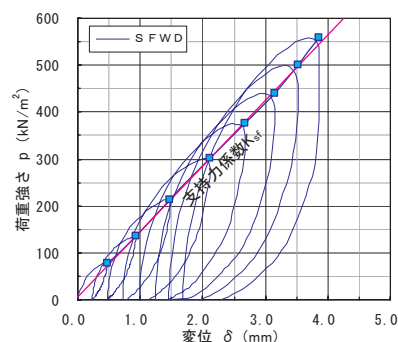


図-4 SFWD

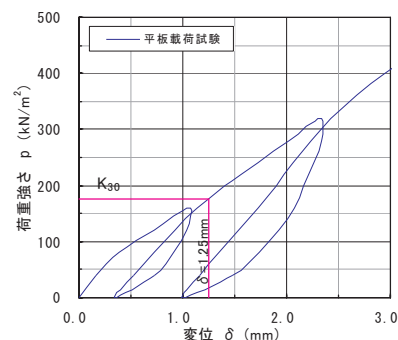


図-5 平板載荷試験

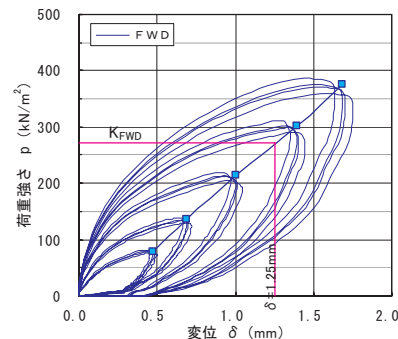


図-6 FWD

図-4 の SFWD は、多段載荷累積変位法に

よるピーク点勾配を支持力係数 K_{sf} と定義している。図-5 の平板载荷試験の支持力係数 K_{30} は、変位 $\delta=1.25\text{mm}$ の荷重点における勾配で定義される。この平板载荷試験では、荷重の途中段階で繰返し载荷を与えているが、この挙動と SFWD の多段载荷累積変位法による挙動とは極めて類似した形状を示す。図-6 に示す従来の FWD や小型 FWD では、変位を累積評価するという機能を設けておらず、各荷重段階の単载荷で 5 回計測して平均し、落下高さを徐々に高くして、これを結ぶ線上の変位 $\delta=1.25\text{mm}$ の荷重点における勾配を K_{FWD} と定義している。この剛性は、図-3 に示す SFWD の繰返し剛性 K_r に相当するものである。したがって、支持力係数 K_{sf} と繰返し剛性 K_r に相関性があれば、本手法においても十分に地盤の変形特性を捉えることができると考えられる。

図-7 には、砂質土と礫質土における種々の盛土材料での剛性比 $\beta = K_r / K_{sf} = E_r / E_{sf}$ と SFWD 変形係数 E_{sf} を整理した結果を示す。同図の β はばらつきが大きく、FWD の繰返し剛性を使用して平板载荷試験の K_{30} と統一的に相関性を取ることは限界があるものと考えられる。なお、剛性比 $\beta = 1.0$ は鋼材やコンクリートなどの線形弾性材料となる場合を表し、この場合には K_{sf} と K_r のどちらを用いても剛性評価に差異が生じないものになる。

5. 平板载荷試験との関係

図-8 には、SFWD と平板载荷試験との载荷挙動を示す。両者は極めて類似した曲線を描くことが明らかである。

図-9 には、平板载荷試験と SFWD との相関度合いを示す。相関係数 r は $r=0.956$ であり、両者には極めて高い相関性があることが明らかである。

図-10 には、SFWD による計測結果を平板载荷試験の変形係数に換算し、造成地盤の面的な変形係数を評価したものである。このように造成地盤の剛性が可視化表示でき、地盤の性能品質が容易に把握できるため、盛土地盤の性能評価として締固め管理技術のさらなる発展が期待できる状況となっている。

6. 現場 CBR 試験との関係

建設現場の礫質土路床などにおいて現場 CBR 試験を行い、SFWD との相関を調査すると、CBR 試験の载荷ロッド径 $\phi 50\text{mm}$ の影響で現場 CBR 値にばらつきが生じて両者

