鋸歯状型貫入波形を利用した堤体盛土の可視化

EMBANKMENT DIAGNOSIS USING SPECTRUM ANALYSIS OF SH TYPE PENETRATION TEST

杉井俊夫¹・寺西剣悟²・森瑞樹³・金森峻太⁴・橋田将典⁵ Toshio SUGII, Kengo TERANISHI, Mizuki MORI, Shunta KANAMORI and Masanori HASHIDA

¹正会員 博士(工学) 中部大学教授 工学部都市建設工学科(〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)
²非会員 (株)葵エンジニアリング 技術1部(〒453-0018 愛知県名古屋市中村区佐古前町22-6)
³非会員 春日井市役所 建設部道路課(〒486-8686 愛知県春日井市鳥居松町5-44)
⁴非会員 トーニチコンサルタント㈱ 中部支社(〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄4-6-15)
⁵非会員 名工建設㈱(〒450-6113 名古屋市中村区名駅1丁目1番4号 JRセントラルタワーズ)

As the soil structure of levee body is often unknown, it is considered as a kind of soil. The boring investigation and the surface wave exploration are used, but they are too expensive to perform at high density. In order to investigate thin surface layer for slope failure, SH type penetration test is used. SH type penetration test can obtain fine penetrated depth until "mm". In the clay, its wave form between penetrated depth and Nd-value has longer period than sand and gravel. By using spectral analysis for this characteristic, it was possible to distinguish the soil type and visualize the soil composition in the levee body.

Key Words : soil structure, spectrum analysis, SH type penetration test, diagnosis

1. はじめに

堤防盛土内の土質構造は調査がされずに盛土という一 つの土質の括りでしか明らかにされていないことが多い. しかし、新堤以外の堤体は様々な築堤履歴から構成断面 には異なる土質をいくつか含んでいることが、開削現場 において発見されることが少なくない.また、延長の長 い河川堤防においては、主に200mピッチのボーリング データをもとに代表断面で評価されている現状にある. その間を補間する調査として表面波探査等の物理探査を 使用することがあるが、コストがかかるなどの課題があ り、近年ではサウンディング試験で地盤の硬軟を貫入抵 抗で判断し、ボーリング間を補間しようと使用されてい る. SH 型貫入試験は土研式簡易動的貫入試験と構造は 同じであるが、0.1mmまでの貫入量を求めることが可能 である.軽量という特徴から、表層すべり層厚の調査に 用いられることが多かった. 本試験法の特徴として持ち 運びだけでなく、1打撃ごとの貫入量をmm単位でロガー により記録できるため、データの整理も容易である.

本研究では、堤体盛土の構造・物性を評価することに

SH型貫入試験を導入し、そこで得られる鋸歯状型の貫入 波形のスペクトル解析という新たな視点から簡易な調査 法を提案するものである.

2. SH型貫入試験の概要

SH型貫入試験¹は動的サウンディング試験の1つで, 簡 易動的コーン貫入試験と長谷川式土壌貫入計の特徴を活 かした試験である.3kg及び5kgの重錘を50cmの高さから 落下させ,1打撃毎の先端の貫入コーンの貫入量をデー タロガーで測定する(図-1).これから10cm貫入させるた めの打撃回数に換算した貫入抵抗値N_d'/drop値(式(1)) とN_d/drop値(式(2))を求め地盤の硬軟を判断する.

$$N'_{d}/drop$$
値 = $\frac{100}{3 kg ハンマー1 打撃における貫入量 (mm)}$ (1)

$$N_d/drop \square = \frac{100}{5 kg / v - 1 打撃における貫入量} (mm) (2)$$

$$N_d/drop/\acute{ll} = 0.50 \times N_d'/drop \acute{ll} \tag{3}$$

SH型貫入試験の特徴として、1)3kgの重錘で試験を行

論文



図-1 SH型貫入試験機⁾



図-2 SH型貫入試験の結果

うことができるため軟弱な地盤に対しての分解能が高い ことが挙げられる.一定貫入量以下で,貫入回数条件に なった際には、5kgに重錘を取り換える.2)他のサウン ディング試験として標準貫入試験や簡易動的コーン貫入 試験等があるが、ある長さを貫入させるために必要な回 数を求めるものである.一方、SH型貫入試験では1打撃 毎の貫入抵抗値を求めるためデータ量が多く解析の幅が 広がる.3)櫓や広い調査スペースを必要とせず持ち運び も容易なため、短時間で調査ができ、1日に複数箇所で のデータが取得可能なためデータの比較が容易である.

