

内部浸食を対象とした Kenney らの粒度安定指標への間隙率の導入 Kenney-lau stable parameter of filter considering the porosity for internal erosion

杉井俊夫¹, 余川弘至², 小竹亮太², 安達 良³

- 1 中部大学・工学部都市建設工学科・nanto@isc.chubu.ac.jp
- 2 中部大学・工学部都市建設工学科
- 3 ピーエス三菱(株)

概 要

堤体基礎のパイピングによる浸透破壊のような内部浸食を伴う現象においては Terzaghi の限界動水勾配ではより小さな値で破壊する現象をこれまで説明することができなかった。Kenney & Lau は、粒状体フィルター材中の粒子が安定か不安定になるのかを粒度分布から評価する H/F 指標を実験的に求めてきた。しかし、本指標は粒度情報だけの指標であり、締固めによる密度については考慮されたものではなかった。その為、実務では不安定と評価される現場が多く、密度の考慮が不可欠と考えられる。著者等は、粒度分布から Kenney & Lau の指標について様々な観点から検討してきたところ、水分特性曲線から得られる水分法による間隙径分布と関係していることを突き止めた。この関係から、締固めによる間隙率の違いを粒度安定指標に取り入れることが可能となり、現場での適用が可能となるものと期待できる。

キーワード：内部浸食，粒度分布，間隙径分布

1. はじめに

堤体基礎の浸透水による内部浸食において地盤材料である粒度特性が大きく影響することは、多くの研究者等が検討を行っている。中でも 1985 年の発表された Kenney-Lau¹⁾の内部安定指標の H-F Shape Curve は多くの研究者が取り上げている。これは土の主構造から有効応力を受けにくい細かい粒子が流出するという考えに立ったものである。Kenney ら²⁾は、当初、Loebotsjikov の研究から内部安定、不安定の判定境界を $H/F=1.3$ としていたが、様々な実験データや他の研究者とのディスカッションから、1985 年に $H/F=1$ に変更、全ての安定データの包絡線から $H/F=0.9$ とも表されてきた。Kenney-Lau の内部安定指標の H-F Shape Curve の考え方には、粒度分布のみで判断するものであり、間隙情報を含まずに判定されるものであった。本研究は、間隙径分布の情報を取り入れることで Kenney らの実験データを整理し直し、間隙情報を含めて評価する方法を検討したものである。

2. Kenney-Lau の H-F Shape Curve

Kenney ら³⁾は、8 種類の孔を開けた板を用いての浸透及び振動試験より、粒状材料が形成する間隙の「くびれ径」を求め、ある粒径が形成する最小のくびれ径から内部安定指標を提案している。

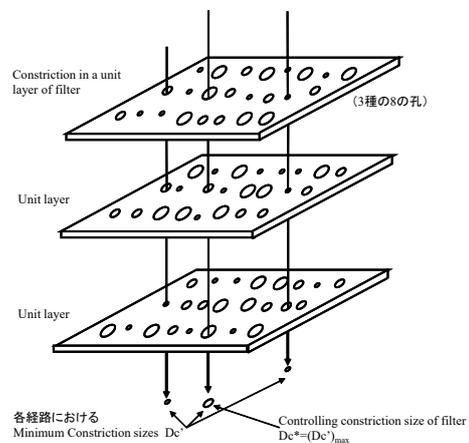


図 1 Controlling Constriction Size の定義

図 1 に示すようにフィルター層を通過してくる粒子径を「間隙くびれ径」(Constriction size of filter) : Dc' とし、その最大の間隙くびれ径を「Controlling Constriction Size」: Dc^* と定義するとともに、浸透長さ L が Dc^* の 200 倍を超えると、 Dc^* は最小粒径の約 0.25 倍に等しくなることを得た。この Dc^* を用いることにより、図 2(a) に示すような粒度のフィルター材が内部浸食を起こさないためには、対象となる粒径 D の 4 倍粒径 $4D$ の粒子質量含有率 (H) が、粒径 D の質量通過百分率 (F) 以上存在する必要があることを示した。すなわち、「 $H/F \geq 1$ 」のときは安定、「 $H/F < 1$ 」のときは不安定、とフィルターの内部安

