土の締め固め施工管理に関する一考案

岐阜大学　工学部　学生員○村田和志　若尾健貴
岐阜大学　工学部　正員　本城勇介
大成ロテック　山田邦博

1. 研究の目的

本研究では、土の締め固め施工管理において重要なのは、締固め密度等地盤の物理量が個々の点で規格値を満足することではなく、ある体積についての平均値、すなわち移動平均値が、工学的に意味のある規格値を満足することが重要であるという観点に立ち、移動平均確率場により、土工事の施工管理目標の設定方法について考察する。

2. 理論

2.1 確率場を記述する統計量

地盤の特性値は同一地層内では連続的に変化すると考えられる。　自己相関関数を考えるとき、地盤工学への応用で重要な点は、nugget effect の影響である。nugget effect とは、確率場が比較的長い自己相関距離を持つ成分と、ホワイトノイズのような極めて短周期の成分を併せ持つときに現れる自己相関関数の原点における不連続性のことをいう。このような相関構造は、N 値などのデータでよく見られる。

2.2 移動平均過程の閾値横断期待個数

N値などの地盤特性を表す指標で、応用上重要なのは、ある一点における地盤特性の値ではなく、ある長さ、面積や体積についての平均値であると考えるほうが合理的である。このような平均値の作る確率場を移動平均確率場(Moving average random field)と言う。

移動平均は一次元の場合、座標 x をその平均を取る長さの中心位置とすると、次の様に定義される。

$$ZD(x)=\frac{1}{D}\int_{D}Z(u)du \qquad (9)$$

Vanmarcke(1983)は、このような移動平均の分散の値を次の様に近似的に計算することを提案した。

$$\sigma_{ZD}^{2}=\sigma_{Z}^{2}\cdot\Gamma_{Z}^{2}(D) \qquad (11)$$

ただし、ここに$\Gamma_{Z_1}^{2}(D)$は、分散関数(Variance Function)と呼ばれ、移動平均の平均領域の大きさDの増加に伴い、分散の減少の度合いを表す関数であり、次の様になる。

$$\Gamma_{Z}^{2}(D)=1 \qquad D\leq\delta_{Z}\text{ のとき} \qquad (13)$$

$$=\sigma_{Z}/\mathrm{V} \qquad D\geq\delta_{Z}\text{ のとき}$$

ここに、δ_zは、確率場Zに関する変動のスケール(Scale of flactuation)と呼ばれる値で、自己相関距離より容易に求まる。ちなみに、ガウス型の場合$\delta_z=\sqrt{\pi}\cdot a$である。紙面の関係上詳しい説明は省略するが、Vanmarcke(1983)は、このような移動平均場 $Z_D(x)$の閾値横断期待個数$\nu_{b,D}^{+}$を、求めている。

3 施工管理目標の設定方法

3.1 予備的考察

施工管理の目的は、「建設あるいは改良の対象となっているある体積を持つ地盤が、耐用期間中の予測される外乱に対して、その要求される性能を十分に満足すること。」と言える。要求される性能としては、強度、変形性、透水性等が考えられるが、それらを頻繁に計測することは不経済である。それらに替わり用いられるのが、締め固め度D値、N値などの指標である。本研究ではこれらを、「施工管理パラメーター」と呼びZ(x)として表す。

土工事の施工管理の問題を定式化すると「工事期間を通じて施工管理パラメーター Z(x)を、目標値z^*を満足するレベルに保つようにする」といえる。

次に、Z(x)の変動についての定量的な情報を得るために、Z(x)を確率場としてとらえ、統計量を与える。Z(x)を定常確率場であると仮定し、次のような統計量により記述する。

μ_z: Z(x)の平均値 , σ_z^2: Z(x)の分散

r_z:分散の内、White noise の占める割合

δ_z: Z(x)の変動スケール。Nugget effect を除いた、分散の部分についての自己相関関数は、ガウス型

$\rho(\Delta x)=\exp\{-(\Delta x/a)^2\}$とするので、$\delta_z=\sqrt{\pi}\cdot a$である。

Ωを施工対象地盤の体積とし、この統計量を用いて、本研究の目的を表すと次のようになる。

$\mathrm{Prob},[Zv(x)\leq z^{*}\ \mathrm{for}\ x\in\Omega]\geq 1.0-\alpha$　（αは許容超過率）