SH型貫入試験により、図-2の鋸歯状の貫入抵抗を得



ることができる.本研究では貫入抵抗の鋸歯状の結果を 抵抗波形とみなす.赤線の波形は,細かな波形のブレを 示す深さ,あまりブレがない深さが認められる.軟らか い地層は貫入量が大きく,硬い地層は貫入量が小さく小 刻みで貫入していくために波形のブレが大きくなると考 えた.そこで波形の特徴から土質等の特定化ができない か検討するため,高速フーリエ変換によるスペクトル解 析を行うこととした.

3. 高速フーリエ変換による土質の特定化

(1)変動係数を用いた地層の区別

波形解析を行うには、層ごとに分ける必要がある.そこで、著者らは図-3に示すようにNd/drop値の地表面からの変動係数の変化に着目した²⁾.標準偏差/平均値である変動係数は同一層であるならば標準偏差が小さくなっていくため、変動係数は減少する一方、層が変化すると標準偏差が増加するため変動係数が減少から増加に転じる.このように深さによって増加後に減少し、また増加し始める前の地点までが同じ層であると考えられる.



表−1 試験ケース

	試験ケース	試料	含水比	D ₁₀ (mm)	D50 (mm)			
乾燥	Case D4	珪砂4号	0%	0.67	0.90			
試料	Case D6	珪砂 6 号	0%	0.14	0.23			
	Case D8	珪砂 8 号	0%	0.05	0.09			
	Case W4-	1 珪砂4号	5%	水分 5%で締固め				
	Case W4-	2 珪砂4号	13%	浸透 24 時間後				
湿潤	Case W6-	1 珪砂6号	5%	水分 5%で締固め				
試料	Case W6-	2 珪砂6号	9%	浸透 24 時間後				
	Case W8-	1 珪砂 8 号	5%	水分 5%で締固め				
	Case W8	2 珪砂 8 号	8%	浸透:	浸透 24 時間後			

図-4には、庄内川右岸堤防24.4km裏のり肩部のSH型 貫入試験結果の波形を示す.なお、この地点では、1~ 2m程度離れた地点で国土交通省により既存のボーリン グ調査が行われており、土質分類を合わせて示した.こ れにより、おおよそ I ~Vの層境界が判別できる.砂礫 と細砂の境界であるI、シルト混り細砂と中砂の境界III は一致している.IIは柱状図と厚さが違うが細砂とシル ト混り細砂の境界と推定される.IV線も厚さが違うが礫 混じり中砂シルト混り中砂の境界ではないかと推定され る.いずれも堤体内の地層構成であるため1~2m程度離 れても変化することや、同じ砂でも〇〇混りになると変 動係数の増減が微小になることが考えられることから、 概ね判別できているものと判断できる.

(2)粒径の大きさ・含水比による波形の違い

粒径の大きさや含水比の違いによる貫入波形の違いを 調べるために、室内実験で確認した.試験試料として、 図-5の三河珪砂4,6,8 号を使い、図-6に示すようなポリプ ロピレン製の土槽に試料を突砂法および振動法により締 固め、乾燥状態2 回、湿潤状態で水分一定と上から浸透 させた試料についてSH 貫入試験を実施した.

高速フーリエ変換には2のべき乗個のデータ数が必要 であること、データの間隔が等間隔である必要がある. SH型貫入試験から得られる波形データは後者の条件を 満たしておらず、等間隔に改める必要がある.そこで、 3次スプライン補間を用いて関数を求め、等分割して データを等間隔に改めた.3次スプライン補間により、 点と点の間の各小区間を3次の多項式で連続して計算し、 近似することで等間隔のデータを取得することにした.

乾燥状態は、同一供試体でSH 貫入試験を2 度行う.







湿潤状態の水分一定は砂に対し5%の水を含ませた砂の 供試体を作り試験を行う.その後,上から浸透の湿潤状 態での試験はマリオットタンクに水を入れ水分一定の供 試体に一日浸水させた供試体に対して試験を行う.表-1 に示す3種類の珪砂について9ケースの試験を実施した. また,乾燥状態と湿潤状態(水分一定5%および上部か ら,浸潤後24時間放置)でSH貫入試験を行った.

珪砂4号の結果の波数とスペクトルを表したものが図-7である.この波数は、抵抗波形の波長の逆数で長さの 逆数の単位を有す.図-7より、同じ粒径試料においてユ ニークな関係があることがわかり、水分量が変化しても 同じ砂であれば卓越する波長の逆数も同じである結果を 得た.また、図-8は乾燥した4号、6号、8号の試料を比 較したもので、粒径が大きくなると波長の逆数が大きく、 スペクトル値は小さくなる傾向が現れた.これは粒径が 大きくなると、貫入時の抵抗が大きく波長が短く、粒径 の凹凸などに敏感に反応し、粒径が小さくなると波長が







図-11 24.4kmで採取された試料の粒度分布

長く,あまり凹凸の影響を受けない傾向を表していると 推察される.

