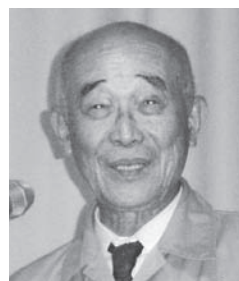


解説

巨礫玉石地盤に対応できる推進用管について

本間 良治

株式会社 推研
代表取締役



1. はじめに

巨礫玉石を含む砂礫地盤の推進では推進用管がひび割れたり、穴があいたりすることが少なくありません。そのことが殆ど公表されることはありませんが、推進を施工するものにとっては、悩みの種です。推進屋も古狸になると、ボーリングの資料では分からなくとも、発進立坑を掘削した頃には、そのスパンで推進用管が損傷するかしないかの見当は付きます。しかし、そのときは、推進用管も出来ているし、請負金額も工期も決まっているし、変更は極めて困難です。

では、巨礫玉石混りの地盤で、推進用管を破損しないような推進方法があるのかといえば、これはありません。何故なら、推進方法で変えられるのは推力だけです。しかし、巨礫玉石による推進用管の破損は、巨礫玉石から推進用管の半径方向に荷重を受けることにより破損するのですから直接的には推力に関係ありません。いくら中押を増やしたり、滑材をぼんぼん入れて推進抵抗を軽くしても破損は止められません。出来ることは推進用管のひび割れ強度を上げることだけです。設計変

更に推進用管のひび割れ強度の高い管に変更をお願いしても、確率論的な面もあって、推進用管が必ず損傷すると言う理論的な証明ができないし、またどの程度のひび割れ強度まで上げれば大丈夫なのか理論的説明も難しいので、設計変更は困難です。結局自腹を切って強い推進用管に換えて、管割れ無しで完工するか、そのまま施工して、ひび割れだらけの管をてんぷら修理して知らん顔をするかになります。

巨礫玉石混りの砂礫地盤では、実際にはほぼ全部といってよいほど、推進用管の損傷事故をおこしています。このため推進管の選定には推力計算だけでなく、玉石による損傷も考慮すべきだとゆうことを、声を大にして言ってきました。なぜなら、最近の降雨は酸性が強くなっているから、地下水まで酸性化しつつあります。この酸性化した地下水が、ヒューム管のクラックに入るとコンクリート中のアルカリ分を中和して鉄筋を酸化し、酸化鉄となると約2.2倍の体積膨張により、コンクリートを押し割る作用が働くからです。地下水が中性であれば、小さなクラックに入った水分はコンクリートの中の珪酸カルシウムや炭酸カル

シュウムを溶かしだしてクラックを完全に充填してしまいます。これをコンクリートの自癒作用と言うのだそうです。即ち、コンクリートは本来、自己補修能力をもっていますが、酸性の地下水の中ではこの作用が働くとは考えられません。従って、酸性雨の無かった昔とは事情が変わっています。また流れる下水も肉食の増加により酸性化し始めていると聞いています。このままでは、将来に大きな悔いを残すことになると思います。

昔であれば、推進用管を破損するほどの巨礫玉石地盤を掘進出来るような掘進機がありませんでした。しかし今では、CMTの複合掘進機のように、凄まじい巨礫玉石地盤の中でも掘進出来るような強力な掘進機が開発され、巨礫玉石地盤も推進出来るようになりました。これに対応して、推進用管も巨礫玉石地盤に耐えるものが必要になりました。

この様な状況下にあって、巨礫玉石地盤の推進施工では、CMT工法協会は、玉石による推進用管の損傷の機構を解明し、栗本コンクリート工業(株)のご協力によって、損傷しない推進用管を開発する研究を続けています。研究はまだ継続中ですが、ここに中間報告します。最終的には巨礫玉石地盤推進において、最小コストで推進用管の損傷を未然に防止する指針を作りたいと考えています。

