

都市シールドトンネルにおける NOMST 掘削の問題点 およびビット摩耗

Problems in NOMST Excavation by the Shield Tunneling Method in Urban Area

北本 正弘*

Masahiro Kitamoto

要 約

本工事は首都高速中央環状新宿線の中のシールド工事であり、掘削外径 ϕ 11.42 m、延長 570 m の併設道路トンネルを一機の泥水式シールドを用いて掘削した。当該工事では、地中連続壁で施工された立坑において、NOMST 工法による到達および再発進方法が採用された。また、シールド通過断面に他工区開削工事の中間杭が出現する区間があり、 ϕ 800 mm 場所打ち杭で施工されたこの中間杭のシールド掘削部芯材には、CFRP・GFRP 材が使用された。

本稿では、到達・再発進における NOMST 壁 (CFRP 材使用) 掘削時のビット摩耗に関するデータの実績比較を行い、市街地における NOMST 掘削の問題点について施工報告を行うものである。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. 工事概要

§ 3. ビット摩耗量推定

§ 4. 施工実績

§ 5. ま と め

§ 1. はじめに

本工事は、首都高速中央環状新宿線 (目黒区青葉台 4 丁目から板橋区熊野町までの延長約 11.0 km) の自動車専用道路のうち、地下鉄大江戸線東中野駅北側立坑から中井駅南側立坑までの延長約 570 m の併設シールドトンネルを築造する工事である。

当該シールドは、東側トンネル (以降内回り線と呼ぶ) を東中野立坑から発進し、約 570 m 掘進後に中井立坑に到達する。中井立坑内でシールドを回転後、西側トンネル (以降外回り線と呼ぶ) を中井立坑から東中野立坑に向けて U ターン施工するもので、一機の泥水式シールドで併設道路トンネルを築造する工事である。

本稿では、到達・回転再発進立坑である中井立坑において、芯材として CFRP の新素材 (ネフマック) を使用した NOMST 構造の地中連続壁 (壁厚 1,200 mm) の掘削を行った際、到達において発生した NOMST 壁掘削に伴う振動発生の原因解明と今後の課題について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工事内容を以下に示す。

工 事 件 名：SJ 46 工区 (2)トンネル工事

発 注 者：首都高速道路株式会社

工 事 場 所：東京都中野区東中野 3 丁目・4 丁目
新宿区上落合 2 丁目・3 丁目

工 期：平成 13 年 8 月 30 日～平成 17 年 3 月 31 日

シールド機：外径 ϕ 11.42 m 泥水式シールド仕上り内径： ϕ 10.42 m (DC のみ ϕ 10.52 m)

平面線形：最小曲線半径 R 10,000 m

縦断勾配：-26%～+26%

施工延長：外回り線 568.8 m

内回り線 568.7 m

土 被 り：14.6 m (1.3 D)～20.9 m (1.9 D)

セグメント：RC セグメント 407 R

DC セグメント 399 R

ST セグメント 38 R

2-2 地盤概要

発進・到達立坑におけるシールド掘削断面の地盤構成は、上部から東京礫層、江戸川粘性土層、江戸川砂質土層であり、発進時の掘削断面比は東京礫層 43.4%、江戸川粘性土 36.5%、江戸川層砂質土 20.1%である。

到達・再回転立坑における地盤構成は、東京礫層に代わり、江戸川粘性土層が厚くなり、掘削断面比は江戸川粘性土層 80.3%、江戸川砂質土層 22.7%である。平面

*関東 (支) 首都高東中野 (出)

