

# 防振に配慮した鍛造工場の施工報告

## Construction Report of The Forging Factory which Considered Protection Against Vibration

安斎 輝彦\*

田村 常雄\*

Teruhiko Anzai

Tsuneo Tamura

佐藤 涼吉\*

上田 敬一\*

Ryo-kichi Sato

Keiichi Ueda

### 要 約

鍛造機の衝撃によって大きな振動が生じる工場などでは、振動低減対策として基礎を浮き基礎としたり、空気ばねに弾性支持させることが一般的になりつつある。このような振動低減対策を施すことで、周囲に伝播する振動は小さくなる。なお、弾性支持による振動低減対策を検討する場合には、加工性能に対する配慮についても必要となる。

これらの環境振動については、発生源の振動性状や伝播経路等が複雑で不確定要因も多いことから、その予測は非常に難しいものとなる。しかし、環境振動を事前に精度良く予測することができれば振動低減対策等、適切な対応が可能になる。

本報では、鍛造機を対象にした振動解析の概要と、鍛造機の衝撃によって発生する振動の防止対策として EPS 材を用いた基礎の振動低減効果と振動計測結果について報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 建物・地盤の概要
- § 3. 振動解析概要
- § 4. 施工および振動計測結果
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

金属加工を行う鍛造機は、主として衝撃によって励起される振動が強く、周辺環境に及ぼす影響が大きい。しかし、鍛造時の衝撃が作業の主要をなすことから、衝撃力を緩めることは作業性能を損なうことになる。このようなことから、作業性能を維持しながら周辺に及ぼす影響を小さくするために、適切な検討のもとに振動源を弾性支持させて、周辺地盤と遮断することによって振動源から生じる振動を低減させることが多い。弾性支持のばねとして金属ばね、防振ゴム、空気ばね等がある。この方法は振動を低減させる最も確実な方法であり、実績も多い。しかし、その防振装置の初期導入費や装置の維持管理が必要となる。したがって、防振装置は、周辺環境と作業・加工性能等に及ぼす影響を総合的に勘案して、

採用の適否や弾性支持の方法を決定する必要がある。

上記のように人工的に発生する衝撃ではないものの、衝撃力の低減対策を実施している事例として、落石防護壁工や落石覆道がある。落石覆道では、従来より敷砂が用いられてきたが、新たな緩衝工として優れた緩衝効果を有する三層緩衝構造が開発されている<sup>1)</sup>。この三層緩衝構造とは、表層材に維持管理が容易な敷砂、芯材に荷重分散効果が期待できる RC 床版、裏面材に軽量で衝撃吸収性能に優れる発泡スチロール材 (Expand Poly-Styrol, 以下、EPS) を組み合わせたものである。重錘落下衝撃実験が実施されており、その結果から、EPS 材の緩衝特性により最大重錘衝撃力の 2/3 程度のピーク値を有する波形が継続し、緩やかに収束することが示されている。その他、EPS 材を防振材料として利用している事例に、マット状に EPS 材を敷設して交通振動の発生源および伝播経路対策に使用し、自動車走行実験で 4~10 dB、列車走行実験で約 6 dB の振動軽減効果が認められている事例も報告されている<sup>2)</sup>。

以上のことから、EPS 材は緩衝・防振対策の材料として適用できる可能性が高いと考えられる。

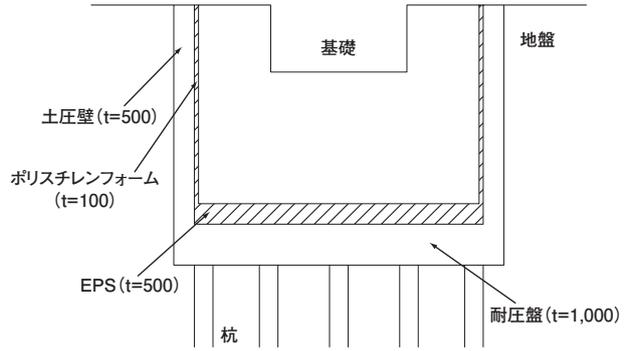
本報では、鍛造機を対象にした振動解析の概要と、鍛造機の衝撃によって発生する振動の防止対策として EPS 材を用いた基礎の振動低減効果と振動計測結果について報告する。

\*北陸(支)共栄鍛工所(作)