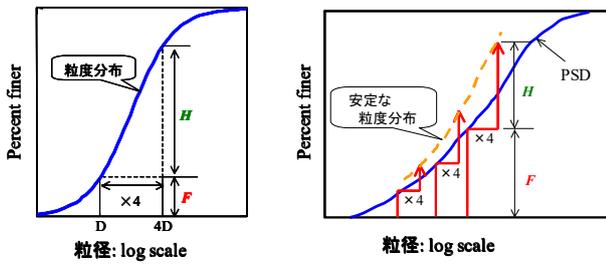


図 2(a) H と F の定義

図 2(b) 粒度分布と HF

定性を判断する指標を提案した。すべてのフィルターの粒子が安定であるには図 2(b)のようにある勾配以上の粒度分布であることが必要となる。なお、 $H+F \leq 1$ であるため、 F は最大 50% までを検討すればよい。

3. 浸食による内部安定・不安定判定の境界

Kenney-Lau¹⁾は、浸食による内部安定・不安定判定の境界を $H/F=1.3$ と提案した。しかし、Sherard and Dunnigan の実験データ、Milligan らの Fullers Curve のディスカッションを経て、新しいデータに基づきその閾値を $H/F=1$ と変更した。この経緯をまとめたのが、Rönqvist⁴⁾がまとめている (図 3)。Kenney-Lau の H/F に影響を与えるとされる間隙率の情報が入っておらず、著者らは新たに間隙情報を含めて評価することの検討を行うこととした。

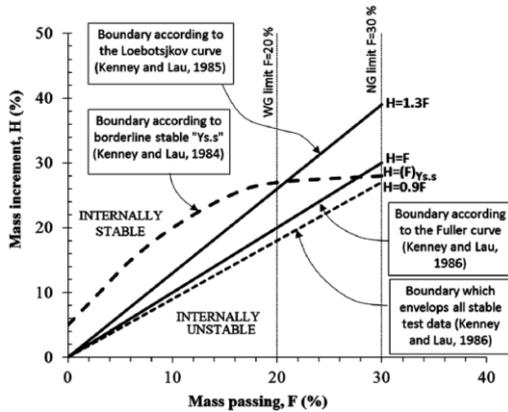


図 3 H=F の区別境界の変遷⁴⁾

4. 粒度分布と間隙径分布

神谷⁵⁾は、間隙径分布を求める ASTM で標準化された水銀圧入法や水分特性曲線法とともに空気圧入法の提案を行い、粒度分布と間隙径分布の関係を様々の観点から調べている。その中で、質量基準の粒度分布と水分特性曲線を用いた方法 (以後: 水分法) による間隙径分布は形状が類似していることを示している。Harverkamp⁶⁾によれば水分法の関係径 d_m と質量粒度の粒径 D の間には次式の関係が成立するとされている。

$$d_m = \beta_r D \quad (1)$$

ここに、 β_r は、資料の状態により決まる定数である。神谷⁵⁾は均等係数 $U_c=1.3\sim 3.4$ までの砂試料について排水

過程の水分特性曲線 van Genuchten 式のサクシオン項に毛管上昇高の関係式を用いて β_r を求めている。

$$V_r = \frac{1}{\left[1 + \left(\alpha \frac{4\sigma}{\rho_w g \beta_r D} \right)^{n^*} \right]^{\frac{1}{n^*}}} \cdot 10^2 \quad (2)$$

ここに、 V_r は累積間隙体積、 α 、 n^* は van Genuchten モデルのフィッティングパラメータ、 ρ_w は水の密度 (g/cm^3)、 g は重力加速度 (cm/s^2)、 σ は水の表面張力 (水温 15°C のとき 73.48 dyn/cm) である。こうして求められた値が図 5⁵⁾ である。この結果から間隙比

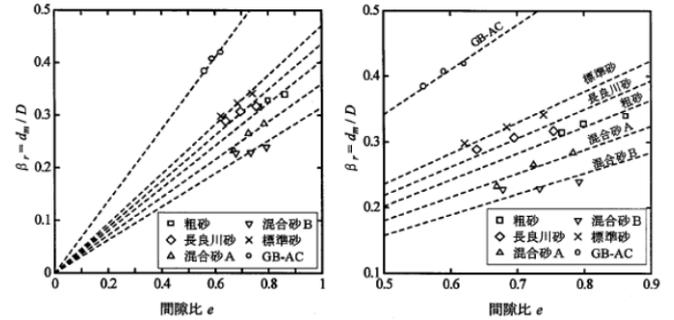


図 4(a) 間隙比と β_r 値⁵⁾

図 4(b) 間隙比と β_r 値拡大図⁵⁾

や均等係数により変化するが、式(1)の β_r 値が 0.2 から 0.4 の値にあることがわかる。また、Harverkamp も間隙径が粒径の 2~4 割の大きさであることと一致している。このことから、間隙径分布は、粒度分布の 2~4 割の間にあり、粒子の形状が異なる砂であれば β_r は 2 から 3 割強にあることかがわかる。また、Kenney&Lau¹⁾が示した次式

$$D^* \leq 0.25 D_5 \quad (3)$$

ここに、 D^* は Controlling Constriction Size (最大のくびれ径)、 D_5 は 5% 粒径である。 D^* は最小粒径が形成する最大くびれ径を示しており、 $\beta_r=0.25$ とした形と非常に近い値を示している。図 5 は粒度分布と間隙径分布例である。

