

開削トンネルの埋戻し土に着目した交通荷重による地盤振動特性

Characteristics of traffic induced vibration of ground on back fill materials for cut and cover tunnel

西山誠治*・グエン コン ザン**・木幡行宏***・杉本隆男****・片桐雅明****

Seiji Nishiyama, Nguyen Cong Giang, Yukihiko Kohata,

Takao Sugimoto and Masaaki Katagiri

*工博 日建設計シビル 技術開発部 (〒541-8528 大阪市中央区高麗橋4-6-2)

** 工修 室蘭工業大学 大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*** 工博 室蘭工業大学 大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

****工博 日建設計シビル 地盤調査設計部門 (〒112-0004 東京都文京区後楽1-4-27)

In the cut and cover tunnel, the backfill over the structure of tunnel is necessary. In general, hill-cut material had used as back fill. Recently, from the improvement of environment, reuse of excavated soil has been promoted. The characteristics of traffic induced-vibration of ground depend on the stiffness and thickness of sub-layer. It is possible that the traffic induced-vibration of ground can be reduced by the characteristics of backfill, as the backfill of cut and cover tunnel can be controlled. In this paper, using two-dimensional FEM, the characteristics of traffic induced-vibration of ground treated with the liquefied stabilized soil using excavated soil compared with those of ground filled by hill-cut material.

Key Words: traffic induced vibration of ground, backfill, liquefied stabilized soil, traffic load, cut and cover tunnel

キーワード: 地盤振動, 埋戻し土, 流動化処理土, 交通荷重, 開削トンネル

1. はじめに

環境意識の高まりから、道路や鉄道などの交通荷重を加振源とする周辺地盤振動を検討する機会も少なくない。開削トンネルでは、埋戻し材として通常は山砂を用いるが、近年、施工性や掘削土砂の再利用、土取り場の環境保全という環境面から流動化処理土工法も用いることも多い。

地盤振動特性は、地盤を構成している地層の厚さとともにその層の硬軟に依存する。道路表面を走る自動車を振動源とする場合、埋戻し土は道路構造体を支える地盤であり、振動挙動に影響を与える可能性がある。しかし、これまで、埋戻し土が地盤振動に及ぼす影響は検討されていない。そこで、本研究では、単に山砂で埋め戻す場合と、流動化処理土を用いた場合を中心に、埋戻し土の特性を変化させた地盤の振動特性を2次元FEMにより解析的に考察した。

評価は従来の埋戻し土と流動化処理土の場合の、加速度伝達関数の差分を主な指標として行った。その結果、従来、環境保全や施工性の観点から有用とされてきた流動化処理土が、交通振動対策としても有効であることが分かり、流動化処理土の新たな利点を指摘した。さらに、振動変位軌跡の可視化等により、振動特性を考察し、振動対策を考える上での留意点を再認識することができた。

2. 検討条件

検討対象の開削トンネルを図-1に、地盤条件を図-2に示す。これらは、著者らが関係するプロジェクトのベトナムの首都ハノイ市街地を想定したものである。

ベトナム国ハノイ市は紅川の河口から約100 km上流に位置し、その標高は海拔4~20 mで、紅川が運搬してきた粘土系粒子を主体とする土砂が厚く堆積している。現在、ハノイ市は工業地区の集中や人口の増加によって、深刻な交通渋滞が定常化している。その対策として、市内交通網、特に地下鉄網の充実が優先的開発の1つに挙げられている。また、地下鉄の整備は、既設道路を開削して、トンネルを構築し、埋め戻して元の道路にするという開削トンネル工法で進められる計画となっている。

地下鉄は、土被り4 m程度、幅10 m、高さ7 mの1層1径間の開削トンネルとして計画されている。地盤は、表層から深さ約30~40 mまでは、軟らかい粘性土やゆるい砂質土の互層であり、深さ約30~40 m以深は硬く締まった砂層もしくは礫層である。

