

大谷石に対するバケットツースの三角波振動掘削特性

Triangular vibro-cutting of a bucket tooth for a tuffaceous rock

室 達朗*・河野幸一*

Tatsuro MURO* and Koichi KOHNO*

The purpose of this paper is to explore experimentally the characteristics of a triangular vibro-cutting of rock material using a bucket tooth. This vibration assisted cutting of rock with toothed tynes and buckets is emerging as a process of potential major industrial significance. Here, the effects of frequency, amplitude of displacement of triangular vibro-cutting, cutting velocity and depth of cutting on a maximum excavation force were investigated for a tuffaceous rock. It was verified that either ratio of a horizontal component of the maximum excavation force or a specific energy at vibro-cutting and that at non-vibration decreased hyperbolically with the increment of velocity ratio but increased parabolically with the increment of depth of cutting.

Key words : Vibro-cutting, Bucket Tooth, Tuffaceous rock; Frequency, Excavation force, Specific energy, Velocity ratio

1. まえがき

最近の建設施工分野においては、周辺環境の制約により岩盤の発破作業が禁止される場合が多く、機械化掘削が余儀なくされている。従って、より効率的に、かつ低コストで機械化掘削を実行するための方策を早急に確立していくことが重要である。本研究の目的は、流紋岩質軽石凝灰岩の一種である大谷石に対するバケットツースの三角波振動掘削特性を実験的に明らかにすることである。ここでは、一定のすくい角を有する平刃に作用する動的な最大掘削力の大きさに及ぼす振動周波数、振幅、掘削速度および掘削深さの影響について、最大加振力 10kN と最大変位振幅 1.0cm を発揮する所定の振動掘削試験機を使用して調査を行った。この振動掘削試験機では、振動周波数 1 ~ 70Hz, 変位振幅 0 ~ 1.0cm に至る種々の三角波形の組合せが可能であり、出力 7.5kW の油圧ポンプユニットを介してサーボ弁によって制御することができる。動的な最大掘削力と振動周波数、振幅、掘削速度および掘削深さの関係を明らかにし、静的な最大掘削力との比較を行っている。その後、動的な比エネルギーと振動周波数、振幅、掘削速度および掘削深さの関係を解析し、静的な比エネルギーと比較している。さらに、動的な最大掘削力と静的な最大掘削力の比率、および動的な比エネルギーと静的な比エネルギーの比率が、振幅と角速度の積を掘削速度で除した速度比および掘削深さとともにどのように変化するかについて解析し、最適な掘削条件を明らかにしている。

* 愛媛大学工学部環境建設工学

* Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University

原稿受理 平成16年10月29日

2. 実験方法

2.1 試験装置

Fig.1 は、振動掘削試験装置の側面図を示したものである。この装置は、主として、種々の加振力を発生させるアクチュエータ、バケットツース、掘削諸力を計測するためのダイナモメータ、および岩石供試体を移動させるための搬送テーブルから構成されている。このアクチュエータは、サーボコントローラからの信号にตอบสนองするサーボ弁を経由して、ピストンが機械的に運動するための油圧エネルギーを伝達する役目を果たしている。ダイナモメータに直結されたバケットツースは、アクチュエータのピストン運動によって強制振動させられる。この振動掘削試験は、まず電動モータ B にスイッチが入り、搬送テーブルに載せられた岩石供試体がバケットツースに近付いてきて平刃に接触した瞬間から開始することができる。掘削速度 V は、岩石供試体を載せたテーブルの搬送速度を制御することによって 0.35 ~ 1.00 cm/s に調整することができる。バケットツースに接続したアクチュエータは、掘削深さを調整するための移動式フレームに設置されている。この移動式フレームの鉛直方向の位置決めは、試験装置の上部に設置した電動モータ A を駆動させることによって制御することができる。

2.2 バケットツースと作用荷重

Fig.2 は、幅 10mm、高さ 100mm、長さ 100mm の鋼製平刃からなるバケットツースの模型および作用荷重をスケッチしたものである。WC-Co 合金チップを先端に焼き嵌めたバケットツースの刃角は $\pi/4$ rad である。すくい角 α は $\pi/6$ rad、逃げ角 γ は $\pi/12$ rad である。ダイナモメータは水平方向掘削力 F_x 、および鉛直方向掘削力 F_z をそれぞれ計測するために設計製作された。