3.2 超過率の計算

施工対象地盤の体積Ωの中で、Zv がz^*を超過する期待回数P_Fは、次のように与えられる。

$P_F=\mathrm{Prob},[Zv(x)\leq z^{*}\ \mathrm{for}\ x\in\Omega]=\upsilon^{+}_{Z,v}\cdot\Omega$

P_Fを超過率 と呼び、その許容値をαとすると、

$P_F=\upsilon^{+}_{ZV}\cdot\Omega<\alpha$を満足するように$\mu_z$及び$\sigma_z^2$を決定すればよい。$P_F$は、被平均体積 V との変動スケール$\delta_z$との大小関係により、それぞれ次のように求められる。

$\delta_Z>V$ の場合,　式(1)

$$\nu_{z^*V}^{+}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}V}[1.0-exp[-(\frac{\sqrt{\pi}V}{\delta_z})^2]]^{\frac{1}{2}}\cdot exp[-\frac{(z^*-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\cdot\frac{1}{(1.0-r_z)}]$$

$\delta_Z\leq V$ の場合,　式(2)

$$\nu_{z^*V}^{+}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}V}\left[\frac{V}{\delta_z}\{1.0-exp[-(\frac{\sqrt{\pi}V}{\delta_z})^2]\}\right]^{\frac{1}{2}} exp[-\frac{(z^*-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\cdot\frac{1}{(1.0-r_z)}\cdot\frac{V}{\delta_z}]$$

3.3 施工管理指標、標準化被平均体積, 標準化施工体積

式(1)、式(2)は、複雑で、またその意味するところも一目瞭然ではない。そこで施工管理目標の簡略化のために、いく

つか新しい指標を導入する。

1.施工管理指標 β　　$\beta=(Z^{*}-\mu_{Z})/\sigma_{Z}$

2.標準化被平均体積 ξ　　$\xi=V/\sigma_{Z}$

3.標準化施工体積 ω　　$\omega=\Omega/\sigma_{Z}$

これらの指標を導入することにより、式 (1)、式 (2) は次のように書き直される。

• $\delta_z \geq V$ の場合　　式(3)

$$\frac{P_F}{\omega}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[\frac{1}{\xi}\{1.0-exp[-\pi\xi^2]\}\right]^{\frac{1}{2}}\cdot exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\frac{\beta^2\xi}{(1-r_z)}\right]$$

• $\delta_z < V$ の場合　　式(4)

$$\frac{P_F}{\omega}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi}\{1.0-exp[-\pi\xi^2]\}^{\frac{1}{2}}\cdot exp\left[-\frac{1}{2}\frac{\beta^2}{(1-r_z)}\right]$$

式 (3)、式 (4) に基づいて、各パラメータの関係について考察する。図 (1) は、r_z=1.0, $\xi=V/\delta_z$,をパラメータとして、P_F/ω と β の関係を示した。この図より次のことが観察される。標準化被平均体積 ξ を一定としたとき、超過率 P_F を標準化施工体積 ω で除いて P_F/ω とし、これと施工管理指数 β の関係を見ると、P_F/ω は $exp[-\beta^2]$に比例して小さくなる。これは、Z(x)が正規確率場であると仮定しているからである。標準化被平均体積 ξ が、$P_F/\omega\sim\beta$ 曲線に与える影響を見ると、$\xi<1.0$ のとき、結果として計算される $P_F/\omega\sim\beta$ にほとんど変化はない。しかし、$\xi>1.0$ のとき、この曲線は大きな影響を受け、小さい β で、低い P_F/ω を達成できるようになる。これは、Vanmarcke(1977)が、V< δ_z では Z(x)の分散関数の低減を考えないのに対して、V> δ_z では、δ/V という低減を考慮しているためである。したがって、被平均体積 V の大きさを Z(x)の変動スケール δ_z との関係でどのように決定するかは、施工管理に大きな影響を与える。そして、V が δ_z より大きくなると、特に大きな影響を持つ。すなわち V が大きいほど施工管理は容易になる。一方、図(2)は,V/δ_z=1.0 のときの、r_z が $P_F/\omega\sim\beta$ 曲線に与える影響を見たものである。R_z が増加するにつれて P_F/ω の値は、同じ β の値に対して、$exp[-1/(1-r_z)]$ の割合で減少する。すなわち同一条件ならば、短周期成分を多く含むほど、施工管理は容易になると言える。