周辺地盤が軟弱であるため交通振動に起因する地盤振動が問題となる可能性があり、地表面の自動車荷重および地下鉄内部の列車荷重を加振源として検討する。

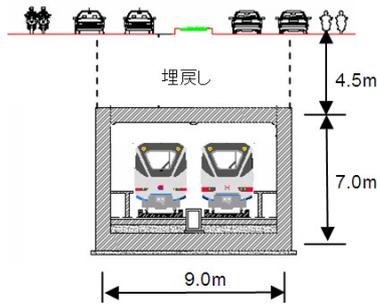


図-1 解析対象

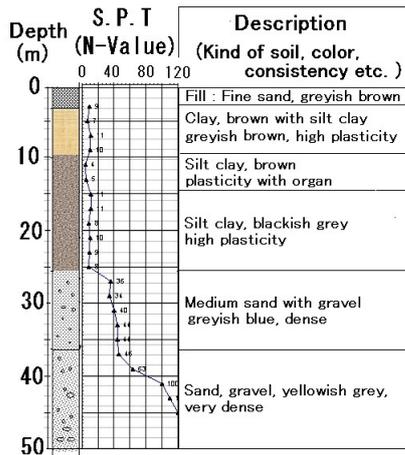


図-2 地盤条件

表-1 Vinh Phuc Clay の物理的特性

土質分類	[CL]
土粒子密度(g/cm ³)	2.722
液性限界(%)	38.2
塑性限界(%)	16.5
塑性指数	21.7

3. 埋戻し土の特性

3.1 流動化処理土の特性¹⁾

(1) 原材料の特性

流動化処理土は、ベトナム国ハノイ市の地下鉄予定地周辺から採取した Vinh Phuc Clay を原材料とした。その物理的特性を表-1に示す。この Vinh Phuc Clay は、低液性限界粘土 (CL) に分類される。また、X 線回折によると、この粘土は、雲母、カオリナイトなども含まれているが、主体が石英であることが特徴的である。

固化材には、一般軟弱土用セメント系固化材 (太平洋セメント；ジオセット 10)を用いた。

(2) 配合と特性

フロー試験、ブリージング試験、28 日養生後の一軸圧縮試験を実施して求めた特性値から、泥水密度と固化材添加量を、それぞれ 1.350 g/cm³ と 200 kg/m³ に設定した。

(3) 剛性・単位体積重量

筆者らは別途、流動化処理土に繊維を添加することによ

り流動化処理土の性能向上に関する検討を行っている¹⁾。室内三軸試験結果より算定した変形係数 $E_0=587600 \text{ kN/m}^2$ (拘束圧 49 kPa, 繊維添加無し)を用い、単位体積重量 $\gamma=14.0 \text{ kN/m}^3$ 、せん断弾性係数 $G=197200 \text{ kN/m}^2$ を、流動化処理土の基本設定とした。

3.2 山砂 (埋戻し材) の特性

埋戻し材の剛性等についての調査結果は少ないと考えられる。ここでは、兵庫県南部地震で被災した大開駅の埋め戻し土(まさ土)についての調査結果等²⁾を参考に N 値=10 とし、単位体積重量 $\gamma=17.0 \text{ kN/m}^3$ とした。せん断弾性係数は、鉄道設計基準³⁾を用いて N 値から換算して設定し、 $G=51531 \text{ kN/m}^2$ とした。

4. 交通荷重の振動数特性

(1) 地表交通荷重

地表面における交通荷重としては、自動車による荷重や、地上を走行する列車荷重が考えられる。これらの交通荷重の加振源の周波数特性について整理する。

まず、自動車荷重では 10~20 Hz 程度の地盤振動が卓越するようなケースが報告されている⁴⁾。地盤振動は周辺の地盤条件に大きく左右されることから、一様な傾向を述べにくい。10 Hz 程度までの低振動の振動は比較的軟弱な地盤において地盤表面波として遠方まで減衰せずに伝わる。一方、30~40 Hz 程度の高い振動数は、自動車本体と地表面の路面凹凸の影響で生じる。高い振動数は比較的減衰しやすく、人体の感覚では感じ難いとされている。しかしながら、建物内部の人にとっては、建物の部分的な振動系の固有振動数と共振したり、高い振動数が窓ガラス等のビリビリとした固体音に変換され、やはり苦情の対象となることも多い。したがって、人体が感じやすい 4~8 Hz 付近の振動だけでなく、比較的高い 40 Hz 付近までの振動数も対象とする必要がある。

一方、列車荷重については、列車が台車の上部と下部がそれぞれ振動体であることから、これも幅広い振動数成分が発生する。地上線走行では 31.5 Hz 付近の振動数レベルが高いとの報告⁵⁾があり、列車荷重に対する振動に対しても、20~40 Hz の比較的高い振動も対象とするのがよい。

(2) 地中交通荷重

地中交通荷重としてトンネル内部の列車走行が考えられる。トンネル直上近傍の家屋などで振動による苦情が懸念されることも多い。地表面ではトンネル直上の少し横に離れた箇所振動が大きくなることが明らかにされている。地表部の振動レベルは、20 Hz が卓越したり⁶⁾、振動レベルの閾値以下でも 50 Hz 程度以上にピークをもつ固体音が問題となることもあると報告されている⁷⁾。他にも、63~80 Hz 領域の振動が大きい。20~30 Hz も地上の列車走行による地盤振動と同程度の事例もある⁹⁾。

(3) 対象とする距離および振動数

今回は開削トンネルを対象としトンネル直上は道路である。よって、官民境界付近(10m 付近)だけではなく、そ

れ以降の振動にも着目し、0～50 mの範囲を着目した。

解析対象振動数は本解析では0～40 Hzとした。(1)(2)の観点のほか、トンネル内の列車走行で地盤剛性の高い場合には40～100 Hzの高い振動数も伝播しやすいが、今回の対象地盤は比較的軟弱であること、高振動数の解析はメッシュを細かくする必要があり解析負荷も大きくなるためである。より高振動数の検討は、今後の課題としたい。