2. 巨礫玉石地盤に強い「ガラス繊維鉄筋コンクリート管(SSP管)」

SSP管は、もともと高強度コンクリート管として、長距離推進や大深度推進用管として開発された推進用管です。言い換えれば、SSP管は巨礫玉石地盤推進用に開発された管ではありません。しかし、巨礫玉石地盤でSSP管を採用すると推進用管の損傷が激減することが分かって以来、SSP管を主体に研究してきました。外圧強度に強い推進用管で良ければ、2種管、3種管でも耐えるはずですが、巨礫玉石地盤では無力です。土圧に耐える管であっても巨礫玉石に耐える管ではありません。では、何が異なるのか、結論を先

に述べます。

(1) 1点集中荷重を分散する機能がある。

巨礫玉石が推進用管に加える力は、後述するように、1点集中荷重です。推進力のように、管端面のある面積にかける推力や、曲進区間の推進用管が受ける側土圧反力のように推進用管の側面のある面積にかかる押付け力とは異なり、玉石から1点に集中的に加圧されます。そのため、2種管や3種管のように全体にかかる荷重に対するひび割れ耐荷力を増やしても、1点集中荷重が掛かると穴が明いてしまって効果がありません。

しかし、SSP管はガラス繊維が、きめ細かく2重に入っているので、1点集中荷重を分散してくれるので、後述の実験のように、1点集中荷重を掛けても、管全体のひび割れ荷重まで耐えます。言い換えれば管全体の強度が有効利用できます。

(2) 高強度コンクリートなのに脆さがない。

推進用管のコンクリートにコンクリート混和材を入れて、70N/mm²管、90N/mm²管のように高強度コンクリート管を作るとコンクリートの強度が上がる代わりにヤング率も上がります。そのため瀬戸物のような脆さが出て割れやすくなります。SSP管はその脆さをガラス繊維で抑制しています。ガラス繊維の入っていないJSWAS A-2規格の推進用管と、ガラス繊維の入っているA-8規格の推進用管を使い分けてみられた方はその差を実感されたと思います。

(3) 撓みの回復力がある。

巨礫玉石地盤の中を推進していく推進用管はまわりの玉石から、小突かれどうして進んでいきます。即ち常時繰り返して荷重を受けます。そのため、通常の推進工法用コンクリート管の場合、1回でもひび割れ荷重に達して、ヘヤークラックが入ると、そのクラックは次第に大きくなって管の損傷になってしまいます。しかし、SSP管の場合は玉石で抑えられている間はヘヤークラックが見えていても、玉石が負けて割れると、ヘヤークラックが消えてしまいます。これはSSP管がケミカルプレストレス管と同様の機能をもっているためです。

以上3つの機能が巨礫玉石地盤の推進工法用管として有効に働いていることが分かりました。そこでさらに研究を進め、どのような地盤条件の場合にどの範囲にSSP管を必要とするのかと言う問題を調べました。そのためにはまず巨礫玉石によって、どのような機構で推進用管を損傷するのか？またどの程度の破壊力なのかを調べるとともに、SSP管も1点集中荷重に対して数値として何KNに耐えるのかを調べなければなりません。次にその研究結果を報告します。

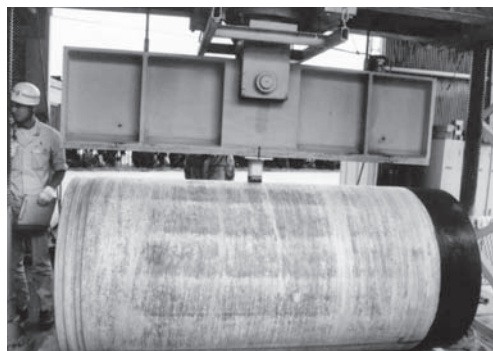
なお、この報告ではN値の高い地盤で急激な方向修正をして推進用管を胴割れしたり、曲進区間で推進用管の曲進耐荷力以上に推力をかけて、推進用管の端面を破壊したり、或は、曲進区間で推進用管の側土圧耐荷力以上に側土圧反力をかけて推進用管内側面にひび割れを作ってしまったような人為的な破損は論外とします。

