

13. 模擬地盤供試体を用いた切削実験による シールドマシン用カッタビットの材種選定に関する研究

呉工業高等専門学校

大成建設株式会社

株式会社丸和技研

○森田 和也，重松 尚久

森田 泰司

佐々木 誠，中濱 和久，嘉屋 文康

1. はじめに

シールド工法に使用されるシールドマシンには、カッタビット（以後、ビットと呼ぶ）が前面部に配置されており、それが地盤を掘削している。現在、シールド工法は長距離掘削や転石・礫混じり地盤および岩盤層での施工例が増大しており、そのような施工環境下においては、施工中に地盤内の礫や転石との接触によって、ビット先端に付いている超硬チップ（以後、チップと呼ぶ）が破損し、掘削能力の低下を引き起こす¹⁾。シールド工法で主に用いられているチップの材種は、JIS M3916（2013 年廃止）の「鉋山工具用超硬チップ」の規格で、主に E5（HRA 86.0・抗折力 2.0GPa）と呼ばれる材種を使用している。しかし、このチップの規格は削岩機に使用するチップの規格であり、チップに作用する外力特性はシールドマシンのビットと大きく異なる。そのため、転石等によってチップに損傷が起こるメカニズムを解明し、新しいチップの規格を定めていく必要がある。

本来、チップの硬さによる耐摩耗性と破壊靱性は相反する関係にある。そこで、理想の材料として、掘削による摩耗量が少なく、チップに割れや欠けが起きづらいチップの材料選定を進めている。本研究では、超硬メーカーが規定しているチップの中から、硬さの値が異なる 5 つの材種を抽出し、各種実験を行ってきた^{2), 3), 4)}。今回の実験ではトンネル掘削時の地盤内の状況を再現した供試体をビットによって切削し、その際に各ビットに作用する垂直力・トルク・ひずみを測定し、欠損特性評価を行った。

2. シールドマシン用ビットの問題点

掘削中におけるビットの損傷には礫や転石との接触によるチップの欠損と、掘削によるビットの摩耗の 2 つがある。これらがビットの掘削能力の低下を引き起こし、工期の長期化や工事費用の増加につながる事が問題となっている。

写真-1 に礫層地盤・砂層地盤掘削後のビットの

例を示す。礫層での掘削では、地盤内の転石などに接触する回数が多く、チップの先が割れるようにして破損している。このように、チップに欠損が起きると掘削能力が大きく低下し、掘削不能となる。対して、砂層では礫層の掘削時と異なり、チップに大きな欠損は見られないが、チップの中央部と母材が摩耗し、削られている。これは、ビットが施工中に砂層での掘削を行ったことで、掘削した直後の砂がビット背面に接触し、すり減る背面摩耗と呼ばれる現象が起き、チップと母材が摩耗してこのような状態となった。このようなチップの欠損と摩耗はシールドマシンの掘削能力に大きく関与するため、欠損と摩耗の両方に強いチップが求められている。

3. 実験詳細

3.1 実験用ビット

表-1 に実験で用いた CASE ごとのチップの硬さを示す。硬さの値が大きい CASE ほどチップは硬く、



写真-1 地盤掘削後のビット例

表-1 実験用チップの硬さ

	硬さ（HRA）	備考
CASE1	91.5	
CASE2	90.0	
CASE3	88.0	E3
CASE4	86.5	E5
CASE5	83.0	

掘削中の耐摩耗性に優れる。しかし、衝撃に弱くチップに欠損が起きやすいと考えられている。実験用ビットは硬さの異なる5種類のチップを用いた。なお、CASE4がE5、CASE3がE3規格の材種である。実験数は各6個、そのうち2個ずつひずみ計測を実施した。図-1に実験で使用したビットの形状とひずみゲージ貼付位置を示す。SS400を用いた母材の先端にチップをろう付けしたビットを使用した。ビットの形状は高さ60mm、幅50mm、奥行き65mmであり、ビットに付けたチップの体積は24,293.7mm³である。また、切削実験中のビットとチップ表面の挙動を測定するために、1軸ひずみゲージを母材下面に1枚貼付し、2軸ひずみゲージをチップ前面に2枚貼付した。

3.2 実験装置と供試体

図-2に実験装置概要図を示す。実験装置の寸法は高さ1,750mm、幅700mm、奥行き700mmである。実験装置には直径400mm、厚さ10mmの鋼製円盤のターンテーブルと回転を行うためのモーター、垂直力とトルクを測定するロードセル（許容垂直力50kN、許容トルク2kN・m）と荷重を制御できる油圧シリンダが付いている。また、ビットとロードセルの間にはビット取付治具を設置し、ボルトによって固定した。