5. 解析条件

(1) 解析モデル

解析では、図-2の地盤条件をせん断弾性波速度と単位体積重量に着目して図-3のようにモデル化する。解析は2次元FEMによる周波数応答解析とし、地盤を平面ひずみ要素、開削トンネルを梁要素でモデル化する。減衰は複素剛性でモデル化し、減衰定数は微小変形時(せん断ひずみ 10^{-6})を想定し、鉄道基準³⁾では土質に応じて0.5%～3% (土質①～④)の値が示されているが、ここでは下限値に近い1%とした。解析モデルの要素幅は、対象周波数40 Hzまで考慮できるように地盤剛性に応じて0.5 mもしくは1.0 mとする。

解析領域は道路中心から片側50 mとするが、モデル幅は境界の影響に配慮して片側100 mとする。側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とする。加振点は道路中心およびトンネル中心で、解析モデル領域の中心と一致させた。

解析に用いた物性値を表-2に示す。地盤のせん断弾性波速度は、現地のN値から日本の鉄道基準³⁾より算定した。

埋戻し材は、(1)一般的な山砂としてN=10の砂質土、(2)現地発生土を用いた流動化処理土¹⁾の2ケースを基本ケースとして想定する。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-3に示す。各ケースは埋戻し土の特性に着目し、Case1～Case9は開削トンネルが存在するケース、Case10～Case13は開削トンネルが存在しないケースである。開削トンネルが存在しないケースは、地下鉄が存在しない通常道路での自動車による交通振動、ならびに地表面を列車が走行する場合を想定したことによる。

各ケースの位置づけは以下のようなものである。すなわち、Case1,2を基本ケースと考え、通常の埋戻し土(N=10)のケースをCase1、室内試験から想定される流動化処理土をCase2とする。

Case3は通常土であるが締固めが不良であった場合でN=5とした。また、流動化処理土の剛性を意図的に低くした場合と位置づけることも出来るケースである。

Case4～6は流動化処理土の剛性を変化させたケースである。Case4～5は、現在の想定よりも剛性が低い場合であり、何らかの影響で所定の剛性が発揮されなかった場合と位置づけることができる。Case6は現在の想定よりもセメント量を増加し、さらに剛性が高い場合である。流動化処理土は硬すぎない剛性・強度を有し、将来的な掘削等のことを考慮した程度に設定されるのが一般的である。したが

って、この剛性の高いケースは流動化処理土としては現実的ではないが、振動対策工としての可能性を調査した設定値である。

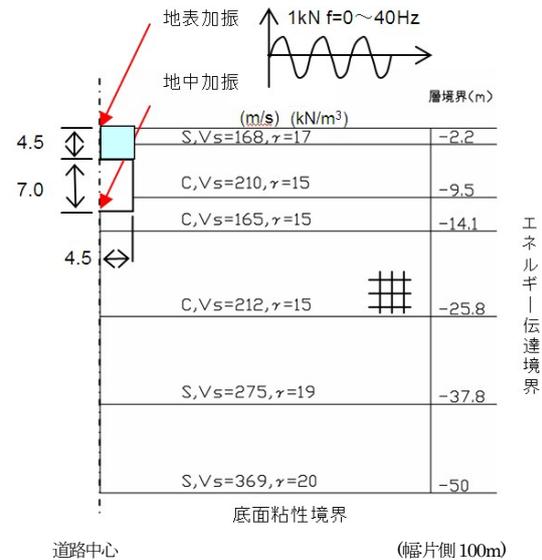


図-3 解析モデルの概要

表-2 解析物性値(基本ケース)

深度(m)	層厚(m)	平均N値	ν	γ (kN/m ³)	G(kN/m ²)	Vs(m/s)	
2.2	2.2	S	9.3	0.49	17.0	48921	168
9.5	7.3	C	9.3	0.49	15.0	67447	210
14.1	4.6	C	4.5	0.49	15.0	41720	165
25.8	11.7	C	9.5	0.49	15.0	68656	212
37.8	12	S	40.7	0.49	19.0	146735	275
50	12.2	S	98.3	0.49	20.0	278103	369

	平均N値	ν	γ (kN/m ³)	G(kN/m ²)	Vs(m/s)	
埋戻し土(N=10)	S	10.0	0.49	17.0	51531	172
流動化処理土*			0.49	14.0	197200	370

* 室内試験結果(49kPa 繊維無し、E0=587.6 MN/m²より)

Case7は、流動化処理土の単位体積重量は一般の土質よりも軽いことが多いが、振動対策としては一般に重量の重い方が振動しにくいいため、単位体積重量を密な土質程度に大きくした場合である。なお、Case7ではせん断剛性は、Case2と同じ値を用い、単位体積重量のみ変化させた。

Case8は、流動化処理土の減衰に着目したケースである。交通振動では地盤のひずみレベルは小さく弾性的な挙動をすると考えられる。このため、減衰定数h=1%として検討している。しかし、振動対策としては振動を伝達する媒体の内部減衰が大きい方が有利と考えられる。そこで、h=10%としたケースを想定する。微小なひずみレベルでも地盤が塑性化し履歴ループを描きエネルギー吸収が期待できるような材料を想定したものである。