図-7の結果から、スペクトル値の違いはあるものの、 卓越する波数(波長の逆数)は含水比にはあまり影響を 受けないことが分かった.また図-8より、粒径が小さい ほど、長い波長が卓越することがいえ、低波数(長い波 長)から累積したスペクトルを整理したのが図-9である. 累積することで立ち上がりが急勾配となることで、その 長い波長が卓越することを判別しやすくしている.工学 的意味としては、細粒分が多いと貫入抵抗が小さい分、 貫入量が長く(波長が長くなり),粗粒分が増えると貫 入抵抗が大きい分、貫入量が短く(波長が短く)なると いう初期の仮説を検証した結果となった.ここでは示さ ないが、埋立て値で同様に行った波形データの分析結果 と同一でサンプリングした粒度分布から、細粒分が多い ほど同じ結果を得ている³.

(3) 実堤防の土質とスペクトル解析

図-10に示す庄内川右岸堤防24.4km裏のり肩部のSH型 貫入試験を実施した.ここでは、近接地点での既存ボー リングと土質試験結果が存在し、その既存の4点の試料 採取深度を先の図-4に示している.その粒度分布を図-11 に示す.いずれも砂であるが、200-250cmの3P-2での砂 が最も細かく、3-P1(深度150cm)、3-S3、3-P4と続く.

図-12,図-13に、それぞれの層ごとに行ったスペクト ル解析の結果を示す. 粒径の細かいものほど波長が長い 値が卓越しており、粒径が大きなものほど右側、波長が 短い傾向を示していることがわかる.この結果は、室内 試験で行った図-8および図-9の結果とも一致する.図-



図-14 3つの測線

11の粒度分布では、3-S3と3-P4はほぼ同じ粒径であるが、 図-12では若干の違いが認められる.この理由として、 図-2の波形結果で推定層境界が異なるように土質分類と 貫入試験場所の土質が異なっていた、あるいは前述に示 したように礫混じりが影響しており、貫入抵抗が大きく、 短波長域が増加しているものではないかと考察する.

4. 鋸歯型貫入波形を用いた堤防の可視化

(1)対象断面

対象地形は図-14に示すような庄内川右岸堤防25kmポ スト上流25mまでの区間での調査と24.4km既存ボーリン グ存在地付近で実施した.本場所を対象とした理由は, 治水地形分類図によれば旧河道があり,自然堤防周辺の 境界にあたり,現在は宅地化が進んでおり宅地と旧河道

表─2 調査地点坐傷

	ale de la la	座標			田本山	- EN	座標						座標		
尚宜 1		Х	Y	Z	調宜地点No.		Х	Y	Z		詞宜地	凨NO.	Х	Y	Z
A-5	9	-8.58815	3.653565	14.89363	A-15	9	-10.6065	13.47303	14.66831	[A-25	9	-14.1788	22.2432	14.57021
A-5	7	-6.01925	4.131977	15.88103	A-15	7	-8.01918	13.96537	15.6461	[A-25	7	-10.8249	23.22741	15.91297
A-5	2.7	-2.36448	4.943648	17.5132	A-15	2.7	-4.24355	14.80171	17.41927	[A-25	5	-8.93989	23.92319	16.10743
A-5	天端	-0.07947	5.391414	18.72823	A-15	天端	-1.87699	15.20458	18.70637	[A-25	2.7	-6.2218	24.76747	17.39254
B-5	天端	5.459327	6.616482	18.72072	B-15	天端	2.993109	16.25269	18.7693	[A-25	天端	-3.48101	25.06847	18.78269
B-5	3.2	8.456988	7.17099	17.46694	B-15	3.2	6.226372	16.61144	16.96937	[B-25	天端	1.053393	26.02269	18.81027
B-5	6.5	11.29502	8.113391	16.09578	B-15	6	8.690367	16.92981	16.06914	[B-25	3.2	4.663485	26.21747	16.94001
B-5	8.4	14.08867	8.67447	16.00449	B-15	9.6	12.26986	17.3338	15.96196	[B-25	6.8	7.203365	26.53567	16.09638
B-5	11.3	15.83457	9.185646	15.45161	B-15	11.4	13.9596	17.74657	15.46703	[B-25	9.8	10.76092	27.02002	15.98799
B-5	17	21.47229	10.18878	14.9581	B-15	16.8	19.29409	18.60769	14.99969	[B-25	11	11.93055	27.16781	15.62328
	A:裏(のり側	B:裏のり側								B-25	15	19.01689	26.95122	15.14666



図-15 3つの断面におけるSH型貫入試験結果

との境界が不明瞭であることから、堤体の構造も複雑で あると考えた.図-14に示すように、距離標25kmから上 流側に+5m、15m、25mに測線をとり、SH型貫入試験を 実施する地点を設定した.なお、SH型貫入試験を実施 したポイントとその地点名を表-2に示しておく.