3. 玉石による推進用管破損の機構

このスパンではヒューム管がめっちゃめっちゃに穴が明いたのに、隣のスパンでは何も起こらなかった、と言うようなことが少なくありません。砂礫地盤のなかの玉石は均等に分散して存在するわけではありません。むしろ極端に偏在しています。大きな河川を見渡すと砂ばかりのところと、礫、玉石ばかり集まっているところがあります。地面の下でも同じ様に、玉石は偏在しています。これは掘進機に付けた集音マイクやカッターモーターの電流値でもはっきり分かります。玉石が偏在するために同じ条件が再現できません。このことも研究を難しくしています。とは言っても、20年余りの研究の積み重ねで、玉石によるヒューム管の破損の機構が明らかになってきました。なお、以下の文中で言う、「地盤のN値」は地盤のマトリックスのN値を言います。玉石や礫を叩いてのN値ではありません。

(1) 単独玉石の回転によるカム作用(図-1 参照)

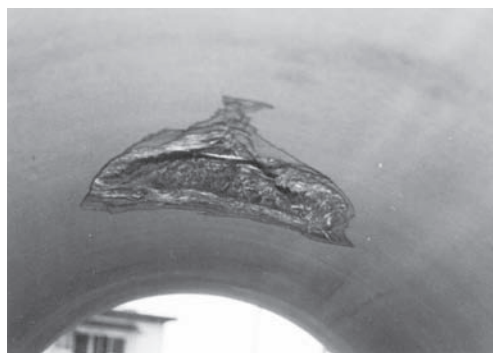
平均径が10cm前後の回転楕円体状の玉石が、地盤中では斜めに近い角度で存在していたもの



推進管用の一点荷重試験全景



鋼製加圧ブロック貫入



管内の孔

写真-1 鉄ブロックによる推進用管の一点集中荷重試験風景

が、推進用管に接して回転し立ち上がることにによって、地盤を反力壁として推進用管を突く場合です。この様な場合の条件は次のようです。

- ①地盤のマトリックスのN値が40回以上あり、かつ自立性がある。
- ②玉石の引張り強度が、18MN/m²以上ある。

表－１ 推進用コンクリート管の一点荷重試験結果

試験 番号	管内径 ϕ mm	管外径 ϕ mm	管長 mm	管種	種別	材齢日	1点載荷ひび 割れ荷重 KN	1点載荷破壊 荷重 KN	荷重位置
1	1000	1200	半管 1200	SSP標準 90N/mm ²	2種	-	140	(管本体破壊) 192	中央
2	1000	1200	2430	SSP標準 90N/mm ²	1種	56	120	250	管端面から 400mm
3	1000	1200	2430	SSP標準 90N/mm ²	1種	120	180	340	中央
4	1000	1200	2430	SSP標準 90N/mm ²	2種	87	210	346	中央
5	960	1200	2430	SSP特圧 90N/mm ²	1種	17	180	435	中央
6	960	1200	2430	SSP特圧 90N/mm ²	2種	39	250	500	中央

考察

番号1 半管は一点集中荷重の長さ方向の広がり半管止まりなので弱い。

番号2 管長の端に一点集中荷重をかけると片方の広がりがとれないので弱くなる。

番号3 一点集中荷重によるひび割れ荷重はほぼ全長均等荷重のひび割れ荷重にスライドする。中央一点集中荷重の場合でも管全長で耐荷している。

番号4 2種管になるとひび割れ耐荷力の向上した分だけ、大きくなる。

番号5 ϕ 1000mm 管の管厚を内径側に20mm 厚くした特厚管です。一点集中荷重に対して破壊荷重が急激に大きくなります。

番号6 ϕ 1000mm 管の管厚を内径側に20mm 厚くした特厚管です。一点集中荷重に対してひび割れ荷重も大きくなり、その分、破壊荷重の増加が少なくなっています。

③同じ様な平均径10cm前後の玉石ばかりが多い。

N値が高く自立性のある地盤では大きな玉石は地盤に抱えられて回転できません。そのため回転できるのは、平均径10cm程度の玉石ばかりになります。それも数がないと、たまたま回転してカム作用を起こせる位置にしなければならないので、多数の玉石が必要です。玉石の平均径が小さいので玉石の岩石の引張り強度が大きくないと玉石が先に割れてしまいます。しかし、玉石の地盤側がマトリックスで受け止められると玉石の片方は割裂応力が働かないので、3倍以上の耐荷力を示します。引張り強度が18MN/m²以上の岩とは、具体的には流紋岩や安山岩や閃緑岩や古生代砂岩です。お馴染みの花崗岩や玄武岩や中生代の砂岩では、ヒューム管に負けて砕けてしまうので、この機構では管の損傷は起きません。