Case9は、図-3の検討条件で、トンネル下部に2 mほど、その下層と比較して剛性の低い層が存在するため、上部4.5 mに下部2 mの範囲も流動化処理土が施工されたと想定したケースである。掘削時に底板付近を地盤改良して仮設土留めの安定性を確保する補助工法は一般的であり、このような補助工法を積極的に振動対策に役立てることはできないか確認するための検討と位置づけられる。

Case10 からは開削トンネルの存在しないケースである。Case10 は埋戻しのない現地盤のケースで、開削トンネル施工前の状態である。Case11 は開削トンネルは存在しないが開削トンネルが存在する場合と同様に、4.5 m の深さまで流動化処理土があるケースである。自動車や列車走行で地盤が軟弱で、路面の変形進行が早い箇所や振動の大きい箇所では、地表直下を地盤改良することがあり、そのような改良を想定した場合である。Case12 は、その改良深さを2.0 m と Case9 の半分程度を想定したケースである。

Case13 は、振動の複雑さを考察するためのケースである。現地盤の表層 25 m の平均せん断波速度 $V_s=200$ m/s 程度の剛性をもつ半無限現地盤とした。この場合、側方地盤は無論のこと、底面粘性境界の物性も表層の平均 V_s と同じ剛性とする。これにより、インピーダンスの差がある境界はない、半無限の地盤の検討ができる。Case10 と比較することにより、表層地盤の水平成層の多層構造の影響を考察しようとするものである。

表-3 解析ケース

ケース	開削トンネル	地盤	埋戻し土				範囲	
			内容	V_s (m/s)	単位重量 (kN/m^3)	減衰 h		
Case 1	有	現地盤	N=10	170	17	h=0.01	上部 (4.5m)	
Case 2			処理土	370	14			
Case 3			N=5	140	17			
Case 4			処理土	200	14			
Case 5			300					
Case 6			500					
Case 7			処理土	370	20			
Case 8					14			h=0.1
Case 9								
Case 10	無	現地盤	現地盤	168,210	17.15	h=0.01	上下部 上部 (4.5m)	
Case 11			処理土	370	14			
Case 12								
Case 13		半無限(表層平均 $V_s=200$ m/s)					上部(2m)	

N:山土, 処理土:流動化処理土の意味

(3) 評価方法

加振は、地表面および地下鉄内部とし、鉛直方向に単位加振力(1 kN)で周波数を0~40 Hzまで0.5 Hz毎に加振して地表面の加速度を調査する。今回、加速度は鉛直方向に着目し、 $VAL=20 \cdot \log_{10}(A/A_0)$ 、 $A_0=10^{-5}$ m/sec² で振動加速度レベル VAL(dB)に換算して評価する。単位加振力による応答であるため、この結果を伝達関数と呼ぶこととする。

6. 流動化処理土による振動低減効果

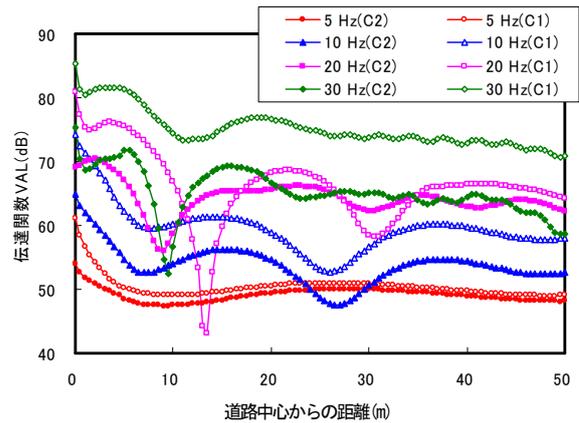
(1) 鉛直振動成分

まず Case1,2 の代表的な振動数に対する地表および地中加振の伝達関数の距離減衰を図-4 に示す。凡例の「C○」は表-3 の Case を意味する。なお、これらは単位加振力に対する応答(伝達関数)で、実際に生じる交通振動値ではないため参考値である。しかし、通常埋戻し土(N=10)から流動化処理土とした場合の振動値の相対的な差は意味がある。これより、以下のことが分かる。

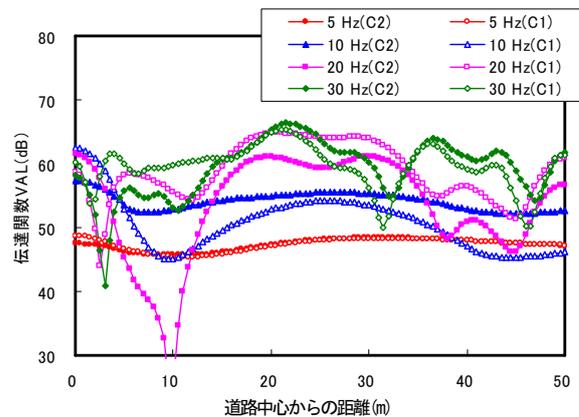
- (1)の地表加振に対して5 Hzでは変化が少なく、20 Hzでは場所により増減する。10、30 Hzでは、流動化処理土になるとどの距離でも振動が低下している。