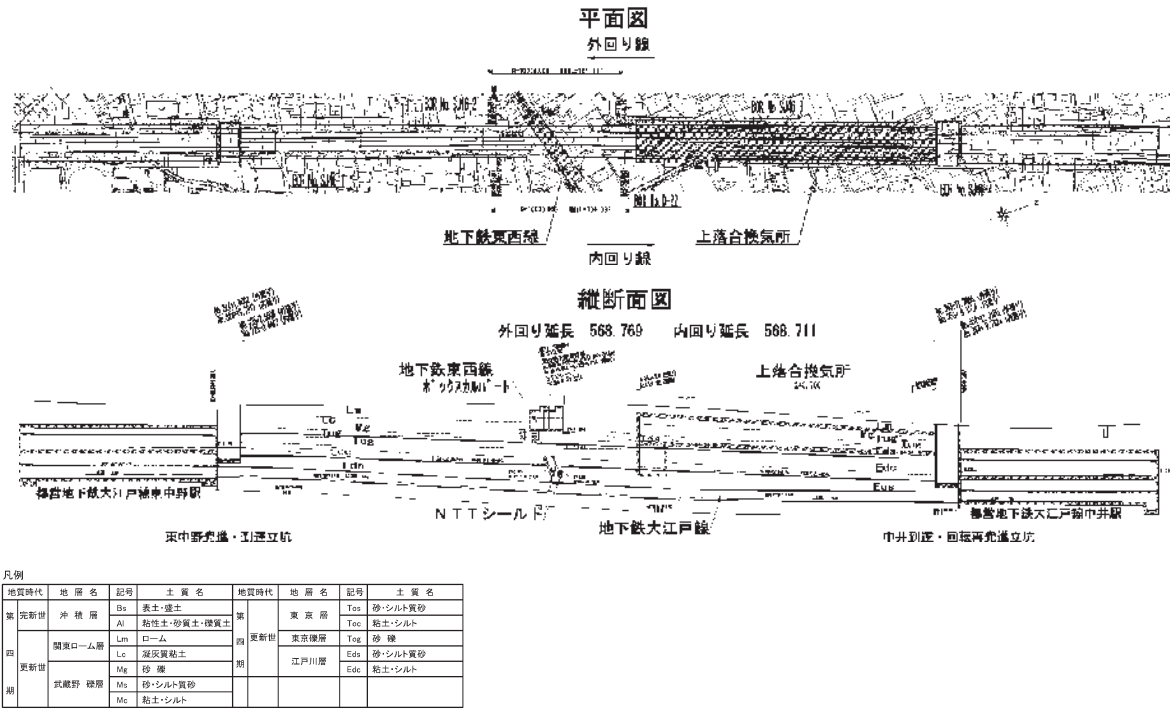


図-1 平面図および縦断面図

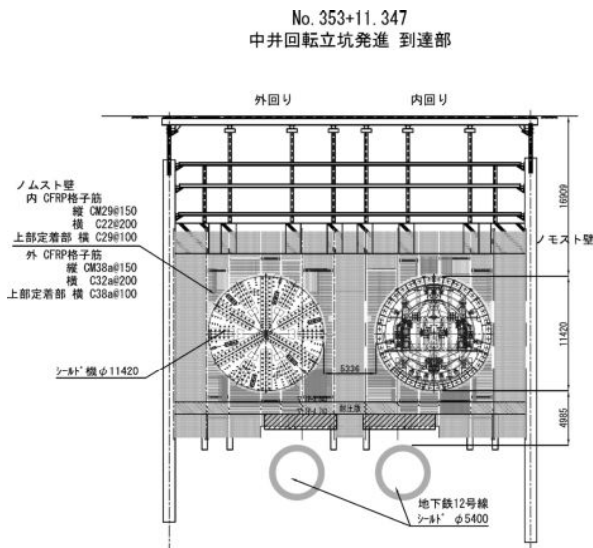


図-2 中井立坑到達・再発進部断面図

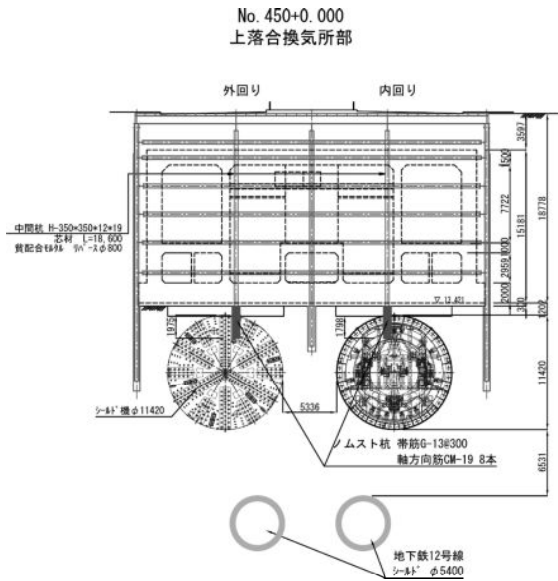


図-3 換気所掘削部断面図

図および縦断面図を図-1に示す。

東京礫層の礫は硬質で、N値は50以上、最大礫径は150mmが想定された。江戸川層粘性土は部分的に細砂の薄層を介在するが、ほぼ均一なN値16~30の硬質シルトである。江戸川層砂質土は、ほぼ均一な粒径を持つN値50以上の密な細砂である。

