

II-516

急速ろ過池逆洗浄時の「ふりく」現象発生因子の考察

水処理・水環境・木原研究室 正会員 木原 敏

1. 「ふりく」の概要

「ふりく」(flick(とびぬく、ぬぐ)) - 日本語の当て字は「不陸」) 現象というのはろ過層の砂層と砂利層の境界面が相互に凹凸を生じることで、ろ過砂が砂利層を通過して支持ベッドへ、さらに配水池にまで漏出しているようなトラブルは、ほとんどこの「ふりく」が原因である。

ろ過層の砂と砂利層は施工時には慎重に水平、平面に仕上げられており、それらの間に凹凸や混合はない。理論上は逆洗上昇流によって、水篩を受けて砂と砂利は分別分離されることになっている。砂利層は逆洗によっても流動化しないことになっており、その上層の砂だけが流動化することになっている。しかし、筆者が調査した結果では少例ではあるが4例中3例まで「ふりく」を起こしていた。これらのろ過池のベットのすべてはホイラー型であった。実際には「ふりく」は意外に多く発生しているのではないと思われる。

「ふりく」による境界面の凹凸の高さは7~15(cm)で、波長は10~13(cm)である。したがって凹凸のピッチはかなりのげしく、ほぼ格子状に規則正しく発生する特性がある。「ふりく」丘の基幹部は粒径の大きい砂利で先端部は細かい粒径になっている。基幹部の比較的粗い砂利の間隙は十分、ろ過砂が通過し得る大きさである。「ふりく」が発生するのは時間をかけて起こるのではなく、逆洗開始の直後に起こる。

2. 「ふりく」の発生機構

砂層に逆洗が掛かると、ある上向流速に達し流動化が起こる。この段階では十分、設定膨張率に達しているのではなく、流動化は始まっているが、膨張は徐々に始まりつつある。

砂利の周辺には見掛け密度 ρ' の砂・水混合水が取り巻き、この ρ' の浮力を受ける。膨張が設定値に達したときの砂・水混合水の見掛け密度 ρ_o' は $\epsilon_e = (\epsilon_o + e) / (1 + e) \div (0.502 + 0.26) / (1.26) = 0.60476 \dots (1)$, とすれば

$$\rho_o' = \rho_s (1 - \epsilon_e) + \rho_o \cdot \epsilon_e \div 2.46 (1 - 0.60476) + 0.60476 = 1.577 \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots (2)$$

$$\rho_s: \text{ろ過砂の密度 (g/cm}^3\text{)}, \rho_o: \text{逆洗水密度 (g/cm}^3\text{)}, \eta' = \rho_s / \rho' = 2.46 / 1.577 = 1.560 \dots (3)$$

膨張初期、流動化開始時の間隙率 ϵ_e' は、そのときの膨張率 $e_a = 0.05$ とすると

$$\epsilon_e' = (\epsilon_o + e_a) / (1 + e_a) \div (0.502 + 0.05) / (1.05) = 0.5257 \dots (4)$$

逆洗開始から次第に流速が増加して流動化が始まり、その時の見掛け密度 ρ_a' は

$$\rho_a' = \rho_s (1 - \epsilon_e') + \rho_o \cdot \epsilon_e' \div 2.46 (1 - 0.5257) + 0.5257 = 1.692 \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots (5), \rho_s / \rho_a' = 2.46 / 1.692 = 1.4535 \dots (6)$$

$\rho_s / \rho_a' = 1 \sim 1.70$ では境界面が不安定である。

$F_r = U_e / \sqrt{g \cdot R} \dots (7)$, F_r : 逆洗上向流のフルード数, U_e : 上向流速 (cm/sec), R : 砂利層最上層の間隙の有効動水深 (cm)

砂利層最上部の最も小さい砂利の粒径は設計指針に2~5 (mm), 厚さ100 (mm), 平均径 $\phi_c = 3.2$ (mm), 間隙率 $\epsilon_c = 0.4$ とすれば

$$R = \epsilon_c / A_c \dots (8), A_c = a_c \cdot n_c = (\phi_a \cdot \pi \cdot \phi_c^2) \{ (1 - \epsilon_c) / (\phi_v \cdot \pi \cdot \phi_c^3 / 6) \} \dots (9),$$

$$R = (\phi_v / \phi_a) \{ \epsilon_c / 6 (1 - \epsilon_c) \} \phi_c \dots (10)$$

ここに A_c : 単位体積中の間隙の潤面すなわち単位体積中に存在する砂利の表面積の総和 (cm²/cm³), a_c : 砂利個体の表面積 (cm²), n_c : 単位体積中の砂利個体数 (-), ϕ_a, ϕ_v : 球形に対する砂利個体の表面積, 体積の補正係数 (-), それぞれ $\approx 0.83, \approx 0.85$, $R = (0.85 / 0.83) [0.43 / \{6 \times (1 - 0.43)\}] \times 0.32 = 1.0241 \times [0.43 / \{6 \times (0.57)\}] \times 0.32 \approx 0.04120$ (cm)

$$F_r = U_e / \sqrt{g \cdot R} = 15 / \sqrt{980 \times 0.04120} \approx 2.360$$

$$\Delta \xi = \Delta \rho' / \rho' = (\rho_s - \rho') / \rho' \dots (11) = (2.46 - 1.692) / 1.692 = 0.4539$$

$$\Delta \zeta = F_r / \Delta \xi = 2.360 / 0.4539 = 5.1994 \quad \cdots (12), \Delta \zeta \geq 4.5 \text{ で不安定である。}$$