(2) SH型貫入試験結果のスペクトル解析

図-15に3つの断面で行ったSH型貫入試験の波形を示 す.Nd/drop値が50以上のところ、深度5m以上について はSH型貫入試験では計測できない. これらの結果をみ ると天端近くや堤体基礎地盤に近いのり面ではやや硬く なるが途中ののり面では比較的軟らかい傾向がみられた. また、上流25km+25mになる方が自然堤防に近く、良く 締まっていることも推察される.次に、鋸歯状型波形を 前節と同様に、層を区分してスペクトル解析により、波 数(波長の逆数)と累積スペクトルの関係を求め、初期 の勾配から分類し、図-16~図-19の4つの層群に分類し た. 今回は、紙面都合上、裏のり面の結果の分類を示す. A層群(図-16)は24.4km地点の3-P2の初期のスペクトル 波形が類似していることから「シルト混じり細砂」と判 断される. 波長の逆数0.1(mm⁻¹)以上でばらつきがみられ ることから、粗砂や礫の混入が含まれることも考えられ た. 同様に, B層群(図-17)は24.4km地点の3-P1に類似 していることから「細砂」に、D層群(図-19)は24.4km地





図-20 積算深度と変動係数の残差

点の3-S3, 3-P4に類似していることから, 「中砂」と判断される. C層群(図-18)は, 24.4km地点でサンプリングされた土質と異なる累積スペクトルを示しており特定できないが, 勾配が最も急であることから長い波長域が強いので細砂よりも細かいシルトまたは粘土層であろうことが推察できる.

(3) 堤体の可視化

先の図-3に示したように地層境界の判別を行うために Nd/drop値の変動係数に着目してきたが、ここでは断面 における境界を可視化する.図-15に示した複数の貫入 試験のデータを用い、3(1)で述べた変動係数を算出し、

(変動係数) - (変動係数の移動平均) = (残差) とし て残差のコンター図を図-20に示した.この時に残差が0 以下の箇所はそのままの値を使用し、0以上の箇所を 1000として置き換えることで層境界をより濃い青で強調 させることとした.図-21には、24.4kmの堤体横断図, 図-22~図-24には、SH型貫入波形の変動係数を用いた層 の境界を濃い青色で示したコンター図を示した.推定断 面は24.4kmと同じ地点ではないが天端下に粘性土が両者 とも確認でき砂質土,礫質土なども確認でき、断面をう まく推定できているものと考える.さらなる土質実験結 果と貫入抵抗試験によるデータの蓄積,および開削を予 定している断面などの検証が望まれる.

5. おわりに

SH型貫入試験を室内で検証を行うとともに, 庄内川 堤防での調査を実施, ボーリングデータ, 土質データが ある場所との比較検証から以下の知見を得ることで新た な堤防調査技術としての有効性を示した.

- (1) SH型貫入試験のNd/drop値の深さ方向の変動係数が 減少から増減に変化する点が地層境界となることが 検証された.
- (2) 土槽に粒径の異なる珪砂試料を充填したSH型貫入 試験の結果から、貫入波形のスペクトルに与える水 分の影響は小さく、粒径の大きさの方が大きい。



図-24 変動係数を用いた層境界(25km+25m)

- (3) ことが得られ、粒径による土質の違いを評価するこ とが可能である.
- (4) 礫混じり砂、シルト混り砂、砂いずれもフーリエス ペクトルの分布に違いがみられ、粒径が細かくなる ほど波長が長い領域が強く、粒径が大きくなると逆 になる特徴が得られた。
- (5) 波長が短い領域のノイズを除去する累積フーリエス ペクトルの初期勾配は土質が類似していると等しく なることが明らかとなった.
- (6)本調査法は、容易に実施できることや、0.1mm単位の貫入を計測できる特徴もあることから解析結果の分解能も高く、現行のボーリング間の補完にも有効であり、堤防盛土の3次元構造を可視化できる.

参考文献

- 表土層調査技術研究会: SH 型貫入試験技術・調査基準同解 説, 2016.
- 2) 杉井俊夫・余川弘至・浅野憲雄・杉本雄奎・酒井駿:貫入抵 抗値の波形解析による地盤調査の試み,第 51 回地盤工学研 究発表会, No.93, pp.185-186, 2016.
- 3) 地盤工学会中部支部南海トラフ巨大地震中部地域地盤災害研究委員会:南海トラフ巨大地震中部地域地盤災害研究委員会 研究成果報告書, pp.36-39, 2017.

(2020.4.2受付)