2-3 新素材を用いた地中連続壁および中間杭

シールド発進・最終到達地点である東中野立坑は地中連続壁工法で施工されたものである。また、到達・回転再発進立坑である中井立坑は、芯材としてCFRPの新素材(ネフマック)を使用したNOMST構造の地中連

続壁(壁厚1200mm)である。なお、NOMST部のコンクリート骨材は石灰石骨材が使用された。図-2に中井立坑到達・再発進部横断面図を示す。

また、両立坑間570mのうち、中井立坑に隣接する約250mの区間においては、開削工法で道路換気所を築造中のため、覆工中間杭が約5mピッチでシールド断面上に計88本出現する。図-3に換気所掘削部横断面図を示す。このモルタル中間杭(φ800mmリバース杭)のシールド通過断面部にも地中連続壁と同様、シールドで掘削可能な新素材CFRP・GFRP(ネフマック)が芯材として使用されている。写真-1に中間杭芯材(ネフマック)を示す。

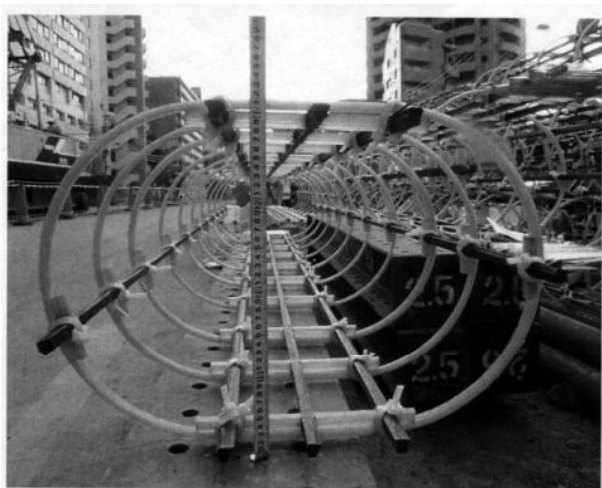


写真-1 ネフマック杭芯材

表-1 シールド諸元

本体関係	シールド機外径	φ 11.42 m
	シールド機長	10.01 m (カッタビット除く)
カッタ	回転数	0.5 rpm
	掘削トルク	16,121 kN・m(100%) 19,345 kN・m(120%)
	α 値	10.82 kN/m ² (100%) 12.99 kN/m ² (120%)
シールド	シールドジャッキ	3,000 kN×2,350 st×35 MPa×36 no.
	総推力	108,000 kN
	切羽単位当り推力	1,054 kN/m ²

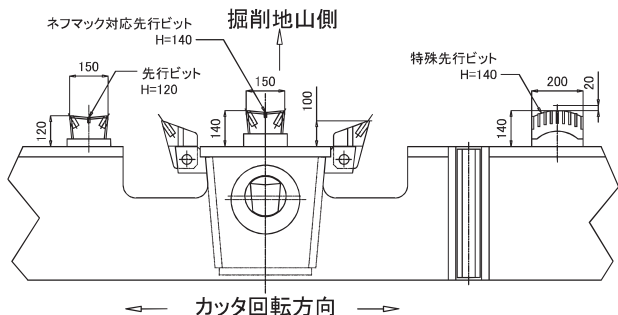


図-4 ビット高低差配置

2-4 シールド諸元およびビット仕様

本工事で使用したシールド機諸元を表-1に示す。

掘削の基本的な考え方として、土砂に対してはカッタビット主体、ネフマックを使用した中間杭およびNOMST壁に対しては先行ビット主体で掘削を行うものとした。NOMST壁掘削において最も重要な先行ビットの仕様決定に関して、下記摩耗対策を講じた。

(1) ビットの高低差配置

チップの欠損や割れにより予想外に摩耗が促進した場合を想定し、先行ビットに高低差をつけて同一軌跡上に配置した。本機では、ネフマック対応用ビット高さをH=140mmとし、ビットの摩耗限界である20mmを考慮し、先行ビット高さをH=120mmとして外周部に配置した。カッタビットは先行ビットの摩耗を考慮し、さらに20mm低くH=100mmとした。ビット高低差配置を図-4に示す。