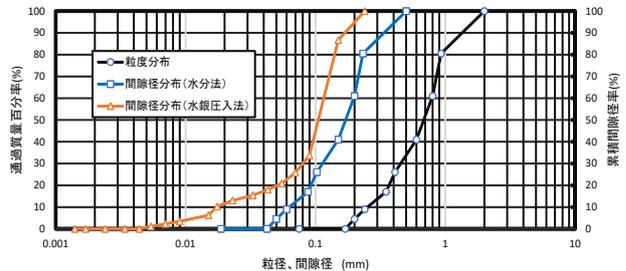


図 5 粒度分布と間隙径分布

5. 間隙径分布を利用した内部安定性評価

5.1 解析に用いたデータ

今回は、Kenney&Lau¹⁾が実施した実験データを論文か

らトレースして解析を行った。Kenneyらは、直径245mmと580mmの透水管に試料450mmと860mmの高さの試料をセットして、粒子レイノルズ数 $Re=qD_s/(nv)>9$ (q :単位流速, D_s :5%粒径, n :間隙率, ν :水の動粘性係数)となるような流速を30時間以上負荷して粒度変化を調べ、内部安定、不安定を判断している。図6(a)と図6(b)はKenneyらの実験で使用された試料であり、内部安定と不安定に判定されたものである。また、表1にはそれらの試料の諸元を示した。なお、緩い移動可能な粒子は細かい粒径が対象となることから、Kenneyらは初期の構造でWG(wide grading)とNG(narrow grading)で区別しており、前者は含有率 $F=20\%$ 、後者は含有率 $F=30\%$ までの条件を満たすことを述べている。

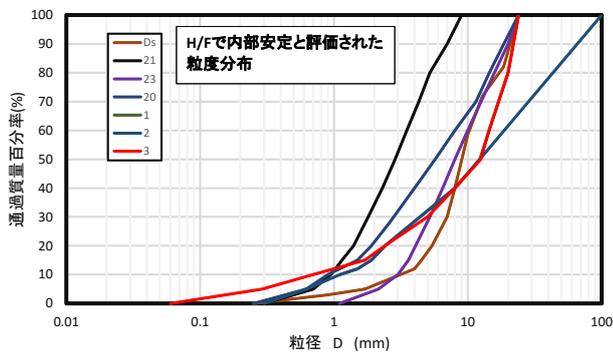


図6(a) Kenney-Lau¹⁾の実験における地盤材料(安定)

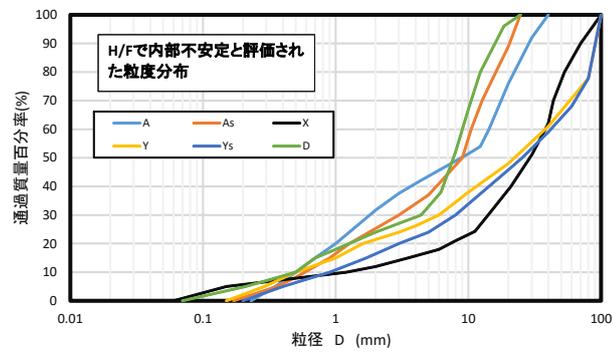


図6(b) Kenney-Lau¹⁾の実験における地盤材料(不安定)

表1 Kenney&Lauの実験地盤材料¹⁾の諸量

材料	実験結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙率 (%)	最大流速 (cm/s)	粒子レイノルズ数 Re	初期の構造
A	不安定	1.93	28.0	1.67	29	WG
As		1.98	26.0	1.03	25	NG
X		2.06	24.0	—	—	NG
Y		2.10	22.0	0.68	14	WG
Ys		1.94	28.0	1.22	56	WG
Ds	安定	1.90	29.0	1.30	76	NG
21		1.69	37.0	0.60	11	NG
23		1.87	31.0	1.28	91	NG
20		1.89	30.0	0.64	13	NG
1		2.18	19.0	0.48	16	NG
2		2.10	22.0	0.37	10	WG
3		2.07	23.0	0.71	9	NG