§ 2. 建物・地盤概要

2-1 建物概要

工事名称：株式会社共栄鍛工所 新棟・新築工事  
 工事場所：新潟県三条市尾崎字川原 2781  
 発注者：株式会社共栄鍛工所  
 設計：株式会社北園空間設計  
 施工：西松建設株式会社  
 主用途：工場  
 敷地面積：15,972.37 m<sup>2</sup>  
 延床面積：1,263.71 m<sup>2</sup>  
 階数：地上 2 階  
 最高高さ：12.515 m  
 基礎構造：杭基礎（既製コンクリート杭）

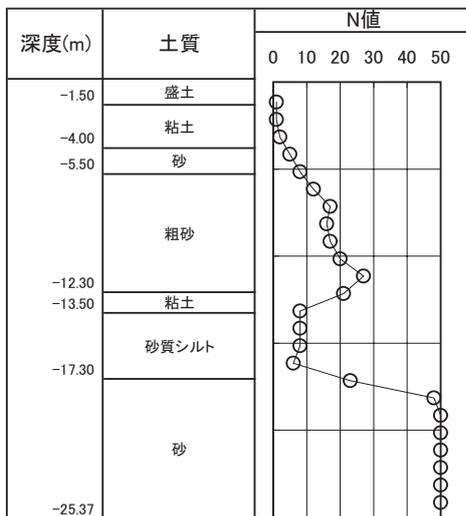


図一 緩衝対策基礎

2-2 近隣状況，地質・地形概要

鍛造工場は農道，町道に面し，田畑に囲まれた工場敷地内の一角に位置する。

地盤柱状図を図一に示す。ボーリング調査結果より，GL-4 m 付近までは N 値が 1~2 の粘性土，GL-10 m 付近までは N 値が 4~15 の砂質土，GL-13 m 付近までは N 値が 4~5 の粘性土，それ以深は N 値 40 以上の細砂層が 8 m 程度連続し，GL-20 m 以深の粗砂層で N 値 50 以上となる。地下水位は GL-1.6 m 付近に存在する。



図一 地盤柱状図

表一 地盤定数

番号	主体となる土質	下限深度 (GL-m)	平均 N 値	Vs (m/s)	密度 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比	G0 (kN/m <sup>2</sup> )
1	粘土	4.00	1.3	110.0	15.00	0.450	1.850E+04
2	砂	5.50	6.5	121.0	18.00	0.400	2.690E+04
3	粗砂	12.30	18.6	210.0	18.00	0.400	8.090E+04
4	粘土	13.50	8.0	199.0	15.00	0.450	6.060E+04
5	砂質シルト	17.30	7.3	193.0	17.00	0.430	6.460E+04
6	砂	25.37	55.0	300.0	18.00	0.400	1.650E+05

§ 3. 振動解析概要

振動の検討として，まず通常の杭基礎を対象に，基礎を 1 質点系にモデル化した衝突理論による検討を行い，基礎部に生じる振動を確認した。次に，2 次元有限要素法を用い，通常の杭基礎と図二に示すような衝撃力に対する緩衝対策として EPS 材を用いた杭基礎（以降，緩衝対策基礎）を対象に，基礎および周辺地盤をモデル化して振動解析を行った。

緩衝対策基礎は，土圧壁 (t=500 mm) と耐圧盤 (t=1000 mm) の内側に，側面 (土圧壁内側) には厚さ t=100 mm のポリスチレンフォームを，底面 (耐圧盤上面) には厚さ t=500 mm の EPS 材をブロック状に設置して周囲との絶縁を図った杭基礎である。

解析に用いた地盤定数を表一に示す。なお，本検討では，鉛直方向の振動を対象にした。

3-1 衝突理論による検討

衝突理論による方法<sup>3)</sup>では，衝撃力を直接求めることなく衝突による初速度を初期条件として与えることによって振動計算をするものである。ここでは，杭基礎を対象に，鍛造機と基礎を杭の鉛直ばねと減衰係数を考慮した 1 質点系にモデル化して検討を行った。

基礎の平面形状は 6.8 m × 5.3 m，基礎高さは 6.5 m で，鍛造機およびアンピルクッションも含めた基礎重量は 6,147 kN であり，杭径 φ600 の既製コンクリート杭 20 本で支持される。なお，杭長は約 15 m である。