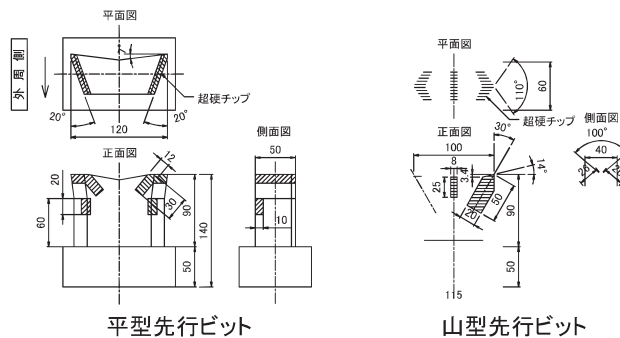


図-5 先行ビット形状

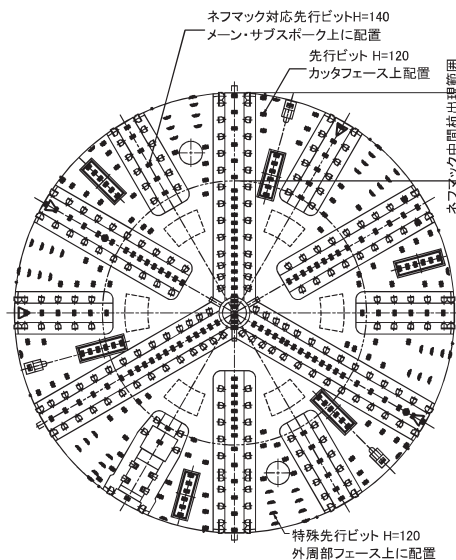


図-6 ビット全体配置

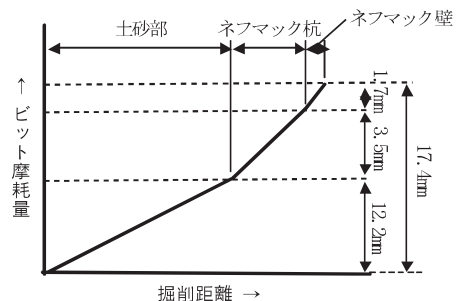


図-7 ビット摩耗量推定結果

(2) ビット形状

先行ビット形状は、平型と山型の2種類に大別できる。先行ビット形状選定において、ビット形状の違いによる特性、および当社における過去の実績を考慮した結果、ビット摩耗に対して、より有利であると考えられる平型ビットを採用した。先行ビット形状を図-5に、ビット全体配置を図-6に示す。

§ 3. ビット摩耗量推定

NOMST壁切削実績からビット摩耗量を検討した結果、図-7に示すように、往路単独でのビット摩耗量を17.4mmと推定した。土砂部、ネフマック杭、ネフマ

ック壁各々のビット摩耗計算根拠を以下に示す。

(1) 土砂部掘削

シールド機メーカーの実績より下記計算式から求めた。

$$\delta_1 = \alpha \times d_{g1} \times \beta = 8 \times 10^{-3} \times 5.10 \times 10^2 \times 3 = 12.2 \text{ mm}$$

ここに、 α ：ビット摩耗係数

d_{g1} ：カッタビット摺動距離 (km)

β ：パス補正係数

ただし

$$\begin{aligned} d_{g1} &= \pi \times D \times N \times L_{E1} / (V_1 \times 10^{-3}) \\ &= \pi \times 11.42 \times 0.50 \times 568.7 / (20 \times 10^{-3}) \\ &= 5.10 \times 10^5 \text{ m} \\ &= 5.10 \times 10^2 \text{ km} \end{aligned}$$

ここに、 D ：シールド機外径 (m)

N ：カッタ回転数 (rpm)

L_{E1} ：土砂掘削距離 (m)

V_1 ：シールド掘進速度 (m/min)

(2) ネフマック壁切削

モルタル壁（設計強度 80 N/mm² ϕ 30 mm CFRP 補強筋入り）切削実験により得られた以下の実験式から、ネフマック壁切削におけるカッタビット摩耗量を推定した。

$$\delta_2 = \gamma \times d_{g2}^{0.4080} = 0.4832 \times 21.5^{0.4080} = 1.7 \text{ mm}$$

ここに、 γ ：NOMST ビット摩耗係数

d_{g2} ：ビット摺動距離 (km)

ただし

$$\begin{aligned} d_{g2} &= \pi \times D \times N \times L_{E2} / (V_2 \times 10^{-3}) \\ &= \pi \times 11.42 \times 0.50 \times 1.2 / (1.0 \times 10^{-3}) \\ &= 21500 \text{ m} = 21.5 \text{ km} \end{aligned}$$