- (2)の地中加振に対しては、全体的に地表加振よりも低減効果が少ない。5 Hzでは変化が少なく、20 Hzでは振動が減る地点が多いが、10 Hzでは振動が大きくなる傾向にある。30 Hzでは距離により増減する。

ここで、振動低減効果は地点毎に異なるが、全般的な振動低減効果を表す指標として0~50 mの振動値の差分(Case2-Case1)の平均値を算出して、図-5 に示す。これより、全般的にみると地表面加振では14~18 Hzで効果が少ないが、他の振動数では概ね低減効果がある。地中加振では18~30 Hzでは低減するものの、6~18 Hzおよび30 Hz以降は増加することが分かる。



(1) 地表加振



(2) 地中加振

図-4 伝達関数(鉛直成分, Case1, Case2)

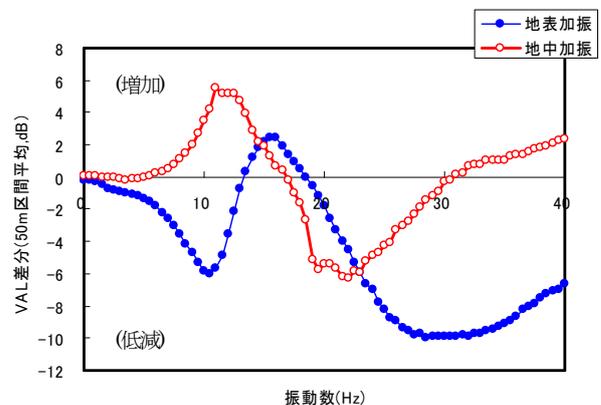
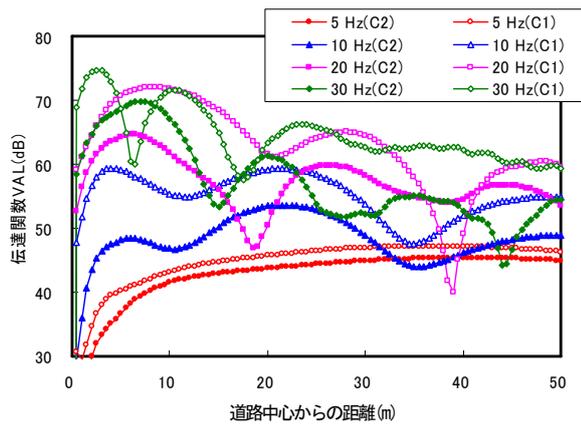


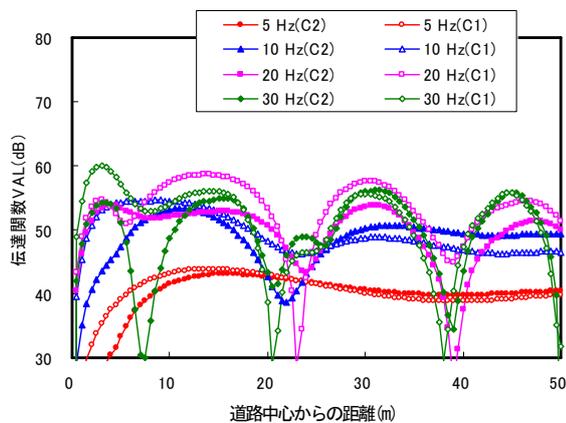
図-5 流動化処理土の振動低減効果(鉛直成分)

これより、流動化処理土は、地表加振による地盤振動に対して、より振動低減効果が高いといえる。

なお、図-5(2)より地表加振の流動化処理土では、加振点で振動が減少し、以降の距離低減の傾向は山砂でも同様である。一方、地中加振の場合は、一様な傾向ではなく複雑である。地表加振では加振部に埋戻し部があり、加振力が単純に分散された挙動となり、振動値は下がったが距離減衰の傾向はさほど変化しなかったと考えられる。一方、地中加振では構造物上方の伝播経路に変化があり複雑に振動性状が変化したと考えられる。



(1) 地表加振



(2) 地中加振

図-6 伝達関数(水平成分, Case1, Case2)

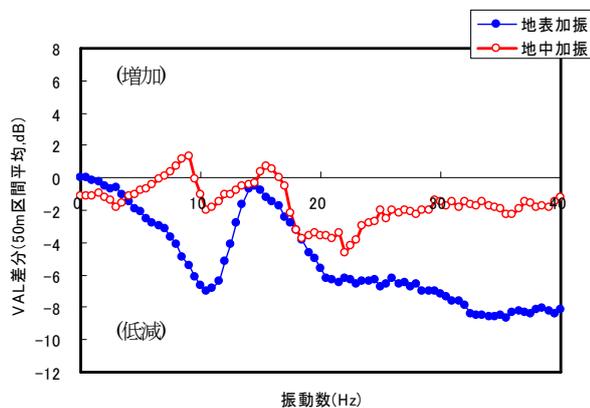


図-7 流動化処理土の振動低減効果(水平成分)