しかし、玉石混じりの砂礫地盤で玉石を叩いてN値が40回以上あっても、マトリックスのN値が40回以上もある砂礫はめったにありません。その

ため、玉石単独のカム機構による破損の事例は少ないようです。

(2)大きな玉石の回転によるカム作用(図－2参照)

前項で大きな玉石は自立性の大きい地盤に抱えられて回転しないと言いました。しかし、それは掘進のときに切羽上部の地盤を緩めていない場合のことで、大きな玉石を破碎するために上載地盤を乱したら平均径20～40cmの大きな玉石まで回転できるようになります。この場合の条件は

①地盤のN値が30回以上あるが、直上地盤は緩んで自立性がなくなっている。

②玉石の引張り強度が、8 MN/m²以上ある。

③同じ様な平均径30～50cm前後の玉石が多い。

④大きな玉石が躓くための継輪の溝とかグラウト孔といったものがある。

となります。この場合、玉石は花崗岩のように引張り強度が、8 MN/m²の玉石でも推進用管が破損します。

(3) 親子玉石の子玉石の回転によるカム作用

(図-3 参照)

前2項では地盤のN値が40~30回以上であることが大前提でしたが、実際にはN値が20回~30回の地盤でも、玉石による推進用管の損傷が起こっています。N値が30回以下では、玉石が地盤にめり込んでしまうので、推進用管を突き破るほどの反力が採れないはずですが、しかし実際には結構マトリックスのN値の低い地盤でも損傷が起きます。そのような現場を調べてみると、子玉石の上に、その反力を受け止める大きな親玉石が控えています。このような現場は結構多いのでN値が低いからといって安心はできません。このような場合の条件を列記すると。

- ①地盤のマトリックスのN値が20回以上ある。
- ②子玉石の引っ張り強度が、 $22\text{MN}/\text{m}^2$ 以上ある。
- ③平均径10cm前後の子玉石と平均径30cm以上の親玉石が混在する。

となります。この場合、子玉石は推進用管から1点集中荷重を受ける以外に、親玉石からも1点集中荷重を受けるので、子玉石の引っ張り強度は濃飛流紋岩やホルンフェルスや古生代砂岩のような引っ張り強度 $22\text{MN}/\text{m}^2$ 以上なければ割れてしまいます。しかし、玉石強度の高い地盤では結構頻度の高いケースです。

(4) 親子玉石の子玉石の楔作用(図-4 参照)

前項の親子玉石に似ていますが、親玉石が40cm以上と非常に大きく推進用管に向かっていてる面が船底形をしている場合、肌落ちした子玉石が、推進用管の天井に乗って親玉石の船底の下に入り込み、楔作用で推進用管にひび割れを起こします。この場合推進用管に穴があくより、多くは推進用管のひび割れが続きます。しかし、子玉石も大きな荷重を受けるので応力疲労を起こして、大きな「どん」という音をたてて破壊します。この減少は岩盤推進の場合のテールボイドに挟まったソゲによる推進用管の損傷と似ています。