(3) ネフマック杭掘削

(2)と同様の実験式を用いて、ネフマック杭列切削時のカッタビット摩耗量を推定した。

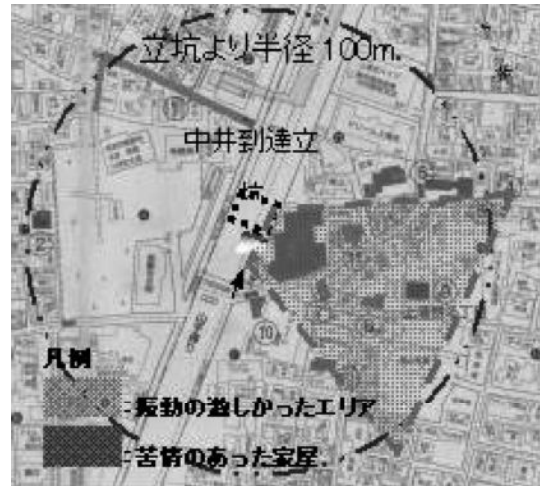
摺動距離 d_{g3} は ϕ 800 mm のネフマック杭が片側掘削あたり 44 本存在することから、以下のとおりとなった。

ネフマック杭掘削における掘進速度は 5 mm/min を想定した。

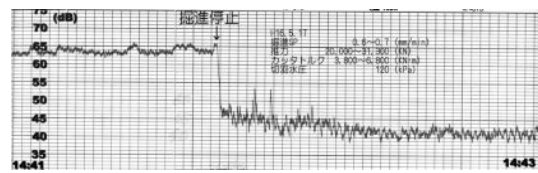
$$\delta_3 = \gamma \times d_{g3}^{0.4080} = 0.4832 \times (1.26 \times 10^2)^{0.4080} = 3.5 \text{ (mm)}$$

ただし

$$\begin{aligned} d_{g3} &= \pi \times D \times N \times L_{E3} / (V_3 \times 10^{-3}) \\ &= \pi \times 11.42 \times 0.50 \times 0.8 \times 44 / (5.0 \times 10^{-3}) \\ &= 126287.0 \text{ (m)} = 1.26 \times 10^2 \text{ (km)} \end{aligned}$$



図中⑫地点における掘進中の振動データ



図一8 振動発生平面図及び計測結果

(4) 摩耗量計算結果

前述の摩耗量計算により、路線の片側を施工した場合のビット摩耗量を以下に示す。

$\Sigma \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 12.2 + 1.7 + 3.5 = 17.4 \text{ mm} < 20 \text{ mm}$
 上記計算結果より、先行ビットの摩耗限界である 20 mm 以下となり、先行ビットは路線の片側掘削に十分耐えると判断した。

§ 4. 施工実績

4-1 内回り線到達におけるネフマック壁掘削

到達ネフマック壁掘削においては、切削速度を 1.0 mm/min 以下としたが、掘削開始直後から到達立坑周辺の広範囲（半径 100 m 程度）において 65 dB の振動が発生した。図一8 に振動発生平面図及び計測結果を示す。

この時の掘削トルクは最大約 9,000 kN・m を記録した。

その後、振動低減対策として掘進スピード、カッタ回転方向、ジャッキパターン変更等を行ったが、振動に改善は見られなかった。そこで、ネフマック壁 $t=1,200 \text{ mm}$ のうち、151 mm を切削したところでシールド機による掘削を断念し、機械壊しによる迎え掘りを実施し、内回り線のシールドを到達した。

4-2 内回り線到達後のビット調査

内回り線到達後、シールド機ビット摩耗に関する調査を行い、調査結果と理論計算のデータ比較を行った。ビット調査位置を図一9、ネフマック先行ビット計測結果

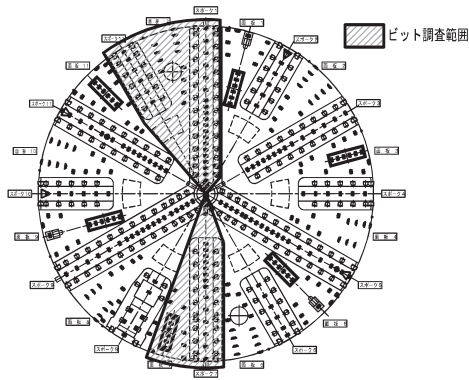


図-9 ビット調査位置

とビット理論計算の比較を表-2に示す。

ネフマック先行ビット, 特殊先行ビット, 先行ビット, カッタビットそれぞれについて調査した結果は, 以下のとおりであった。

- ① カッタビットにはほとんど摩耗が見られなかった。
- ② 特殊先行ビットの摩耗量は概ね 30 mm であった。
- ③ ネフマック先行ビットの摩耗が激しく, 特に外周側のネフマック杭出現位置 (No. 1~No. 6) のビットはすべてチップの欠損がみられた。
- ④ 杭の出現位置を境界として, その内周側のネフマック先行ビットは 0 mm~5 mm と摩耗量が少なかった (表-2 中の No. 7~No. 19)。
- ⑤ 外周側の損傷が激しいネフマック先行ビットと同一軌道上の先行ビット (H=120 mm) についても, 5 mm~13 mm と摩耗が激しかったが, 杭の出現しない内周側はすべて 3 mm 以下の摩耗量であった。