供試体は、全体の1/8の大きさの花崗岩を入れた型枠にモルタルを打設することで、礫を含む地盤内を切削するビットに近い状況を再現した。モルタルを同じ配合設計で2回に分けて打設し、4週間圧縮強度は49.1N/mm²と43.2N/mm²となった。また、花崗岩の圧縮強度は177.0N/mm²である。

3.3 実験方法

図-3に実験イメージ図を示す。実験では油圧シリンダによって荷重を25.0kNに設定し、ターンテーブルによって2rpmの速度で回転させた供試体にビット中心と供試体中心の距離が50mmとなる位置のモルタル上にビットを押し付けた。切削範囲はモルタル上から花崗岩へ乗り上げ、通過するまでとし、実験中に生じた垂直力・トルク・ひずみを測定した。また、今回の実験では、ビットの割れを再現するために花崗岩を供試体から取り外し、花崗岩の下に鉄板を入れてモルタルに対し5mmの段差を作った状態で切削を行った。

4. 結果と考察

4.1 各 CASE の欠損

表-2に各 CASE の欠損が起きたビットと起きていないビットの個数及び欠損の起きた確率を示す。最も硬いCASE1、そしてCASE3は実験によってチップに欠損が起きた回数が最も多く、欠損確率は80%を超えた。その他のCASEではCASE2、CASE4、CASE5の順に欠損が起こる確率が低くな

り、特にCASE5は欠損が起きづらかった。このことから、チップが軟らかいほど欠損の起こる確率は低くなる傾向にあると言える。

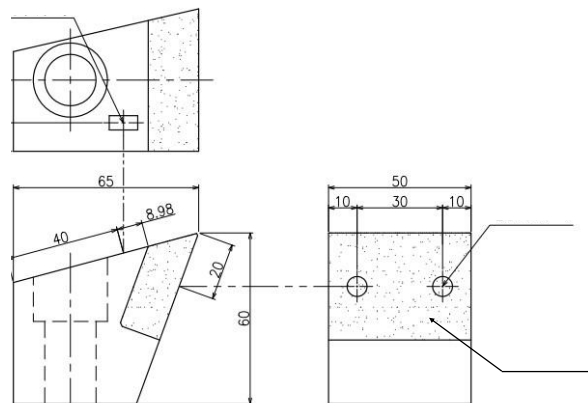


図-1 実験用ビット寸法とひずみゲージ貼付位置

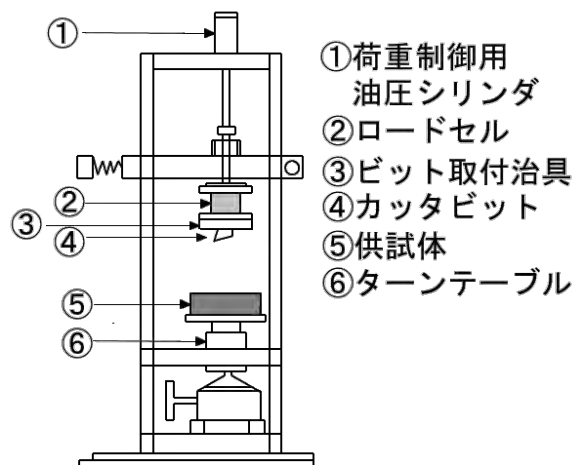


図-2 実験装置概要図

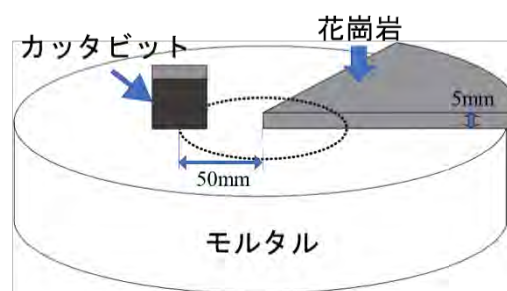


図-3 実験イメージ図

表-2 各 CASE の欠損確率

	欠損あり	欠損無し	欠損確率(%)
CASE1	5	1	83
CASE2	4	2	67
CASE3	5	1	83
CASE4	3	3	50
CASE5	1	5	17

表-3 にチップに起きた欠損が最大・最小となったビットを CASE ごとに示す。なお、CASE5 は 1 体しか欠損が起きなかったため、欠損が最大のもののみとなっている。欠損が小さかったチップを CASE ごとに比較すると、CASE1 はチップの割れが最も大きく、チップ右側（外側）が根元まで欠損し、その他の CASE ではチップ右上のみが小さく割れた。割れの大きかったチップを CASE ごとに比較すると、CASE1 のビットはチップ前面のほとんどが破損しており、他の CASE に比べてチップの欠損の度合いが激しいことが分かる。