(5) その他の珍しい玉石

通常、玉石と言えばその名のとおり丸い形をしています、火山地帯でおむすび形の転石に出

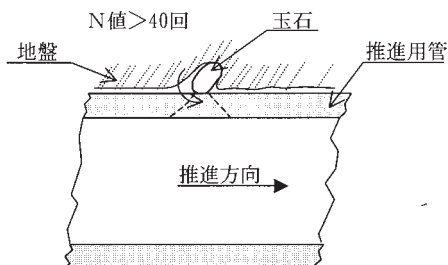


図-1 玉石は直接地盤を反力として回転

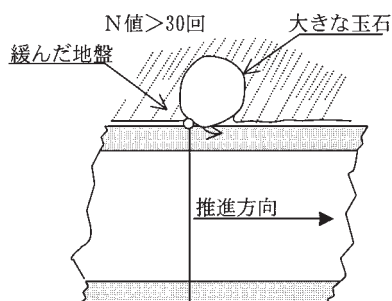


図-2 緩んだ地盤で大きな玉石が踏いて回転

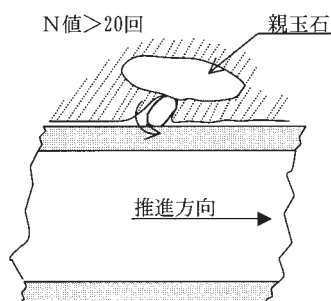


図-3 子玉石は大きな親玉石を反力として回転

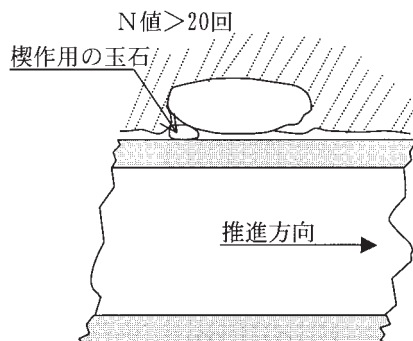


図-4 玉石は大きな玉石との間で楔作用

いました。丸くないので玉石と言いくいたため、ここだけ転石と言うことしました。岩は玄武岩質の安山岩で引張り強度は $12\text{MN}/\text{m}^2$ と大きくないので、普通の形状なら、おむすびが割れるはずですが、3角形のおむすびの頂点が推進用管に向かい、反対側の底辺側が地盤に当たると、おむすび形転石には割裂応力が片方しか働かないので、おむすび形転石は3倍以上の強度を示しました。正三角形に近いので回転しにくいように思いますが、容易に回転するので危険です。

4. 玉石とヒューム管の強さ比べ

前節で述べたような機構で、玉石により推進用管が損傷することが分かっても推進方法によって、これを防ぐ有効な手段は殆どありません。テールボイドを小さくして、管周囲の地盤の緩みを防止することは大きな玉石の回転を防ぐのに有効ですが、完全はありません。

確実に防げるのは、玉石の割裂強度より推進用管のひび割れ強度を大きくすることです。1KNでも推進用管のひび割れ強度が強ければ、玉石が割れて推進用管は無傷のまま助かります。

実際に玉石が集中荷重を受けて割れるのにどれだけの力が必要なのか、また一方推進用管は玉石から集中荷重を受けた場合、どれほど耐えられるのかを、栗本コンクリート工業(株)のご協力を得て試験しました。現場から採取した玉石を試験機にかけて割裂破壊させたときの荷重と、玉石の引張り強度と、玉石の大きさを測定しました。引張り強度が、 $24\text{MN}/\text{m}^2$ で大きさが10cm前後の玉石ではその平均径をmmで表した数値をKNで読み替えたのと同じ耐荷力があることが分かりました。

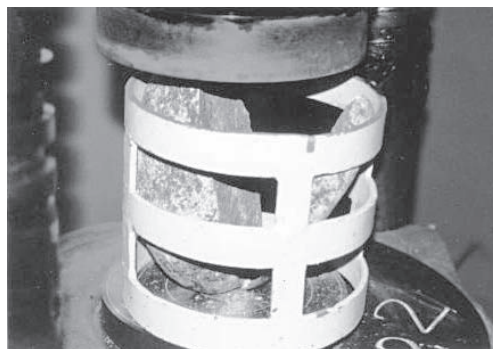
例えば、平均径100mmの玉石なら、100KNの点荷重で破壊するという事です。また、玉石の耐荷力は引張り強度に比例するので、安山岩の玉石であれば引張り強度が $15\text{MN}/\text{m}^2$ ですから、平均径100mmの玉石の荷重強度Fは