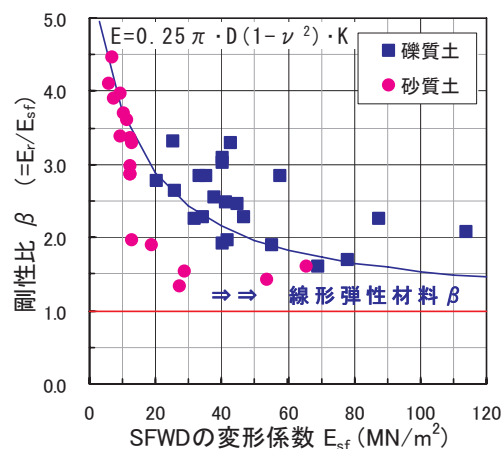


図-7 SFWD 変形係数と剛性比 β

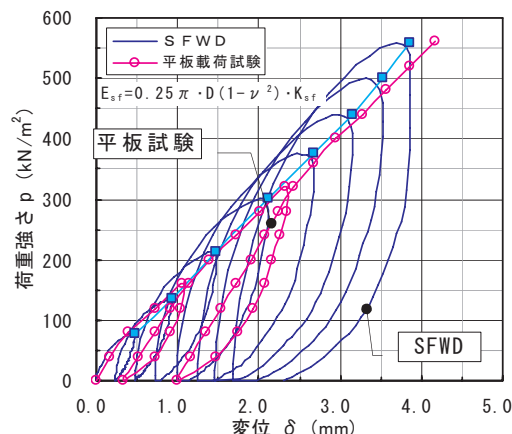


図-8 SFWD と平板試験の载荷挙動

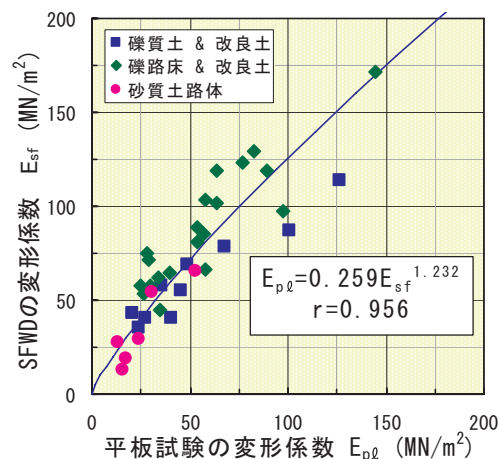


図-9 平板と SFWD の変形係数の関係

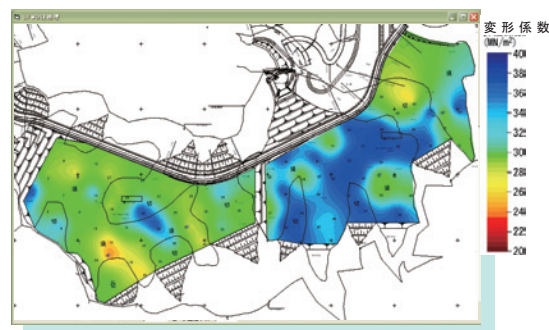


図-10 面的地盤剛性の評価

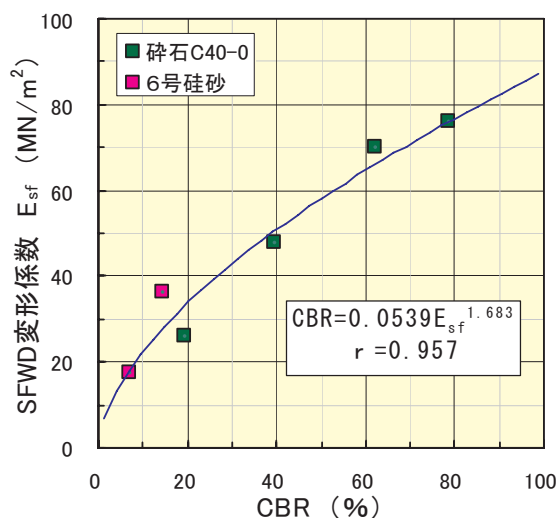


図-11 CBRとSFWD変形係数 E_{sf} の関係

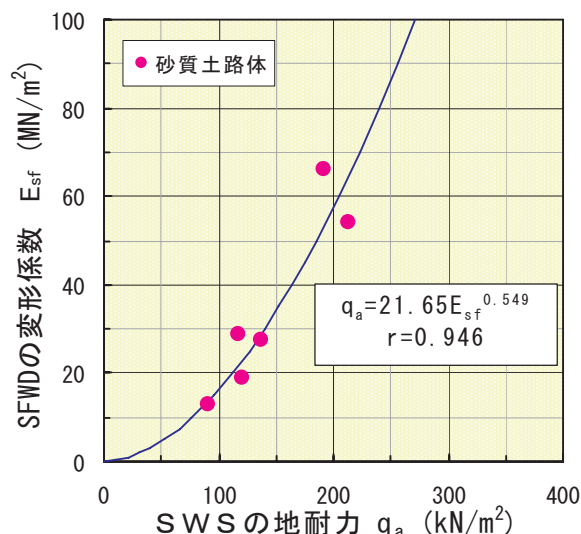


図-12 SFWDとSWS地耐力の関係

の相関性が低くなる。このため、室内の大型土槽を用いた実験により材料の影響によるCBR値のばらつきを小さくしてSFWDと比較することとし、碎石と珪砂を用いて締固めた状態の地盤条件で、現場CBR試験とSFWDの計測を行った。なお、CBR値の広いデータ幅で相関傾向を把握するため、締固めエネルギーは $0.5E_c \sim 4.5E_c$ で調整した。図-11には、現場CBR試験のCBR値とSFWDの変形係数 E_{sf} との相関度合いを示す。同図より、CBR値とSFWDの変形係数は累乗近似状態で表すことができ、その相関係数 r は $r=0.957$ であり、両者には極めて高い相関性があることが明らかとなった。

したがって、SFWDの変形係数を用いて精度良くCBRを推定することができるものとする。

7. SWS地耐力との関係

産業団地造成工事における造成仕上げ盤において、SFWD計測とスウェーデン式サウンディング試験（SWS試験）を実施し、両者の結果を比較した。この工事でのSFWD計測は載荷板 300mm で実施している。計測対象とした造成地盤は、まさ土材料による盛土仕上げ盤と、まさ土地山の切土仕上げ盤の2種類である。SWS地耐力 q_a は、SWS試験の結果を基に国交省告示第1113号の式 $q_a = 30 + 0.6N_{sw}$ を用いて深度別に平均地耐力 q_a を求めたものである。