5.2 間隙径分布の算出方法

前節4.で示したように、水分法による間隙径分布は粒径分布のほぼ0.25(4分の1)であることから、H/Fの考え方に、間隙率を含めた間隙径分布の導入を考えることとした。 βr は神谷が示すように間隙率(比)の関数であるとする間隙率の変化(締め固め度)によって変化するパラメータと考えられる。しかし、今回、Kenney等の実験データを解析して行うため、 βr を正確に求めることができないため、一律 $\beta r=0.25$ として計算することとした。粒度分布は土粒子の密度を使えば体積基準で示した累積粒径体積分布は質量基準と一致し、間隙率 n を用いて $(1-n)$ 倍、累積間隙体積分布は間隙率 n を乗じて両者を比較することとした。図7~図9にAsを例として示す。

まず、式(1)を使って累積間隙体積をもとめ、図7を作製す

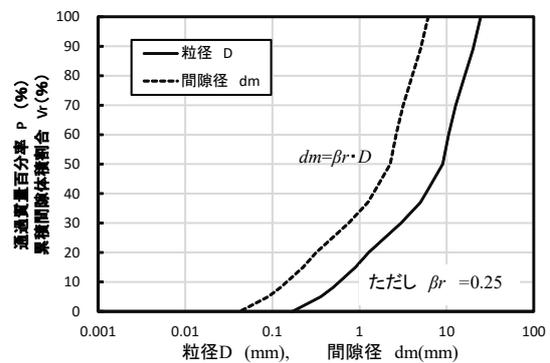


図7 粒度分布と間隙径分布 (As)

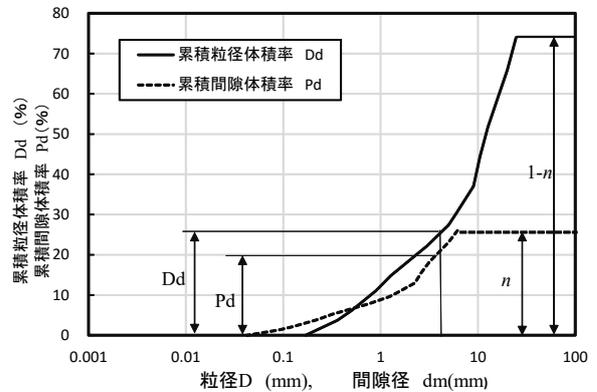


図8 累積粒径体積率と累積間隙体積率 (As)

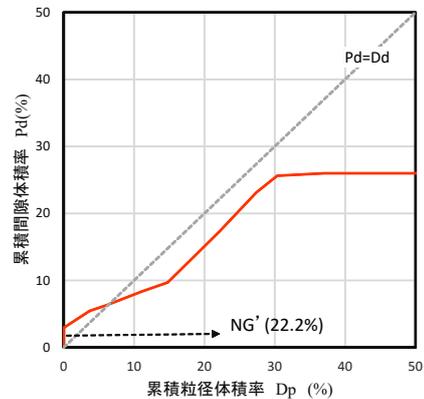


図9 累積粒径体積率と累積間隙体積率の判定 (As)

る。次に、土粒子密度一定として体積基準の粒度分布を算出し、初期の間隙率 n を使って間隙径の分布（累積間隙体積率 Pd ）と体積で表した粒度分布（累積粒径体積率 Dd ）を求めて図 8 を作製する。 Pd と Dd の大きさを図 9 のように示す。この結果から、 $Pd < Dd$ となる場合には不安定になることが判定できないか検討を行った。NG' は NG の時 30% までであるが、間隙率 $1-n$ を乗じて算出している。

図 10 には、Kenney らの方法で評価された HF-Shape Curve を示し、図 11 に今回提案する間隙率を考慮した評価結果を示す。図 11 より、累積間隙体積率が累積粒径体積率よりも多い場合に、粒子が粒径に相当する間隙内に捕捉され安定になるものと判断される。しかし、今回 3 つの試料については、提案する方法で安定、不安定を評価することができなかった。それらの 3 つの試料の結果を図 12 に示す。

今回、図 11 に示す地盤材料 1, 2, 3 の 3 つは他の試料と異なり、Kenney らは内部的に安定材料と判断したが、本提案法では、いずれも $Pd < Dd$ と不安定材料と評価され