表-2 ネフマック対応先行ビット調査結果

計測箇所	摩耗量 (mm)		差異 (mm)	パス	ビット 摺動半径 (mm)	備考
	計測値	理論値				
1	—	15.5	—	4	11,250	※チップ欠損
2	—	14.5	—	2	10,410	※チップ欠損
3	—	13.5	—	2	9,570	※チップ欠損
4	—	12.5	—	2	8,730	※チップ欠損
5	—	11.6	—	2	7,890	※チップ欠損
6	—	10.5	—	2	7,050	※チップ欠損
7	5.0	7.4	+2.4	2	6,350	
8	5.0	6.9	+1.9	2	5,930	
9	2.0	6.4	+4.4	2	5,510	
10	1.0	6.0	+5.0	2	5,090	
11	1.0	5.5	+4.5	2	4,670	
12	1.0	5.0	+4.0	1	4,250	
13	1.0	4.6	+3.6	1	3,830	
14	0.0	4.1	+4.1	1	3,410	
15	0.0	3.6	+3.6	1	2,990	
16	0.0	3.1	+3.1	1	2,570	
17	0.0	2.7	+2.7	1	2,150	
18	0.0	2.2	+2.2	1	1,730	
19	0.0	1.7	+1.7	1	1,310	

4-3 ビット摩耗原因の推定

ビット摩耗調査結果から推定される異常摩耗の原因は以下のとおりである。

- ① ビット軌道毎の理論計算と調査結果の対比から, ネフマック杭の出現する位置を境として, 明らかに摩耗状態が異なる。よって, ネフマック杭の切削がビットの異常摩耗になんらかの影響を与えている可能性が高い。
- ② シールド発進部に位置する上半断面の礫層について, 中央部の約 600 mm を除くすべてのビットが礫層断面を掘削することから, 礫層が異常摩耗の一因とは考えにくい。
- ③ 到達部ネフマック壁の切削によるチップ脱落の可能性については,
 - 1) ネフマック壁の切削を 151 mm しか行っていない。
 - 2) チップが欠損しているネフマック先行ビット (H=140 mm) と同一軌道上の先行ビット (H=120 mm) がすでに 2 mm~13 mm も摩耗している。
 上記2点の事実から, ネフマック壁の掘削以前にチップが脱落していたと判断した。

4-4 先行ビットの異常摩耗原因

4-3の検討結果と, ネフマック杭掘削の理論摩耗計算によるネフマック杭がビット異常摩耗の原因となっている事実と相違があるため, 次のように推定した。

- ① ネフマック杭と地山の固さが著しく異なるため, ネフマック杭の掘削断面をビットが通過した直後, 推力の影響を受けジャッキスピードが一時的に変動し, 次に同一軌跡上の先行ビットがネフマック杭断面を通過する際, 瞬間的に切り込み量が大きくなるため,

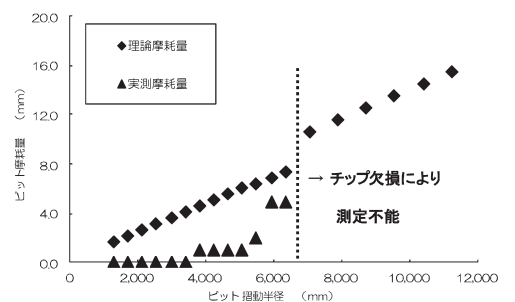
内回り INPUT DATA

ネフマック壁掘削 sp	1.00 mm/min
ネフマック杭掘進 sp	5.00 mm/min
土砂部掘削 sp	20.00 mm/min
カッタ回転速度	0.50 rpm
ネフマック壁厚	151 mm
ネフマック杭掘進長	35.2 m
土砂部掘削距離	533.5 m
ビット磨耗係数	8.E-03
パス補正	3.0