図-12は、SFWD変形係数 E_{sf} とSWS地耐力 q_a の相関度合いを示している。同図のSWS地耐力は、深度 $z=0.75\text{m}$ までのものであり、載荷板径の $2.5D$ まではSWS地耐力との相関性が良いという結果が得られてい

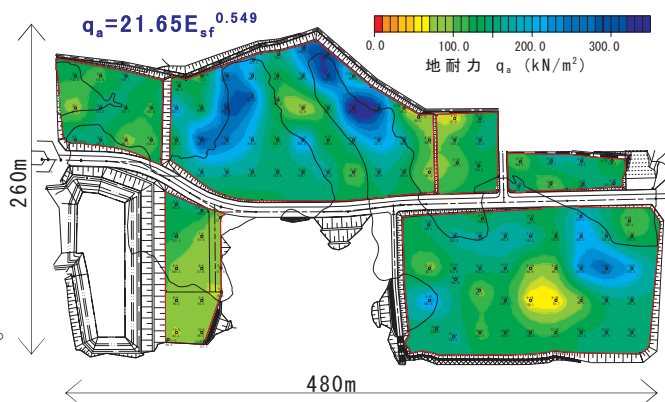


図-13 面的地耐力の評価例

る。同図中に示す $q_a = 21.65 E_{sf}^{0.549}$ の相関式により、SFWDを用いて精度良く地耐力を評価することができるものとする。

図-13は、SFWDによる計測結果をSWS地耐力 q_a 値に換算し、造成地盤の面的な地耐力を評価したものである。これにより、SFWDが広範囲の施工領域の地盤剛性と地耐力を高精度に評価する手法として、効果的であることが明らかとなった。

8. おわりに

近年、土工という分野では、ICT技術の活用により、施工情報のリアルタイム化とコンカレント化が進展しており、施工の高度化と効率化、および施工管理の確実性が可能になっている。

一方、土木インフラ整備の基本を考えた場合、より長期的な視点を持ったメンテナンスを見据えたICT化の実現も同時に求められている。すなわち、施工段階に把握した造成地盤の変形強度特性や支持力特性と

いう性能情報を，ICT でデジタル化して可視化し，それを供用後の管理・維持・更新に提供できるようにする。これにより，道路の舗装や設備などの更新時期との関係が把握できるようになり，維持管理・更新計画を立てやすくなる。また，耐震性向上がより高いレベルで必要となった場合，新たな詳細地盤調査の必要性がないなど，過去の施工時の性能情報に基づいた効率的な対応ができる可能性がある。こうした観点から，設計・施工から維持管理までを網羅した土工の ICT 化を目指すことが重要であると考ええる。

筆者らが開発した SFWD は，計測時間が約 5～10 分/点程度であり，平板載荷試験や現場 CBR 試験の計測で数時間を費やしているのに比べて著しく短い。この点で言えば，地盤剛性の調査には時間とコストが掛かるという，既成概念に変革をもたらすのに十分なものと考ええる。