(2) 水平振動成分

水平振動成分を鉛直振動成分と同様に図-6に伝達関数を、図-7に振動加速度レベルの差分を示す。

図-6から振動の山や谷の位置は鉛直成分と異なることが分かる。たとえば、20 Hzに着目すると、鉛直成分では10 m付近が谷となっているが水平成分では谷にはなっておらず20 m付近に谷がある。このことは、ある振動成分で振動が少ないからといって他の振動成分も同じく小さいと判断することの危険性を示している。

また、距離・地点により振動値が増減しながら振動が減衰していくことも分かる。これより、振動の評価点も特定の1点では全体の振動傾向を見誤る可能性のあること、なるべく距離的に連続して振動値を把握することが重要と考えられる。これらは、振動問題ではよく認識されていることではあるが、実際の自治体等の振動計測では費用等の問題もあり、多数の点が計測されることは少ない。

個々の振動成分でみると鉛直・水平で振動特性は異なる。ここで、鉛直成分と同様に、50 m間の振動値差分の平均値を用いて振動低減効果を調査する。その結果を図-7に示す。鉛直の場合の図-5と比較すると、地表加振よりもやや影響が小さくなるものの、概ね同じ傾向と考えられる。

これより、単一の地点では振動評価は増減する可能性があるが、全般的にみると水平成分も流動化処理土による振動低減効果が期待できる。

なお、今回は平均的な評価として図-5 および図-7では50 m区間の平均値を採用した。個々の地点や他の区間平均での評価については、今後、検討を進める予定である。

7. 埋戻し土の特性と地盤振動低減効果

(1) 開削トンネル有の場合

表-3のCase1~9について検討する。各ケースの伝達関数の50 m区間の平均値を図-8に、各ケースとCase1(埋土N=10)との差分を図-9に示す。これより、以下のことが分かる。

- ・締固めの影響として、Case3(N=5)の場合に着目すると、N=10の場合より振動が最大5 dB程度増加する。
- ・剛性の影響として、Case4~6に着目すると、剛性が高くなるほど振動低減効果が高いことが分かる。
- ・単位体積重量の影響として、Case7($\gamma=20 \text{ kN/m}^3$)とCase2($\gamma=14 \text{ kN/m}^3$)を比較すると、15~30HzではCase7($\gamma=20 \text{ kN/m}^3$)の方が振動が小さいが、他はCase2($\gamma=14 \text{ kN/m}^3$)の方が振動が小さい。単位重量が増加しても全ての振動数領域で一様に低減効果があるわけでないことに注意する必要がある。
- ・減衰の影響としてCase8(h=10%)とCase2(h=1%)を比較すると、低振動数では変化はほとんどなく、30 Hz以上でも2 dB程度と少ない。減衰を増加させたのは埋戻し部のみであるので、振動している地盤に占める割合が少ないためと考えられる。
- ・開削トンネルの底版改良の影響は、Case9とCase2の比較より、変化はほとんど見られない。図-9は地表加振

のため、開削トンネル底版部の影響は小さかったと考えられる。なお、地下加振でも影響が小さいことを確認しており、底版下部とその下層の剛性の差がそれほど大きくなかったためと考えられる。

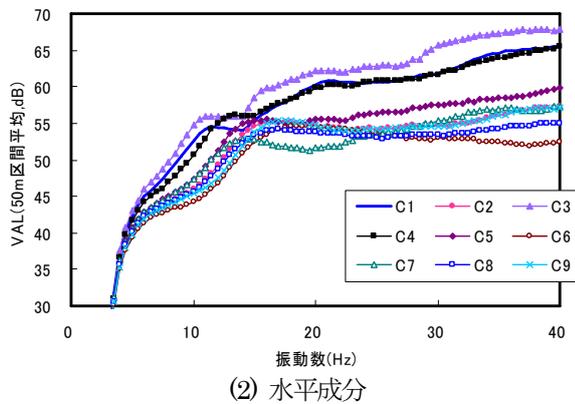
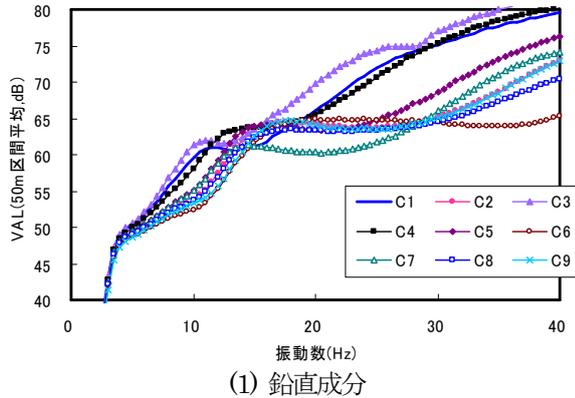