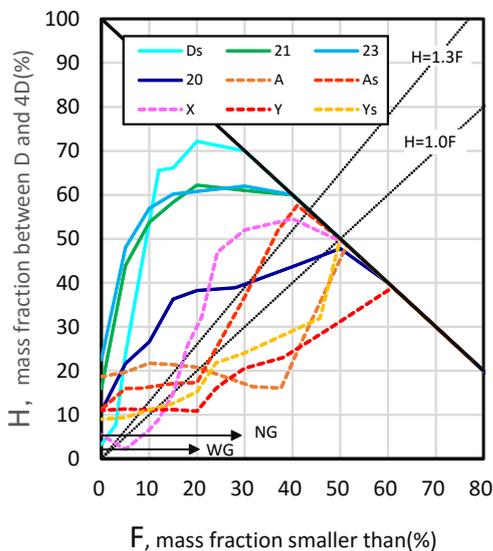


図 10 Kenney-Lau の HF-Shape Curve による判定

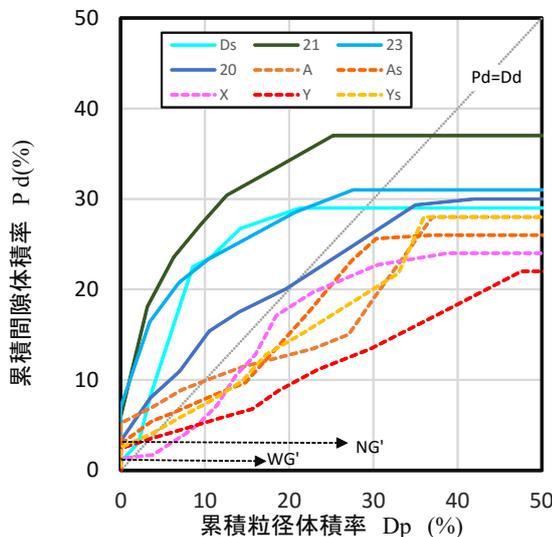


図 11 著者らによる間隙率を考慮した安定・不安定評価

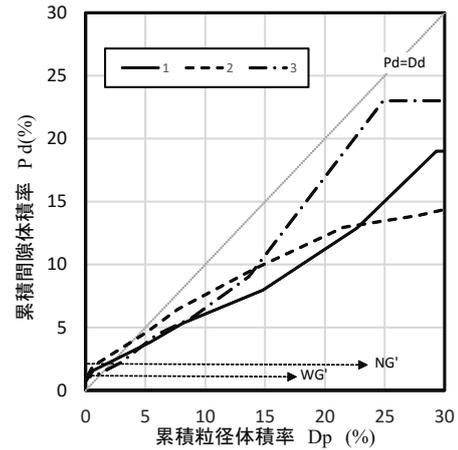


図 11 Kenney の実験と異なり不安定と評価されたケース

た。この原因として、表 1 の 1, 2, 3 の地盤材料の粒度範囲が他の地盤材料よりも広く、乾燥密度も高い。また、今回は間隙率（比）に影響を受ける βr 値を 0.25 と一定として解析を行ったことなどが考えられる。今後、 βr の推定方法を検討していく必要がある。

6. おわりに

今回、Kenney&Lau の提案する HF-Shape Curve の考え方に、間隙率の情報を導入することを考え間隙径分布を取り入れる方法の解析を行い得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 粒度分布と類似した形状を持つ水分法による間隙径分布を算出する間隙径 $dm = \beta r \times$ 粒径 D のパラメータ βr が 0.2~0.3 程度で Kenney の示すくびれ径算出の 4 分の 1 とほぼ同じ値であることがわかった。
- (2) 今回は βr を 0.25 としたが、間隙率 n を使い間隙径と粒径の体積基準の分布図から Pd (累積間隙体積率) / Dd (累積粒径体積率) = 1 を基準として 1 以上であれば安定であることが得られた。
- (3) 粒径範囲が広く、乾燥密度が高い材料については βr の評価が異なるものと推察され、今後、 βr の評価を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) Kenney, T.C. and Lau, D. : Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, 1985, pp.215-225.
- 2) Kenney, T.C. and Lau, D. : Internal Stability of Granular Filters: Reply. Canadian Geotechnical Journal, 23, 1986, pp.420-423
- 3) Kenney, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omange, G.N. and Ume, C.A. : Controlling Constriction Sizes of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, 1985, pp.32-43.
- 4) H. Rönnqvist, P. Viklander. : On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils, Geomaterials, 4, 2014, pp.129-140.
- 5) 神谷浩二 : 砂質土の間隙径分布の評価とその利用, 岐阜大学学位論文, 1999, 107p.
- 6) Haverkamp R, Parlange J.Y. : Predicting the water-retention curve from a particle-size distribution I. Sandy soils without organic matter, Soil Science, 142, 1986, pp.325-339.