杭の鉛直ばねは，Randolph による杭周地盤ばね ((1) 式) と杭先端地盤ばね ((2) 式) を用いて，(3) 式により杭頭のばねを算定した<sup>4)</sup>。また，減衰係数については，文献<sup>5)</sup>を参考に算定した。

$$S_v = 2\pi G_0 / \log_e(2r_m/B) \quad (1)$$

$$r_m = 2.5L(1 - v_e)$$

ここに，  
B：杭径

L：工学的基礎までの杭長

$G_e$  : 表層地盤の平均せん断弾性係数

$\nu_e$  : 表層地盤の平均ポアソン比

$$k_b = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\pi G_b B}{2(1-\nu_b)} \quad (2)$$

ここに、

$G_b$  : 支持層のせん断弾性係数

$\nu_b$  : 支持層のポアソン比

$$K_z = E_p A \beta_s \frac{E_p A \beta_s (1 - e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 + e^{-2\beta_s L})}{E_p A \beta_s (1 + e^{-2\beta_s L}) + k_b (1 - e^{-2\beta_s L})} \quad (3)$$

ここに、

$$\beta_s = S_v / (E_p A)$$

$E_p$  : 杭のヤング係数

$A$  : 杭の断面積

衝突理論による具体的な計算については、文献<sup>3)</sup>に示されている方法に従って検討した。その際、基礎の初速度は、(4)式に従って算出した。

$$V' = \frac{m}{m+W} (1+e)v$$

$$v = \sqrt{2gh \left(1 + \frac{\pi D^2 P}{4m}\right)} \quad (4)$$

ここに、

$m$  : 衝突体の質量

$W$  : 基礎の質量

$e$  : 反発係数 (=0.3)

$h$  : 衝突体の落下高さ

$D$  : シリンダー半径

$P$  : シリンダー内有効圧力

なお、上記の反発係数は基礎形式や地盤状況で変化すると考えられるが、本検討では、鍛造機で一般的に使用される値 (=0.3) を仮定した。

衝突理論によって算出した結果を表-2に示す。基礎(杭頭)に作用する荷重は 1,311 kN、加速度は 209 cm/sec<sup>2</sup> (振動加速度レベル: 103 dB) と大きな結果となった。

### 3-2 有限要素法による検討

前節に示した衝突理論による方法では、基礎に生じる応答については算出できるが、周囲に及ぼす影響を直接確認することはできない。したがって、本節では、周囲に及ぼす影響を確認するために、周辺地盤をモデル化できる有限要素法により解析を実施した。また、通常の杭基礎と緩衝対策基礎を対象とした解析を実施し、緩衝対策基礎の振動の低減効果について検討した。

鍛造機による振動は点振源と考えられることから、3次元あるいは軸対称でモデル化する必要があるが、本検討では解析容量や計算時間を考慮して、2次元でモデル化した。

解析モデルを図-3に示す。ここでは鍛造機の基礎から側方 100 m 地点 (以下、振動評価点) の地盤上の振動を確認することとし、解析モデルの範囲を、鍛造機基礎から振動評価点方向の側方を 150 m、逆方向を 50 m とした。深さ方向は、GL-50 m までを対象とした。境界条件は、側方を伝達境界、底面は粘性境界とした。解析で使用した地盤物性を表-1中に示している。せん断波速度  $V_s$  は、標準貫入試験による  $N$  値から太田・後藤式<sup>6)</sup> ((5)式)により算定し、単位体積重量およびポアソン比は土質に応じた一般的な値を設定した。また、緩衝対策基礎に用いた EPS 材の物性を表-4に示す。

$$V_s = 68.79 \times N^{0.171} \times D^{0.199} \times F_1 \times F_2 \quad (5)$$

ここに、

表-2 衝突理論による結果

	記号	単位	定数, 応答
■基礎のばね定数および固有円振動数			
杭の鉛直ばね	$K_z$	MN/m	43,000
基礎の固有円振動数	$\omega_0$	rad/sec	82.82
■基礎の応答			
速度	$V'$	cm/sec	3.62
最大応答変位を与える時刻	$t_m$	sec	0.0163
最大応答変位	$u_m$	cm	0.031
最大応答加速度	$A_{max}$	cm/s <sup>2</sup>	209.3
基礎(杭頭)に作用する荷重	$P_d$	kN	1,311.7
基礎の振動加速度レベル	VAL	dB	103.4