図-4 に欠損体積率と硬さの関係を各 CASE の平均値で示す。なお、欠損体積率は欠損が起きたチップの体積と元のチップの体積との比とする。CASE1 は欠損体積率の平均値が約 50%であり、他の CASE に比べ 4 倍以上の大きさであった。また、チップ全体の 70%以上が欠けたビットもあった。CASE2, CASE3, CASE4 の欠損体積率は CASE1 と違い、どれも 10%前後であり、欠損体積率の差はあまり見られなかった。CASE5 は 1 個のビットしか欠損が起きていないが、その欠損体積率は他の CASE の平均値を下回った。

これらの結果より、最も硬い CASE1 は欠損が起きる確率が高く、欠損の度合いも激しくなる傾向にあり、対して最も軟らかい CASE5 は欠損が起きる確率が低く、欠損の度合いも小さい傾向にあることが分かる。また、CASE2, CASE3, CASE4 は欠損の起きる確率に多少の違いはあるが、欠損体積率はほぼ同等なため、硬さの違いによる欠損体積率の差は CASE2~CASE4 の間にほぼ無いと言える。

4.2 時間ごとの垂直力・トルク

一例として、図-5 に CASE2 における時間と垂直力の関係を欠損の有無で分けて示す。垂直力は実験装置によって制御しており、常に一定の荷重をかけているが、供試体上に作った段差によって切削中にロードセルにかかる負担が増減し、値が時間ごとに変化した。時間における垂直力の値は、どの CASE も欠損の有無に関わらず同様の変化を示した。まず、垂直力はビットを供試体へ押し付けた瞬間に大きく増加したが、その後のモルタル上での切削では 25kN 前後に収束した。ビットが花崗岩を切削し、花崗岩上に乗り上げると垂直力は急激に増加して実験中最大の値となり、その後の花崗岩上の切削中に生じた垂直力はモルタル上よりも大きいものとなった。ビットが花崗岩に乗り上げて垂直力が最大の値となった約 3 秒後に垂直力は急激に減少しているが、これはビットが花崗岩を通り過ぎてモルタル上に移った瞬間に計測された値であり、花崗岩とモルタルの間にある段差をビットが落ちる際にロードセルにかかる負荷が一時的に消えたため、垂直力は一時的に大きく減少

表-3 各 CASE の欠損の大きさの比較

	欠損最大	欠損最小
CASE1		
CASE2		
CASE3		
CASE4		
CASE5		

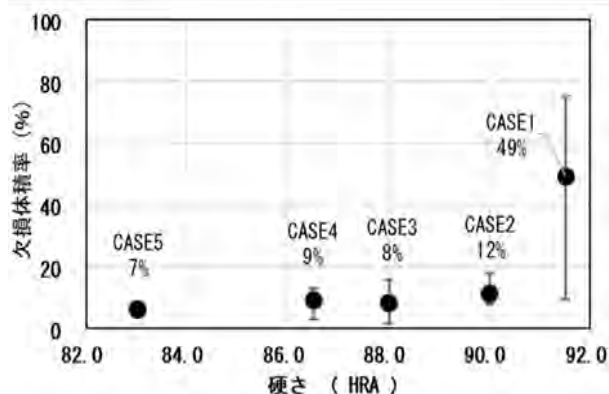


図-4 各 CASE の欠損体積率

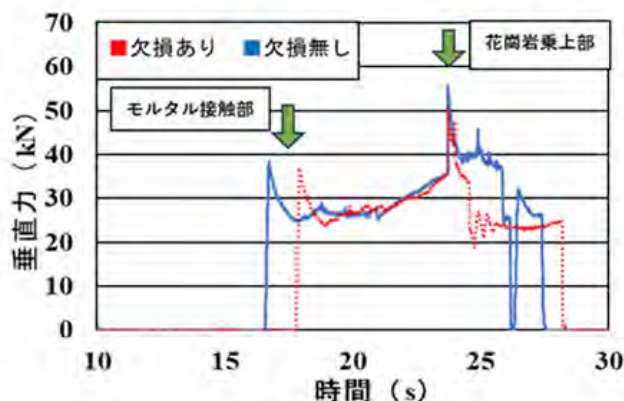


図-5 計測時間における垂直力値 (CASE2)

したと考えられる。すべての CASE でモルタル上での切削は垂直力が 25kN 前後に収束したため、実験装置によって全てのビットに同等の荷重で実験を行うことができていたと言える。

図-6 に CASE2 における時間とトルクの関係を示す。トルクは花崗岩に接触した瞬間から徐々に増加し、花崗岩切削時に最大となった。トルクも垂直力と同様に、時間による値の変化にビットの欠損の有無による差は見られず、供試体上でのビットによる切削量によって変化した。また、花崗岩上ではモルタル上よりもトルクの値が大きくなり、値の増減も激しくなる傾向があったが、これは花崗岩上に乗り上げ垂直力が増加したことによって、ビットによる花崗岩の切削量が増えたからだと考えられる。