※一は測定不能

↑ネフマック杭出現範囲

内回り線先行ビット摩耗データ



外周部チップ脱落

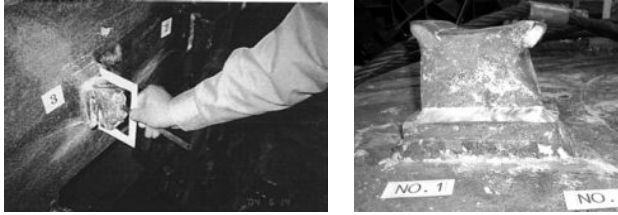


写真-2 先行ビット摩耗状況

チップに衝撃が加わる。その繰り返しの衝撃により、ビットが徐々に摩耗し、チップが欠損していったのではないか。

- ② 先行ビットのチップ重量が小さく、衝撃に対する耐力が不足しているのではないか。
- ③ 今回採用した平型ビットは、調査した結果から台座の部分が大きくえぐられたように摩耗している事から、チップが寿命を迎える前に、台座から脱落してしまったのではないか（写真-2）。

4-5 外回り線用先行ビット形状の選定

上記推定に対する原因を直接特定することはできないが、外回り線掘削では、内回りで採用したビットに対してチップの体積が大きく、切削性に優れた山型ビットを採用した。

山型ビットは平型ビットに対し、耐摩耗性に劣る反面、ネフマック杭掘削については、耐摩耗性以前に、切削性および耐衝撃性が重要な要素であると考えられるため、チップの食い込み性に優れた山型ビットが有利であると判断した。

4-6 外回り線発進におけるネフマック壁掘削

回転立坑でのビット交換完了後、外回り線発進においてネフマック壁の掘削を行った。内回り線と同様、切削速度は約 1.0 mm/min とした。

シールド機ビット交換後の外回り線発進では、ネフマック壁の掘削後半において、シールド直上で多少の振動 (60 dB 未満) は計測されたものの、特に大きな問題とならなかった。

連壁掘削後半にカットトルクのピーク値を記録したが、この時のトルクは最大 7,200 kN・m であり、内回り線到達時の掘削データと比較して、2,000 kN・m ほど低い値となった。以上の結果から、先行ビットの微小な摩耗が、振動発生の原因であると判断した。

4-7 外回り線到達後のビット調査

外回り線到達後、内回り線と同様、ビット摩耗に関する調査を行った。表-3 にネフマック先行ビット計測調査結果を示す。調査結果は以下のとおりである。

- ① No. 1~No. 6 のネフマック杭出現範囲の先行ビットについて、平型から山型への形状変更により、平型ビットはチップ欠損で計測不可能であったが、山型ビットは理論値 -4.0 mm ~ +2.0 mm という結果となった。
- ② No. 7~No. 12 のネフマック杭出現範囲外で、平型から山型へと形状変更を行ったビットに関して、平型ビットが理論値 +1.9 mm ~ +5.0 mm であるのに対し、山型ビットは理論値 -2.3 mm ~ +2.7 mm であり、平型ビットが耐摩耗性に優れる結果となった。
- ③ No. 12~No. 19 の形状変更を行っていないビット

表-3 ネフマック対応先行ビット調査結果

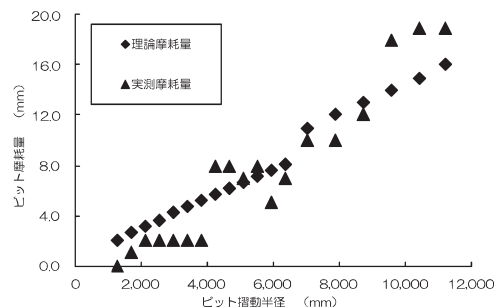
計測箇所	摩耗量 (mm)		差異 (mm)	パス	ビット摺動半径 (mm)	備考
	計測値	理論値				
1	19.0	16.0	-3.0	4	11,250	ビット形状変更
2	19.0	15.0	-4.0	2	10,410	ビット形状変更
3	18.0	14.0	-4.0	2	9,570	ビット形状変更
4	12.0	13.0	+1.0	2	8,730	ビット形状変更
5	10.0	12.0	+2.0	2	7,890	ビット形状変更
6	10.0	11.0	+1.0	2	7,050	ビット形状変更
7	7.0	8.1	+1.1	2	6,350	ビット形状変更
8	5.0	7.7	+2.7	2	5,930	ビット形状変更
9	8.0	7.2	-0.8	2	5,510	ビット形状変更
10	7.0	6.7	-0.3	2	5,090	ビット形状変更
11	8.0	6.2	-1.8	2	4,670	ビット形状変更
12	8.0	5.7	-2.3	1	4,250	ビット形状変更
13	2.0	5.2	+3.2	1	3,830	形状変更なし
14	2.0	4.7	+2.7	1	3,410	形状変更なし
15	2.0	4.2	+2.2	1	2,990	形状変更なし
16	2.0	3.7	+1.7	1	2,570	形状変更なし
17	2.0	3.2	+1.2	1	2,150	形状変更なし
18	1.0	2.6	+1.6	1	1,730	形状変更なし
19	0.0	2.1	+2.1	1	1,310	形状変更なし