表-3 パラメータ

堆積年代	F1
沖積	1.000
洪積	1.303
土質名	F2
粘土	1.000
細砂	1.086
中砂	1.066
粗砂	1.135
砂礫	1.154
礫	1.448

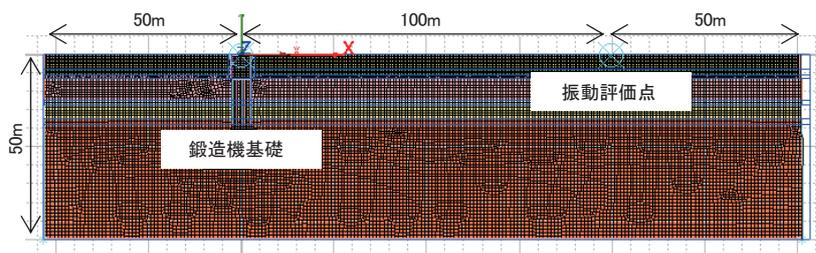


図-3 2次元解析モデル

- N: N 値
- D: 深さ (m)
- F<sub>1</sub>: パラメータ (表-3)
- F<sub>2</sub>: パラメータ (表-3)

解析に必要な衝撃力は、結果に大きな影響を及ぼすと考えられることから、既存の工場がある場合には事前に詳細な振動計測を実施し、その結果を用いた逆解析により設定することが望ましい。しかし、本検討時には振動計測を実施していないことから、鍛造機によって生じる衝撃力を正弦波の半周期で仮定すれば、力積の原理より、

$$mv - mv' = \int_0^{t_0} F_0 \sin \pi \frac{t}{t_0} dt$$

$$= \frac{\pi \cdot m (v - v')}{2 \cdot t_0} \quad (6)$$

となり、衝撃力の最大値を

$$F_0 = \frac{\pi \cdot m (v - v')}{2 \cdot t_0} \quad (7)$$

と設定した。ここに、

- m: 衝突体の質量
- v: 衝突時速度
- v': 衝突後速度
- t<sub>0</sub>: 衝撃力が作用する時間

表-4 EPS の物性値

単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	0.45
ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> )	30,000
ポアソン比	0.1
許容圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	345
品質管理時の圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	751

上記のうち、衝突時と衝突後速度、衝撃力が作用する時間については3-1による設定値および計算値を用いた。(7)式によって算出される値を最大値とする正弦波(1/2周期)を、鍛造機基礎の上面に節点荷重として作用させた。

杭基礎と緩衝対策基礎の最大加速度コンター図を図-4に、基礎からの水平方向距離に対する基礎上および地盤の振動加速度レベルを図-5に示す。なお、図-4に示した最大加速度コンター図の凡例は加速度 (m/s<sup>2</sup>) で表している。

杭基礎では、側方、深さ方向ともに広い範囲で 20 cm/sec<sup>2</sup> を超える加速度が生じている。一方、緩衝対策基礎では、周辺地盤に生じる加速度が小さくなっていることがわかる。したがって、緩衝対策基礎では、基礎外周のポリスチレンフォームにより周辺への振動伝播が小さくなったこと、また、底面の EPS 材による緩衝効果が発揮されたものと考えられる。

図-5 から、基礎上では、杭基礎に比べて緩衝対策基礎の振動加速度レベルが約 10 dB 大きくなっている。しかし、基礎外の地盤上では、20 m 地点を除いて、緩衝対策基礎は杭基礎よりも 6.0~9.2 dB 小さくなっている。なお、基礎からの距離に対する振動低減の傾向は両者で顕著な違いは認められない。

次に、杭基礎および緩衝対策基礎の中央に位置する杭の軸力比分布を図-6に示す。ここで、軸力比は、杭基礎および緩衝対策基礎ともに、杭基礎の深さ方向最大値を示す杭頭部を基準としている。緩衝対策基礎の杭頭部に生じる軸力は、杭基礎の 0.5 以下となっている。