本システムは，造成地盤の要求性能に対して確実な施工を工事管理面で保証でき，デジタル化で可視化された施工情報を供用後の管理・維持・更新に役立てることができるものを目指している。さらに，SFWD の最新の研究成果では，図-14 に示すように，地盤支持力の降伏限界が求められるようになっており，将来的に地盤や舗装の新しい診断技術としても活用できる発展可能性を有している。

今後とも，さらに SFWD にて現場データなどを蓄積し，建設技術と ICT 技術をマッチングさせた情報化施工の発展に貢献したいと考える。

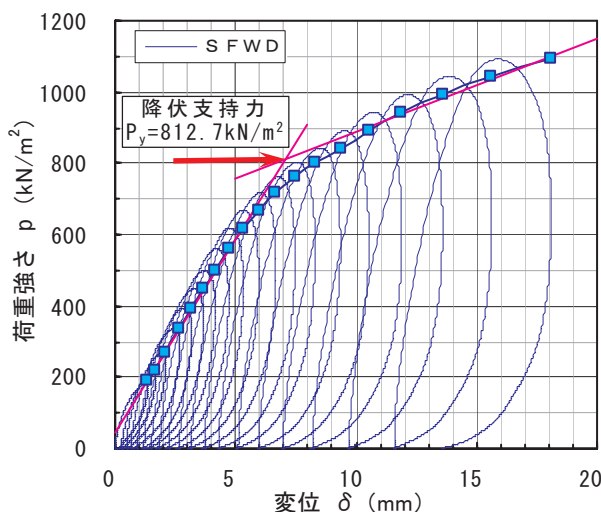


図-14 SFWD による降伏支持力

参考文献

- 1) 阿部，横田，川崎，久保：礫質土を用いた試験盛土の現場密度とその試験法評価，土木学会第 57 回講演概要集，2002 年 9 月
- 2) 横田，阿部，瓦川，川崎：高盛土に用いた礫質土の大型一次元圧縮沈下試験，土木学会第 57 回講演概要集，2002 年 9 月
- 3) 阿部，姫野，森下，川崎：礫質土を用いた高盛土の圧縮沈下挙動，土木学会第 57 回講演概要集，2002 年 9 月
- 4) 土木学会：FWD および小型 FWD 運用の手引き，舗装工学ライブラリ 2，2002 年 12 月
- 5) 川崎，長澤：全自動地盤剛性評価システム (SFWD) の計測法と適用事例，基礎工，2006 年 8 月号，vol.34，No.8
- 6) 川崎，長澤：IT 土工による造成地盤の性能評価，建設の施工企画，2008 年 11 月号
- 7) 川崎，長澤：高盛土の沈下挙動と地盤の性能評価技術，基礎工，2009 年 7 月号，vol.37，No.7
- 8) 川崎，皿海，龍岡，平川：地盤剛性全自動評価システムにおける地盤剛性計測法，土木学会第 59 回講演概要集，2004 年 9 月
- 9) 皿海，川崎，龍岡，平川：地盤剛性全自動評価システムの室内試験による精度評価，土木学会第 59 回講演概要集，2004 年 9 月
- 10) 川崎，皿海，長澤，龍岡：地盤剛性全自動評価システム (SFWD) による礫質盛土の地盤剛性評価，第 41 回地盤工学研究発表会講演集，2006 年 7 月
- 11) 川崎，土屋，長澤，龍岡：地盤剛性全自動評価システム (SFWD) による改良土地盤の地盤剛性評価，第 41 回地盤工学研究発表会講演集，2006 年 7 月
- 12) 堀田，長澤，川崎，龍岡：全自動地盤剛性評価システム (SFWD) による空港造成地盤の剛性評価，土木学会第 62 回講演概要集，2007 年 9 月
- 13) 川崎，長澤，龍岡，平川：全自動地盤剛性評価システム (SFWD) と現場 CBR 試験との相関性，土木学会第 62 回講演概要集，2007 年 9 月
- 14) 杉本，長澤，川崎，村松：全自動地盤剛性評価システム (SFWD) による空港造成泥岩地盤の剛性評価，第 43 回地盤工学研究発表会講演集，2008 年 7 月
- 15) 岩村，川崎，長澤，杉本，田崎：全自動地盤剛性評価システム (SFWD) による産業団地造成地盤の剛性と地耐力評価，第 43 回地盤工学研究発表会講演集，2008 年 7 月