4.3 各 CASE の最大トルク

図-7 に各 CASE の最大トルクとその平均値を示す。各 CASE の平均値を見ると、チップが軟らかくなるにつれて最大トルクは増加傾向にあった。また、CASE1 から CASE3 においては、最大トルクが $2500\text{N} \cdot \text{m}$ を超えると必ず欠損が起きたが、チップの靱性が大きい CASE4 と CASE5 は最大トルクが $2500\text{N} \cdot \text{m}$ を超えても欠損が起きていないものが存在した。このことから、チップが軟らかいほどトルクによる負荷に耐えることができると考えられる。

4.4 チップに生じたひずみ

図-8 に花崗岩切削時のチップ内側・外側における鉛直方向のひずみの増加率を示す。花崗岩切削時にひずみは増加し、その増加率は欠損が起きたチップ外側が大きくなる傾向にあったため、チップの欠損はひずみの急激な増加によって起きたと考えられる。また、他の CASE と違い、チップ前面が大きく欠損した CASE1 は、内側のひずみの値も大きく増加した。このことから、増加率が 200% を超えると欠損が生じる可能性が高くなる傾向にあると言える。

5. まとめ

- 1) チップが軟らかいほど、欠損の起こる確率は低くなる傾向にある。
- 2) CASE1 は欠損が起きた場合の欠損体積率が他の CASE よりも 4 倍以上大きく、CASE5 は最も小さくなった。しかし、CASE2 から CASE4 に欠損体積率の違いがあまり見られなかった。
- 3) 軟らかいチップほど大きいトルクに耐えられる傾向にある
- 4) ひずみの急増がチップの割れを引き起こした。

また、今回は実験数が各 6 個であったため、今後追加実験を行い実験結果の精度を向上させる必要がある。

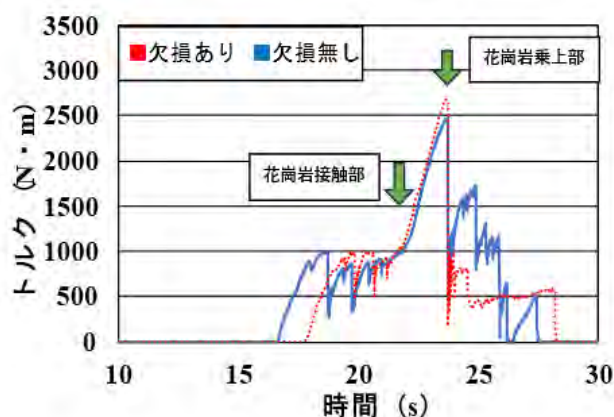


図-6 計測時間におけるトルク値 (CASE2)

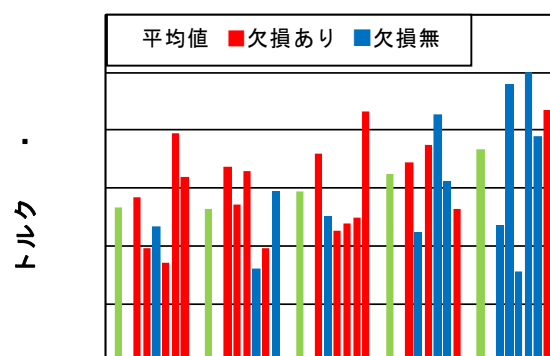


図-7 CASE ごとの最大トルク

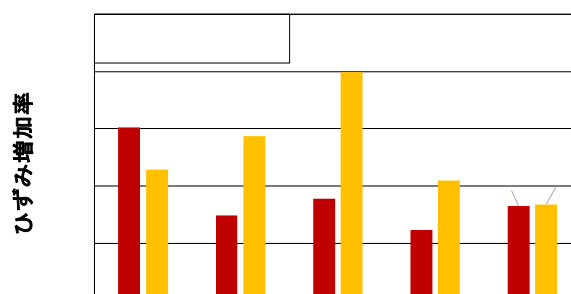


図-8 ひずみの増加率

参考文献

- 1) 佐々木誠, 嘉屋文康, 森田泰司: シールドマシン用ビットの最適超硬チップ選定の検討, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, VI-379, 2021.
- 2) 森田泰司, 佐々木誠, 嘉屋文康: 実工事で使用した多層チップの効果の検証, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, VI-988, 2020.
- 3) 森田泰司, 佐々木誠, 嘉屋文康, 磯部 将吾: 切削実験によるシールドマシン用ビットの最適超硬チップ選定の検討, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VI-754, 2022.
- 4) 森田和也, 重松尚久, 佐々木誠, 嘉屋文康, 森田泰司: シールドマシン用カットビットの摩耗特性評価に関する研究, 第 35 回日本道路会議, 6013, 2023.