2.3 岩石供試体

軟岩供試体として、栃木県から採取された流紋岩質軽石凝灰岩が、当該振動掘削試験に提供された。偏向顕微鏡写真によると、その鉱物組成は、流紋岩や凝灰岩の岩片を含む軽石岩片 54%、石英結晶片 7%、斜長石結晶片 5%、マトリックス 34% であることが明らかにされた。岩石供試体の物理的特性は、見かけ比重 1.63 ± 0.02 、真比重 1.71 ± 0.04 、自然含水比 $3.70 \pm 0.15\%$ 、吸水率 $17.5 \pm 0.31\%$ 、一軸圧縮強度 10.30 ± 1.72 MPa、圧裂引張強度 1.46 ± 0.22 MPa、せん断強度 2.56 MPa、およびショア硬さ 23.4 ± 6.9 である。

2.4 実験条件

与えられた凝灰岩に対する三角波形の振動掘削試験が当該振動掘削試験装置を使用して実施された。実験条件である振動周波数 f は 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60,

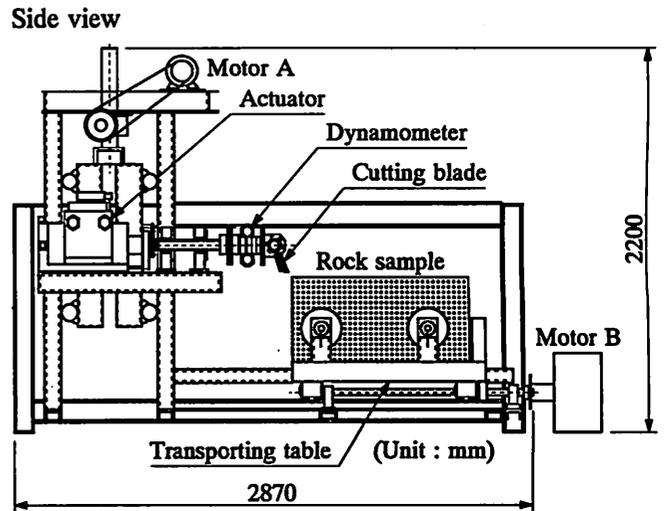


Fig.1 Side view of triangular vibro-cutting apparatus

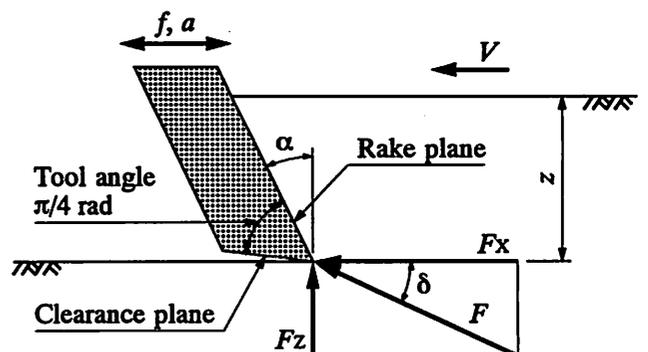


Fig.2 Several forces acting on bucket tooth

および70Hzの12通り、振幅 a は0.07, 0.09, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80, および1.00cmの10通り、掘削速度 V は0.35, 0.50, 0.65, 0.80および0.95cm/sの5通り、掘削深さ z は0.40, 0.80, 1.20, および1.60cmの4通り、すくい角 α は $\pi/6$ radの各組合せを対象として試験した。実際上は、各振動周波数に対する振幅の大きさは、アクチュエータの容量により、それぞれの振動周波数に対応する最大振幅以下の値にセットされた。主たる測定項目は、水平方向掘削力 F_x および鉛直方向掘削力 F_z である。これらの諸力は、1個の八角形リングからなる剛性の高いダイナモメータを用いて多チャンネル式サーマルレコーダに記録した。データのサンプリング間隔は、無振動と振動周波数2Hzでは500 μ s、振動周波数4Hzでは200 μ sとし、それより大きな振動周波数では100 μ sとし、デジタル記録した。

3. 実験結果

掘削合力 F の水平方向分力 F_x および鉛直方向分力 F_z は、前Fig.2に示す矢印の方向を正值としている。無振動時における F_x および F_z の経時変化は、Fig.3に示すように、時間 t とともに間歇的な挙動を示している。ここで、最大水平方向掘削力 F_{xm0} は F_x のピーク値10点の平均値であると定義する。