4 例題

施工管理目標設定の方法を試すため、フィルダムの締め固め管理に関するデータ(本城・松永、1988)を使い例題とする。

このダムの施工結果より得られた統計量は次の通りである。

μ_z=99.3(%)　　σ =2.00(%)

δ_z=16 単位(ただし 1 単位は 90m³ の施工度量に対応する)

r_z=0.65　　z^*=96(%)

Ω=699 単位　　V=1 単位と仮定する。

この時、超過率 P_F がどの程度であったか、逆算する。

β=1.65　　ξ=0.0625　　ω=43.7

β=1.65 と ξ=0.0625 を図(1)に適用させると、P_F/ω=0.5

しかし r_z=0.65 を考慮すると、

P_F/ω=0.5 · exp[-1/(1-0.65)=0.0287　　よって

P_F=0.0287*43.7=1.25

ここで超過率は、確率ではなく、当該期間(Ω)に $Z_V(x)$が z^* を超過した期待回数であることに注意する。従って、この全工期間を通じて、D 値の 90m³ についての平均値が、1.25 回 96%下回ったと期待される。

5 結論

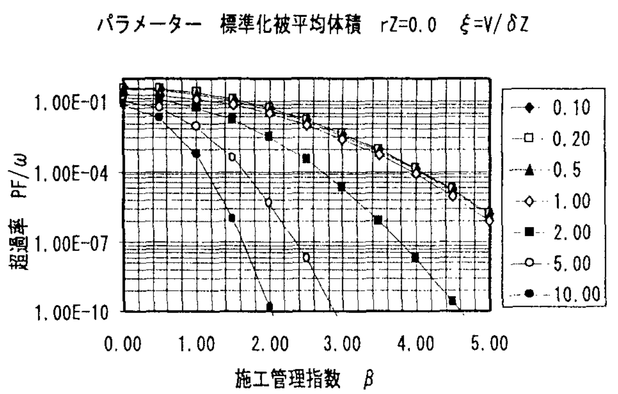
施工管理目標を設定するために、平均 μ_z、標準偏差 σ_z、目標値 z^*、被平均体積 V、変動のスケール δ_z、施工管理の対象となる地盤の体積 Ω 等がある。しかしこれらをそのまま使い施工管理を設定するとかなり複雑になる。そこで、施工管理指標 β、標準化被平均体積 ξ、標準化施工体積 ω 等を新しく設定した。そして α,ξ,ω が与えられたとき、

$Prob,[Z_V(x)\leqq z^*\ for\ x\in\Omega]\geqq 1.0-\alpha$　　式(5)

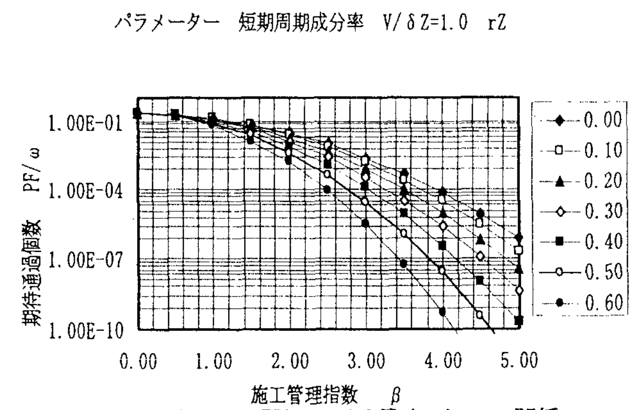
この式を満たすような β を、設定する方法を提案する。結果は式(3)、式(4)に示す。これにより施工管理目標設定を比較的簡単に求めることを可能とした。また、図(1)、図(2)を用いれば β は容易に求まる。

また、その後、本研究で決定した施工仕様が守られ、式（5）の目標が保障されるような、適切なサンプリング間隔と個数を決定することを考える。

参考文献　Vanmacke,E.H.:Random Fields:analysis and synthesis,The MIT Press,1983　本城 勇介・松永 正宏:土の締め固め施工管理に関する一考案:竹中技術研究報告、pp14-17,1988



図(1)パラメータ $\xi=V/\delta_z$、rz=1.0,P_F/ω と β の関係



図(2) パラメータ r_z, $\xi=V/\delta_z$=1.0,P_F/ω と β の関係