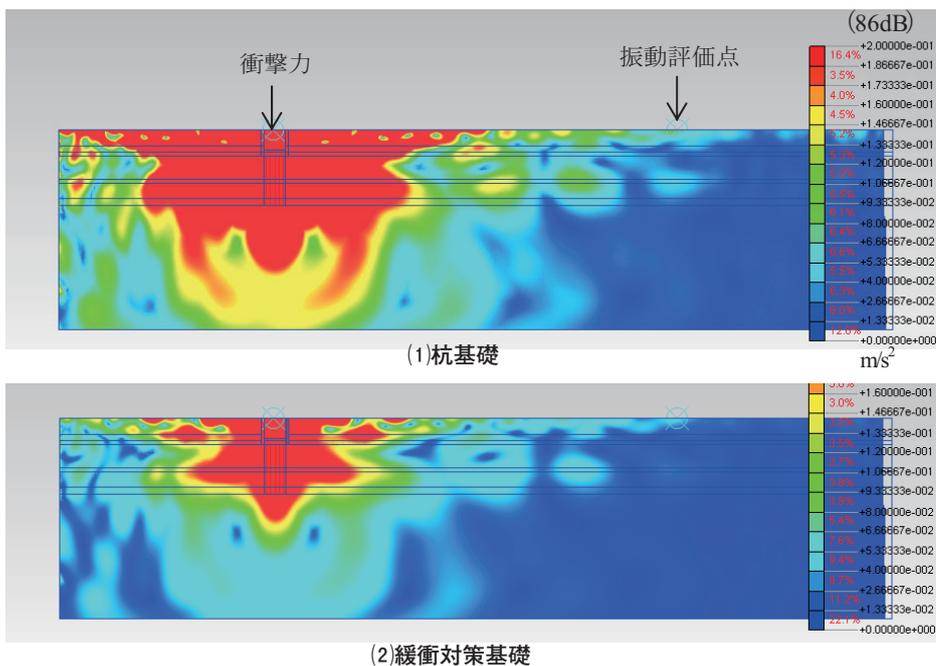
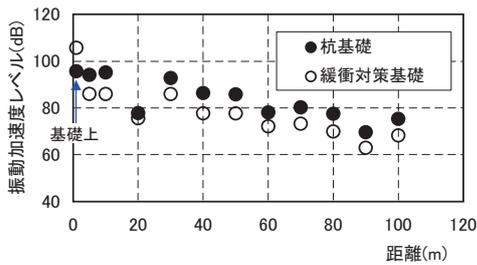


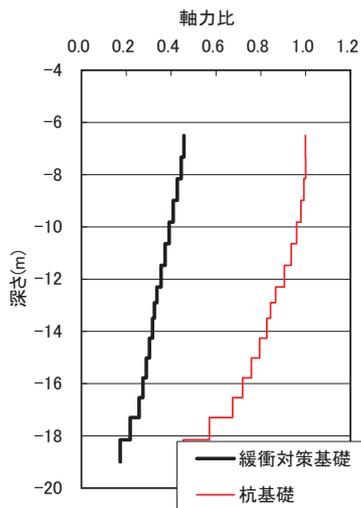
図-4 最大加速度コンター図



図一五 基礎からの距離と振動加速度レベルの関係



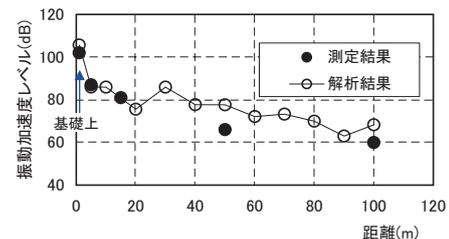
写真一 1 EPS 材の敷設状況



図一六 杭の軸力比分布



写真一 2 EPS 材の切断状況



図一七 計測結果と解析結果の比較

#### § 4. 施工および振動計測結果

##### 4-1 緩衝対策基礎の施工

緩衝対策基礎のEPS材の施工状況を写真一1に示す。土圧壁および耐圧盤施工後に、EPS材(1m×2m×t=0.5m)を、耐圧盤上に基礎の形状に合わせて敷き詰めた。

EPS材上のコンクリート基礎はマスコンクリートであり、施工時のEPS材は大荷重かつ高温に晒される。今回使用したEPS材では、75度程度から温度による変形が生じ始めることが懸念された。従って事前に実施した温度応力解析に基づいてコンクリートの打設時期を検討するとともに、施工時にはマスコンクリートの温度測定を行った。施工時に実施した温度測定結果は最大で67度であったことから、変形が生じ始める温度には至っていないことがわかった。