振動掘削試験においては、 F_x および F_z の経時変化は、Fig.4に示すように、時間 t とともにそれぞれの振動周波数に対応して鋭いジャンピング現象が発生しているのが観察される。ここで、最大水平方向掘削力 F_{xm} は、同様に F_x のピーク値10点の平均値であると定義する。

Table 1は、総計290通にも及ぶ振動周波数 f 、振幅 a 、掘削速度 V 、掘削深さ z 、すくい角 α のそれぞれの組合せにおいて実施された実験手順を示したものである。

岩石供試体に対するバケットツースの三角波振動方程式は次式で与えられる。

$$X = Vt - (-1)^n \times 2an + (-1)^n \times \frac{2a\omega t}{\pi} \quad (n: \text{整数}) \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = V + (-1)^n \times \frac{2a\omega}{\pi} = V + (-1)^n \times 4af \quad (2)$$

ここに、 X はバケットツースの変位、 ω はアクチュエータの角速度、 t は時間である。

Fig.5は、掘削速度 $V = 0.35$ cm/s、掘削深さ $z = 1.2$ cm、すくい角 $\alpha = \pi/6$ radにおける種々の振幅 a

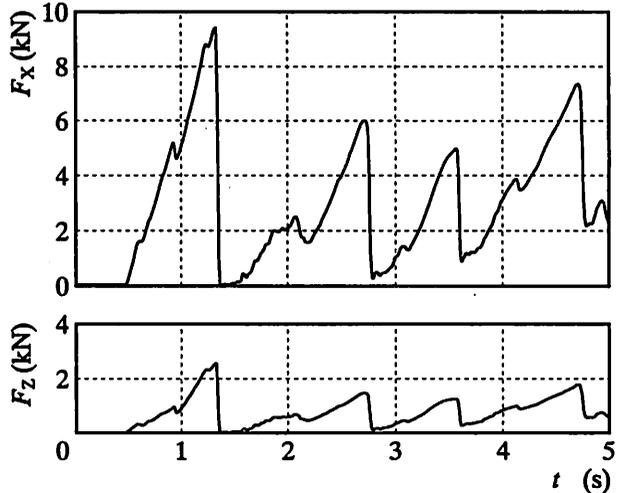


Fig.3 Variation of excavation force F_x and F_z with time t at non-vibration state ($f = 0$ Hz, $a = 0$ cm, $z = 1.2$ cm, $V = 0.35$ cm/s)

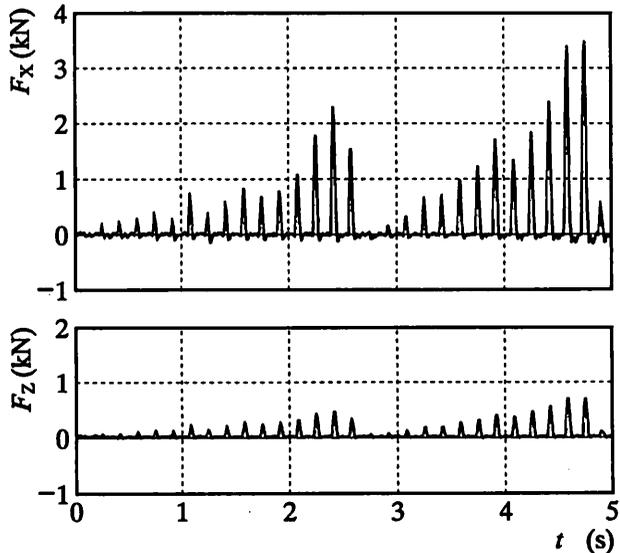


Fig.4 Variation of excavation force F_x and F_z with time t at triangular vibro-cutting state ($f = 6$ Hz, $a = 0.6$ cm, $z = 1.2$ cm, $V = 0.35$ cm/s)

Table 1 Procedure of triangular vibro-cutting test

No.	frequency f (Hz)	amplitude of displacement a (cm)	amplitude of velocity $4af$ (cm/s)	cutting velocity V (cm/s)	cutting depth z (cm)	rake angle α (rad)
1	2	0.20 ~ 1.00	1.6 ~ 8.0	0.35	0.40	$\pi/6$
2	4	0.20 ~ 1.00	3.2 ~ 16.0			
3	6	0.20 ~ 1.00	4.8 ~ 24.0			
4	8	0.20 ~ 0.80	6.4 ~ 25.6			
5	10	0.20 ~ 0.60	8.0 ~ 24.0			
6	20	0.20 ~ 0.30	16.0 ~ 24.0			
7	30	0.20	24.0	0.95	1.60	
8	40	0.15	24.0			
9	50	0.10	20.0			
10	60	0.09	21.6			
11	70	0.07	19.6			