$$\begin{aligned} F &= 100 \times 15 / 24 \\ &= 62.5\text{KN} \end{aligned}$$

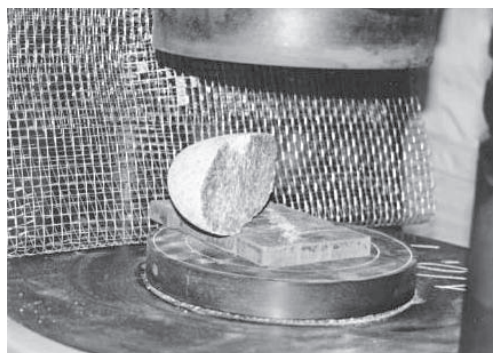
玉石の平均径が20cm～30cmと大きくなると、体



玉石の割裂試験縦割り加圧前



加圧後の割裂状況



横割り加圧後割裂状況

写真－2 玉石の割裂破壊試験風景

積効果によって割裂破壊強度は1.5倍～2.0倍と大きくなります。

一方、推進用管の方はJSWAS A-8規格の下水道推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管(以下SSP管という)については、玉石に見立てた鉄のブロックでヒューム管1点集中荷重をかけ、推進用管がひび割れ、次いで穴が明く様子を調べま

表一 2 玉石の割裂破壊試験結果

試験番号	荷重方向	中径 mm	割れ口寸法 mm	割裂荷重 KN	岩質
1	縦割り	80	90 × 70	70	濃飛流紋岩
2	縦割り	165	210 × 120	124	濃飛流紋岩
3	縦割り	210	230 × 190	540	濃飛流紋岩
4	横割り	80	95 × 65	50	濃飛流紋岩
5	横割り	104	138 × 70	170	濃飛流紋岩
6	横割り	285	350 × 220	440	濃飛流紋岩

考察

濃飛流紋岩の引張り強度は、24MN/m²です。

資料の玉石は自然石のままの状態であるため、加圧試験機の加圧面への当りの状態で数値がばらつきます。

した。

その結果、SSP管はガラス繊維が入っているので集中荷重の分散がよいため、全管の場合、1点集中荷重を受けても推進用管の長さ方向に1.8～2.2mの範囲で負担していることが分かりました。また同時に半管の場合は長さが1.2mしかないので、1.2mの負担しか出来ないことや、長さの方向に偏芯して集中荷重をかけると、片方の荷重の広がり切れるためにその分だけ耐荷力が減少することも分かりました。

例えば、呼び径φ1000mm 1種のSSP管の場合、ひび割れ荷重が規格では、59KN/mです。従って、2.0mに分散耐荷した場合、耐荷力 R_8 は

$$\begin{aligned} R_8 &= 59\text{KN} \times 2.0 \\ &= 118\text{KN} > F = 62.5\text{KN} \end{aligned}$$

118KNとなり、平均径100mmの安山岩の玉石の割裂破壊強度より大きくなります。従って、推進用管は損傷しません。これに対して、JSWAS A-2規格の下水道推進工法用鉄筋コンクリート管を用いると、この推進用管はガラス繊維によって補強されていないため、応力の分散が悪く、局部的に破損してしまうことが多いのですが、管の外圧試験や折れ曲げ試験から推定して1.2mまで分散したとしても、ひび割れ荷重が規格では、41KN/mなので、耐荷力 R_2 は

$$\begin{aligned} R_2 &= 41\text{KN} \times 1.2 \\ &= 49.2\text{KN} < F = 62.5\text{KN} \end{aligned}$$

49.2KNしか耐えません。従って、JESWAS A-2規格のヒューム管ではひび割れると同時に穴があきます。

5. まとめ

昔は地盤のN値の低いところでは推進用管の玉石による損傷は無いものと思っていました。しかし先に述べたように、意外にマトリクスのN値の低い地盤でも起こりうる事が分かってきました。

推進用管のひび割れ強度の大きいものを用いれば、推進用管の損傷事故は確実に無くなります。しかし、やみくもに高価な推進用管を用いては、工費が上がります。

必要最小限度にしなければなりません。そのためには、そのスパンの玉石を採取し岩の引っ張り強度試験をして玉石が砕けるための荷重を求め、次いで玉石の破碎荷重以上のひび割れ強度をもつ管種を選定しなければなりません。標準管のSSPにしても、なを強度が不足するときは、内径に余裕があれば、管厚を必要最小限だけ内側に厚くした内径特厚が経済的です。外径側に管厚を大きくすると、掘進機の規格のため1ランク上の呼び径になるので無駄がでます。

なお、種々申し上げましたが、巨礫玉石を含む砂礫地盤での推進工法時に参考になれば幸いです。