##### 4-2 振動計測概要

建物竣工後に振動計測を実施した。計測には振動レベル計(VM-52, リオン株)とレベルレコーダー(LR-20, リオン株)を用い、鍛造機稼働時の緩衝対策基礎上と工場内スラブ上、工場から離れた地盤上(50m地点、振動評価点(100m地点))の振動加速度レベルおよび振動レベルを計測した。

振動計測結果を図一7に示す。なお図中には、3-2で示した解析結果も併記し、結果を振動加速度レベルで示す。計測結果から、緩衝対策基礎上と直近のスラブ上では15dBの差異が生じており、外周部のポリスチレンフォームによる絶縁効果が認められた。

計測結果と解析結果の比較では、基礎上および基礎から20m以内の地盤上では、解析結果は計測結果と良く一致している。しかし、基礎から離れた地盤上(50m地点、振動評価点(100m地点))では、解析結果は計測結果より大きな値を示しており、8~10dBの差異が生じている。これは、2次元解析モデルの影響のほか、解析で設定した衝撃力や地盤物性の影響が大きいと考えられる。また、衝撃波を発生する機械振動の場合には、機械基礎近傍では、高周波数成分を含む衝撃波が観測されるが、基礎から離れるに従ってこの衝撃波は急激に減衰し、低周波成分を多く含む表面波が遠方まで伝播する<sup>7)</sup>ことが指摘されている。今回の解析モデルでは、この表面波を十分にシミュレーションできていない可能性が考えられる。

環境振動予測では、地震応答解析に用いる入力地震動のように決められた荷重がない。したがって、今回のように事前に振動源の衝撃力や振動の大きさが明確でない場合には、事前に既存の工場の振動源および周辺の振動計測を実施して、その結果をシミュレーションできる衝撃力を設定する必要がある。また、地盤物性については、ボーリング調査や標準貫入試験だけではなく、PS 検層により地盤のせん断波速度を測定する必要がある。このような事前調査を行うことで、精度良い予測が可能になるとともに、合理的な環境振動対策も可能になると考えられる。

## §5. おわりに

本報で実施した鍛造機を対象にした振動解析と振動計測結果から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 緩衝対策基礎では、基礎外周のポリスチレンフォームにより周辺への振動伝播が小さくなること、また、底面に設置した EPS 材により緩衝効果が発揮される可能性があることが示された。
- 2) 緩衝対策基礎と杭基礎では、基礎からの距離に対する振動低減の傾向に顕著な違いは認められない。
- 3) 緩衝対策基礎の杭頭部に生じる軸力は、杭基礎よりも大きく低減できる可能性が示された。
- 4) 計測結果から、緩衝対策基礎上と直近のスラブ上では 15 dB の差異が生じており、外周部のポリスチレンフォームによる振動絶縁効果が認められた。
- 5) 計測結果と解析結果の比較では、基礎上および基礎から 20 m 以内の地盤上では良く一致しているが、

基礎から離れた地盤上では計測結果に対して解析結果は大きな値を示しており、差異が生じている。

今回は 2 次元有限要素法により解析を行った。精度良い予測を行う場合には、事前の振動計測とより詳細な地盤調査 (PS 検層や土質試験) は必須と考えられる。

謝辞：振動計測の実施にあたり、株式会社共栄鍛工所の齊藤沢一様、小林雅信様にご助言ならびにご協力頂きました。記して謝意を表します。また、振動解析および振動計測計画にあたって、北園空間設計 北園氏、構造計画プラスワン 金田氏、小林氏に貴重なご意見、ご指導頂きました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 岸, 中野, 今野: 三層緩衝構造の衝撃性能大型屋外実験, 構造工学論文集, Vol.41 A, pp.1257-1265, 1995.3.
- 2) 早川, 松井: EPS ブロックを用いた交通振動の軽減対策, 土と基礎, pp.1257-1265, 1995.3.
- 3) 山原浩: 環境保全のための防振設計, 彰国社, 昭和 49 年 9 月.
- 4) Randolph, M.F. and Wroth, C.P.: Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, VOL.104, pp.1465-1488, 1978
- 5) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.2.
- 6) 太田裕・後藤典俊: S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探査, 第 29 巻, 第 4 号, pp.31-41, 1976
- 7) 長瀧, 橋詰: 地盤内の振動の伝播特性とその対策, 土と基礎, pp.5-8, 1996.9.