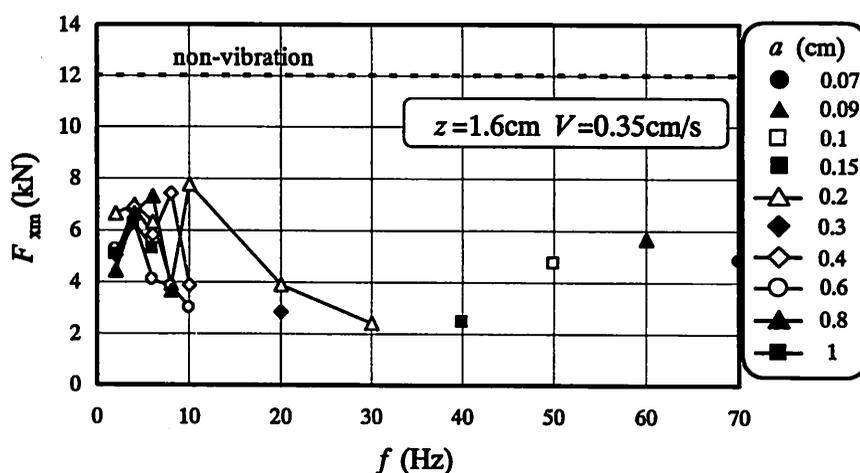


Fig.5 Relationship between dynamic maximum horizontal component of excavation force F_{xm} and frequency f for various amplitudes of displacement a

に対する動的最大水平方向掘削力 F_{xm} と振動周波数 f との関係を無振動時の静的最大水平方向掘削力 F_{xm0} と比較して示したものである。図より明らかに、 F_{xm} は、 $f = 20\text{Hz}$ 、 $a = 0.30\text{cm}$ または $f = 30\text{Hz}$ 、 $a = 0.20\text{cm}$ において最小値を取っている。また、 F_{xm} は、 $f = 30\text{Hz}$ において静的な値 F_{xm0} に対して最大 60 ~ 70% も減少していることが判明した。

4. 考察

4.1 実験式

無振動掘削時および三角波振動掘削時の掘削合力の水平方向分力 F_{xm0} および F_{xm} の発生機構に関する理論的考察は、すでに別報¹⁾において論述している。ここでは実験結果に基づいて、実験式によって理論解の正しさを実証することとする。

無振動掘削時における最大掘削合力 F_{m0} (kN) の最大水平方向分力 F_{xm0} (kN) およびそれに対応する最大鉛直方向分力 F_{zm0} (kN) は、重回帰分析の結果、次式に示すように掘削深さ z (cm) および掘削速度 V (cm/s) の関数で与えられる。

$$F_{xm0} = 5.75 z^{2.43} (1 - 1.33 \times 10^{-10} V^{-20.6}) \quad (R=0.977) \quad (3)$$

$$F_{zm0} = 1.28 z^{3.83} (1 - 7.81 \times 10^{-9} V^{-17.2}) \quad (R=0.942) \quad (4)$$

$$F_{m0} = 5.91 z^{2.50} (1 - 1.62 \times 10^{-10} V^{-20.5}) \quad (R=0.975) \quad (5)$$

一方、振動掘削時における最大掘削合力 F_m (kN) の最大水平方向分力 F_{Xm} (kN) およびそれに対応する最大鉛直方向分力 F_{Zm} (kN) は、重回帰分析の結果、次式に示すように振動周波数 f (Hz)、振幅 a (cm)、掘削深さ z (cm) および掘削速度 V (cm/s) の関数で与えられる。

$$F_{Xm} = 1.13 f^{-0.264} a^{-0.180} z^{2.597} (1 + 2.64 V^{1.086}) \quad (R=0.810) \quad (6)$$

$$F_{Zm} = 0.464 f^{-0.354} a^{-0.216} z^{2.316} (1 + 1.32 V^{1.906}) \quad (R=0.763) \quad (7)$$

$$F_m = 1.26 f^{-0.267} a^{-0.181} z^{2.573} (1 + 2.38 V^{1.144}) \quad (R=0.820) \quad (8)$$