外回り INPUT DATA

- ネフマック壁掘削 sp 1.00 mm/min
- ネフマック杭掘削 sp 7.00 mm/min
- 土砂部掘削 sp 20.00 mm/min
- カット回転速度 0.50 rpm
- ネフマック壁厚 1200 mm
- ネフマック杭掘削長 35.2 m
- 土砂部掘削距離 533.5 m
- ビット摩耗係数 8.E-03
- パス補正 3.0

↑ネフマック杭出現範囲

外回り線先行ビット摩耗データ



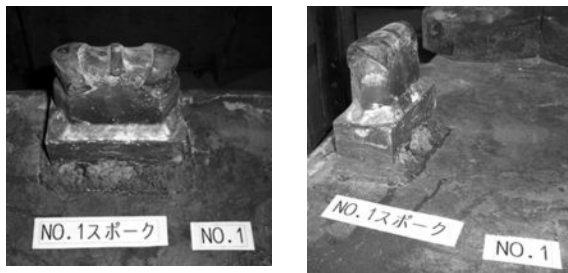


写真-3 最外周ネフマック対応先行ビット摩耗状況

のデータについて、内回り線が理論値+1.7 mm ~ +4.1 mm に対し、外回り線は理論値+1.2 mm ~ +3.2 mm と、ほぼ同様な計測結果となった。

4-8 ビット調査結果の考察

前述のビット摩耗量調査結果より考察を以下に示す。

- ① 内回り線、外回り線の形状変更を行っていないビットの摩耗結果に相違が見られないことから、内回り線にのみ異常摩耗に対する特異な条件があったとは考えられない。
- ② ネフマック杭出現範囲外のビット摩耗データ比較から、平型ビットは山型ビットに比べて耐摩耗性に優れる結果となった。
- ③ 平型ビットは耐摩耗性という点で優れた特性を有しているが、ネフマック杭の切削に対しては、チップの欠損を起こした。

以上の結果から、山型ビットは、土砂に対する耐摩耗性では劣るものの、チップ欠損等の偏摩耗がみられず、ネフマック杭切削時の衝撃に対しても十分な耐力を持っていることが証明された。写真-3 に最外周ネフマック対応先行ビット摩耗状況を示す。

4-9 今後への課題

今回の施工で明確になった課題は次のとおりである。

- ① NOMST 工法による発進・到達は、在来工法に比

べ、工期短縮、コスト削減、機械壊しによる騒音・振動の発生がない等の大きなメリットを有するが、シールド機ビット摩耗による振動発生の可能性があり、計画段階においての対策が重要である。

- ② 先行ビットの仕様決定においては、摩耗への十分な配慮が必要であり、掘削対象となる地盤、掘削対象物等に合致した選定を行うことが重要である。

§5. まとめ

NOMST 工法による発進・到達においては、周辺環境、近接構造物等の事前調査に基づいた対策を行うことが重要であると共に、NOMST 壁掘削による振動が、特に市街地における工事の進捗に著しい障害を及ぼす可能性があることを十分に認識すべきである。今回の施工と同様に、NOMST 壁掘削ではビット刃先端の微小な摩耗が振動を引き起こす原因となることもあるため、特に到達における掘削においては、ビット摩耗対策だけでは NOMST 工法による確実な到達ができない場合がある。

先行ビットに対する摩耗対策として、チップの材質、パス数、ビット高低差配置、ビット形状による対応が重要である。さらに、NOMST 壁掘削は、摩耗の極力少ない状態のビットを使用することが重要であるため、先行ビット交換装置が有効な手段であると考えられる。

NOMST 工法の有する経済性、工期短縮、低騒音・低振動といったメリットを最大限生かすため、今後はコンクリート配合・材質や、芯材の更なる切削性向上に関する検討を期待するものである。

謝辞：本工事の施工にあたり、多大なるご指導、ご協力を頂きました本社土木設計部、本社機材部、関東支店土木部、三菱重工業㈱、および関係各位の皆様には厚く御礼申し上げます。