図-8 伝達関数(地表加振,トンネル有)

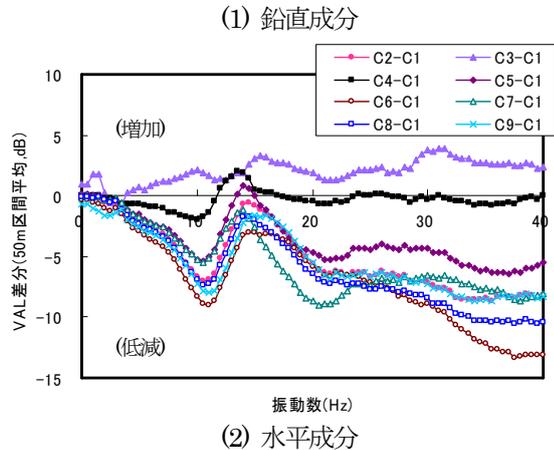
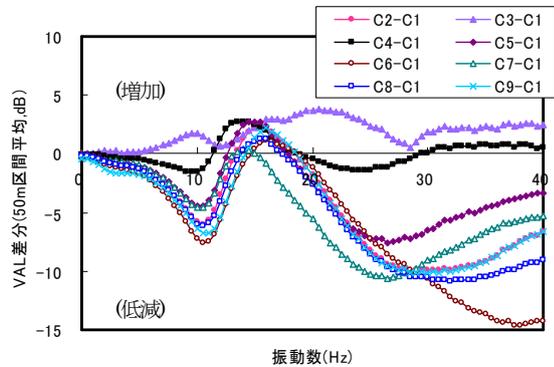


図-9 Case1 に対する振動低減効果(地表加振,トンネル有)

(2) 開削トンネル無(地盤のみ)の場合

表-3 の Case10~13 について検討する。各ケースの伝達関数の 50 m 区間の平均値を図-10 に示す。図-11 に、Case10 については Case1 との差分を、Case11,12 は Case10 との差分を示す。これより、以下のことが分かる。

- 開削トンネルの影響として、Case10(原地盤のみ)は Case1(開削トンネル,埋戻し N=10)より、5~13 Hz では振動が小さい。これは、開削トンネル(通常の埋戻し土)の建設により振動がやや大きくなる可能性があることを示している。なお、この振動数領域は流動化処理土を用いた場合は振動低減効果が見込める領域である。
- 地盤のみの場合の、流動化処理土の振動低減効果として、Case11,12 と Case10 を比較する。地表加振に対して 4.5 m および 2.0 m の流動化処理土を施工すると、振動低減効果があることが分かる。鉛直の場合、改良厚さを 2 m としても 10 Hz 以上の振動数で効果はみられる。これより、比較的少ない施工で振動低減効果を発揮できる可能性がある。

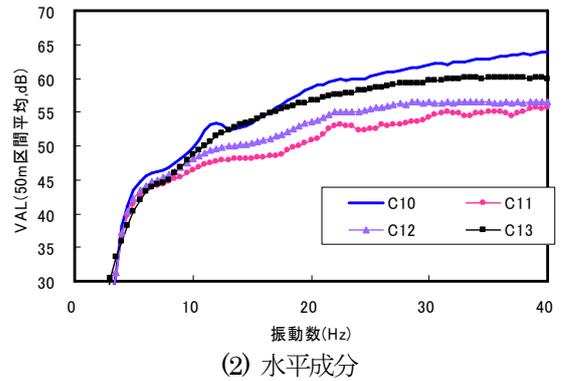
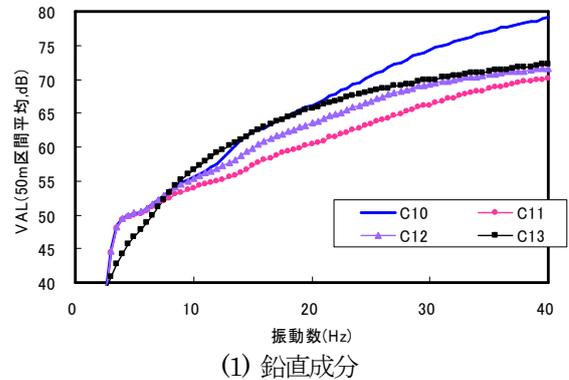
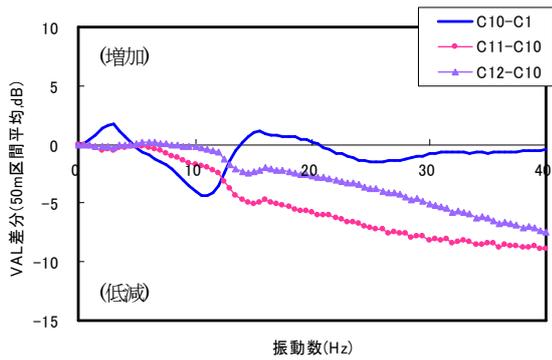
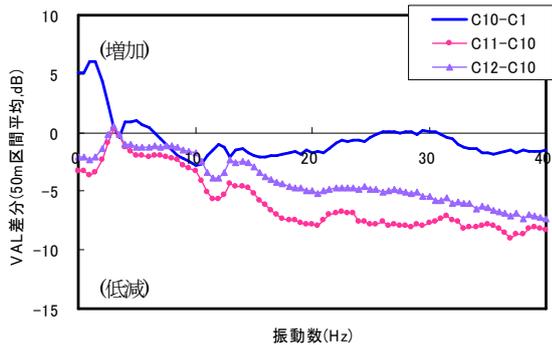