4.2 比エネルギーと速度比

正方向の最大水平方向分力 F_{Xm} (kN) のみが岩石供試体の掘削作業を行っていると考えられるべきである。その仕事量 W (kNcm) は、次式で算定することができる。

$$W = \int_0^L F_X dX \quad (9)$$

ここに、 L (cm) は、掘削速度 V (cm/s) と所要時間 t (s) の積で与えられる掘削距離である。また、掘削動力 P (kNcm/s) は、単位時間当たりの仕事量 W/t として定義することができる。さらに、単位時間当たりの掘削土量 Q (cm³/s) は、掘削深さ z (cm) と掘削速度 V (cm/s) および掘削刃の刃幅 B (cm) の積である zVB として算定することができる。

さて、単位体積当たりの仕事量として定義されている比エネルギー $^{[2]}S_E$ (kNcm/cm³) は、掘削動力 P (kNcm/s) を単位時間当たりの掘削土量 Q (cm³/s) で除したものととして、次式で算定される。

$$S_E = \frac{P}{Q} = \frac{W}{zBVt} \quad (10)$$

比エネルギーが小さければ小さいほど単位掘削土量当たりの仕事量が減少することを意味しており、比エネルギーが小さいほどより効率的な仕事を達成できると評価することができる。

一方、土質材料に対する平刃の振動掘削特性を評価する上できわめて重要とされる振動周波数 f (Hz)、変位振幅 a (cm)、および掘削速度 V (cm/s) に対して、平刃の速度振幅 $a\omega = 2\pi fa$ を掘削速度 V で除した値を速度比 λ として、畠^[3]は次式のように定義した。

$$\lambda = \frac{a\omega}{V} = \frac{2\pi fa}{V} \quad (11)$$

一例として、Fig.6 は、動的最大水平方向力と静的最大水平方向力の比 F_{Xm}/F_{Xm0} と速度比 λ の関

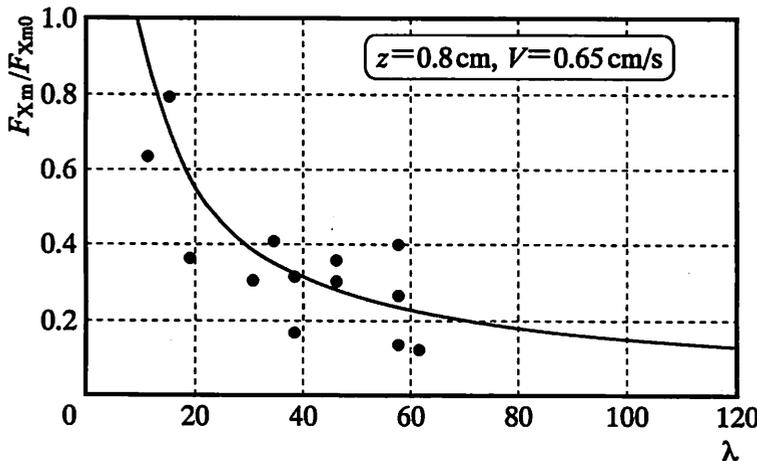


Fig.6 Relationship between ratio of dynamic and static maximum horizontal component of excavation force F_{Xm}/F_{Xm0} and velocity ratio λ

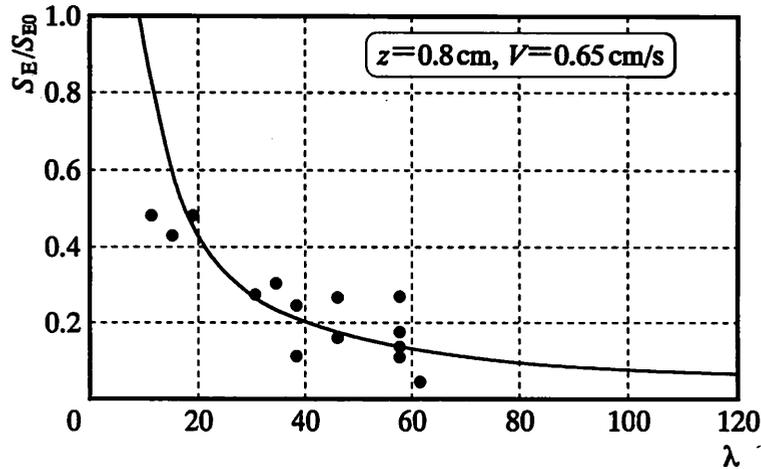


Fig.7 Relationship between ratio of dynamic and static specific energy S_E/S_{E0} and velocity ratio λ