3. ベッドに対する考察

ホイラー型ベッドでは逆洗水流の分散が必ずしも完全でない場合が多い。ホイラー型ろ床ベッドは磁球の配置の関係から局部的噴流があり、これをベッドの上の砂利層が分散させる役割を果たすことになっている。最下部の砂利層は水流の分散より支持層としての役割が大きく、上層になるにしたがって分散の役割が増えてくる。

砂利は球形でなく、均一でないので、このために生じる水流分散の不均衡が、その上層に影響を与える。砂利が球形から外れるために生じる間隙の局所的な不均衡が最上部の比較的小さい砂利を持ち上げることになる。上層部の砂利は小さいが、砂利の形状は小さいもののほど形状が尖角化している。このとき、砂利に及ぼす浮力は周囲の流動化した砂層であり、浮遊の条件は清水中のそれとは異なり、軽くなっている。このことが砂利を持ち上げ易くしているものと思われる。一度、このように「ふりく」が発生して砂利面に凹凸を生じると、凹部では砂が入り込み、逆洗水流が通り難くなり、反対に凸部ではその上部の砂層が薄くなって水流は強くなる。このため、その後、逆洗が繰り返行なわれるとその度数が増すが、このような「ふりく」の傾向はさらに大きくなっていく。

「ふりく」によって砂、砂利境界面の凹凸ができると、ろ砂が漏出するだけでなく、凸部の上の砂層厚さが不足するため、砂層の摩擦抵抗が小さくなり、ろ過水の通過が容易になり、その部分に水流が集中することになる。このろ過の不均衡はろ層中に局部的に抑止物質を捕留することになり、マッドボールを造る原因にもなり兼ねない。また、局部的なろ層厚の不足とその部分の流速の増加は被抑止物質のスリースルーを生じる結果となる。実際に「ふりく」を生じているろ過池では当初の砂層厚が60 (cm) として「ふりく」によって52 (cm) にまで減少しており、砂層の13 (%) の減少はかなり大きな影響を与えている。筆者が調査した多くのろ過池では、このほか、洗浄時の表面洗浄のため、トラフからの漏砂があり、砂層厚が60 (cm) から50 (cm) 位まで減少していたものが多かった。したがって、「ふりく」による水流の偏流はさらに大きくなっているものと思われる。

砂層厚が減少し、水流の偏流が起こっているような場合、表面洗浄ではノズルが砂面表面から大きく離れてしまうので表面洗浄の効果が減少してしまうという障害を生じている。これもまたマッドボールを造る原因になっている。

ホイラー型ベッドが「ふりく」の発生を起こし易いが、他のベッドの場合でもベッドからの水流に不均衡を生じ易いものは避けた方がよい。ポーラスプレートが比較的良好であると思われるが、レオポルド型のものはその上に直接ろ砂をのせたのではプレートのホールから砂が漏出するので、その上に砂利層が必要であり、砂利の選択を誤ると同じようなトラブルが発生する。

4. 「ふりく」に対する対策

①小さい砂利の選択になるべく球形度の高いものを用いる。②上層部の小さい砂利層厚を十分に大きくとる。100 (mm) では不足ではないか。③逆洗開始は徐々に流速を増し、設定流速に達せしめる。④砂利層の構成にK配置がある。この方法は砂利層の厚さが大きくなる。このほか砂層流動化に不均一を生じるから、このことを十分考慮しておく必要がある。⑤砂利層との砂層の境界面に砂利が「flick」しないようネットを張る方法がUSAにはある。砂利が浮上しないためにはかなり小さい網目を必要とし、逆洗時の抵抗を増す恐れがある。筆者は横方向の砂利の移動を防ぐためにステンレス製50 (mm) 目角、一個体 500 (mm) 角方形の格子グリットを連結して設置することを提案する。砂利の点検、取り替えなどを考えると、緊結する必要はなく、静置するだけでよい。⑥最上部の砂利にガーネットなど比重の大きい材料を使用することは有効と思われるが、粒径の大きいガーネットは高価でコストの点からも問題がある。砂利層の間隙はミクロ的には不規則であり、均一なものとしては取り扱えない。砂層の支持層としてだけでなく、水流の分散機構としての砂利層について、不規則な間隙をもつものとしての水理学的研究が必要である。

以上、「ふりく」についての検討を行なった。「ふりく」は砂利層のあり方が大きく関わっている。砂利層はこれまで比較的軽視されてきた感がある。今後、砂利層の役割についても検討が必要である。今回の調査に各地浄水場のご協力を得た。それぞれの浄水場で関係各位には厚いご協力を賜った。ここに紙面を借りて深く感謝の意を表する。