係を、変位振幅 $a = 0.07 \sim 1.00$ cm, 掘削速度 $V = 0.65$ cm/s, 掘削深さ $z = 0.8$ cm, およびすくい角 $\alpha = \pi/6$ rad において示したものである。図より明らかに、 F_{Xm}/F_{Xm0} は速度比 λ の増加とともに減少するが、掘削深さ z が増加すると増大する傾向にある。重回帰分析の結果、次式に示す実験式が得られた。

$$\frac{F_{Xm}}{F_{Xm0}} = 1.61 \lambda^{-0.362} z^{0.401} \quad (R=0.647) \quad (12)$$

Fig.7 は、前図に対応して、動的比エネルギーと静的比エネルギーの比 S_E/S_{E0} と速度比 λ の関係を種々の変位振幅について示したものである。図より明らかに、 S_E/S_{E0} は速度比 λ の増加とともに次第に減少するが、掘削深さ z が増加すると増大する傾向にある。重回帰分析の結果、次式に示す実験式が得られた。

$$\frac{S_E}{S_{E0}} = 1.24 \lambda^{-0.324} z^{0.604} \quad (R=0.604) \quad (13)$$

通常、正弦波振動掘削においては、比エネルギーの速度比に対する減少の割合は、三角波振動掘削におけるものと比較してかなり増大することがすでに明らかにされている [4], [5], [6]。

以上、動的な比エネルギーと静的な比エネルギーとの比率を減少させて最適な掘削条件を設定するためには、一定の掘削速度 V においては、振動周波数 f と変位振幅 a を同時に増加させるべきであることが判明した。

5. 結論

バケットツースに三角波振動を与えて凝灰岩供試体を振動掘削する場合、無振動掘削時の掘削抵抗や比エネルギーとの比較を行うことにより三角波振動掘削特性を実験により明らかにした。その結果得られた新しい知見を以下にまとめて示す。

1) 掘削深さ 1.2 cm, 掘削速度 0.35 cm/s, すくい角 $\pi/6$ rad のバケットツースに関しては、振動周波数 30 Hz, 振幅 0.2 cm での三角波振動掘削における最大水平方向掘削力が無振動時における当該掘削力の 65% にまで低下することが明らかになった。

2) 三角波振動掘削においては、静的最大水平方向掘削力に対する動的最大水平方向掘削力の値は、掘削速度に対する変位振幅と角速度の積で与えられる速度比が増加するとともに双曲線的に減少するが、掘削深さとともに放物線的に増加する傾向が見られた。また、この比率は速度比 63.1 ± 27.5 の範

囲で20%にまで低下することが判明した。

3) 静的比エネルギーに対する動的比エネルギーの値は、速度比が増加するとともに双曲線的に減少するが、掘削深さとともに放物線的に増加する傾向が見られた。なお、この比率は速度比 54.8 ± 39.1 の範囲で20%にまで低下することが判明した。

引用文献

- [1] T.Muro and D.T.Tran : Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock, *Journal of Terramechanics*, 40 (3), pp.191-219, July, 2003.
- [2] 室達朗, 土屋清, 上松正史, 河原荘一郎 : T.B.M.センターカッタの定常掘削特性に及ぼすビット斜角の影響, *土木学会論文集*, No.652/III-51, pp.47-60, 2000年6月.
- [3] 畠昭治郎 : 建設機械学, 鹿島出版会, pp.151-168, 1987年1月.
- [4] T.Muro and D.T.Tran : Vibro-cutting characteristics of a blade for a weak rock, the 14th Int. Conf. of ISTVS, USA, CD/ROM, 11 pages.
- [5] 室達朗, 亀井泰造, D.T.Tran, 趙偉民 : セメントモルタルの振動切削特性に関する実験的考察, *土木学会論文集*, No.742/VI-60, pp.37-50, 2003年9月.
- [6] T.Muro, D.T.Tran, T.Kamei and J.O'Brien : Studies of the vibration-assisted cutting of rock by toothed equipment, *Proc. of the 9th European Conf. of the ISTVS*, Harper Adams, UK, pp.338-347, Sep. 2003.