図-10 伝達関数(地表加振,トンネル無し)



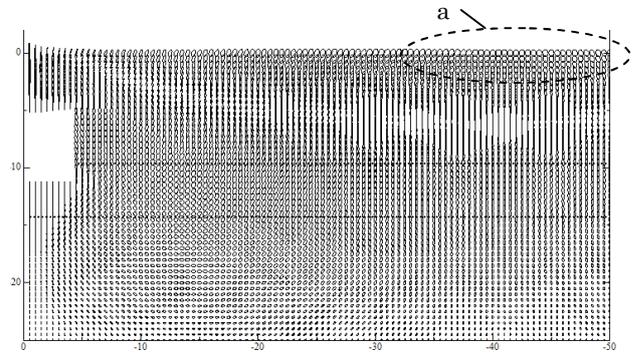
(1) 鉛直成分



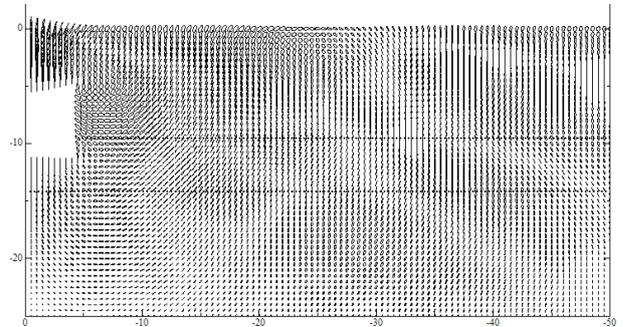
(2) 水平成分

図-11 振動低減効果(地表加振,トンネル無)

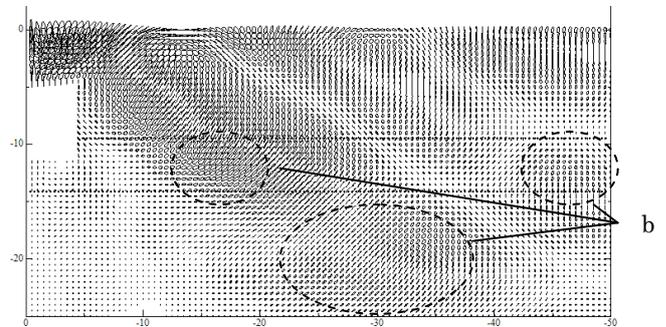
加振点付近では静的変位の減少が見込まれるが、5 Hz の波長(40 m)における埋戻し部の割合は非常に小さくなるため埋戻し部の影響は表れにくいと考えられる。逆に、20 Hz の波長(5 m)などでは埋戻し部の影響が表れやすいと考えられる。



(1) 5Hz 加振



(2) 10Hz 加振



(3) 20Hz 加振

図-12 Case1(埋戻し: N=10)の変位軌跡

8. 変位軌跡の可視化による地盤振動特性の考察

(1) 開削トンネル有の場合

ここでは、振動が距離に応じて増減することや、振動数により大きく性状が変化することに対して、各節点の振動変位軌跡(オービット)の表示により、現象を考察する。

開削トンネルの存在する場合について、Case1(埋戻し: N=10)の変位軌跡を図-12に、Case2(埋戻し: 流動化処理土)を図-13に示す。なお、変位のスケールは各振動数毎に適当な倍率を乗じて認識しやすいように調整している。

表層の平均せん断波速度は200 m/sであり、5 Hz 加振では波長は $200/5=40$ mとなる。同様に、10 Hz で20 m、20 Hz で10 mとなる。地表面の軌跡をみると5 Hz では遠方まで一様な振動をしているが(図-12 a 部)、20 Hz のように高い振動数になると振動の増減が目立つようになり、地中内部でも地層境界付近で干渉し振幅が増減する箇所があることが分かる(同図 b 部など)。

また、図-4 および図-6 で考察した20 Hz 鉛直振動が12 m 付近で谷になっているが、同位置では水平振動成分が存在する様子も確認することが出来る。

図-13 より20 Hz の場合では、流動化処理土を用いると振動が全体的に小さくなることが分かる。(図-12(3)と図-13 は同スケール)

これらの図より、図-4 などの振動低減効果の有無に関して考察する。埋戻し部はトンネル上部のみであるので、波長の長い5 Hz などでは、流動化処理土を用いた場合、

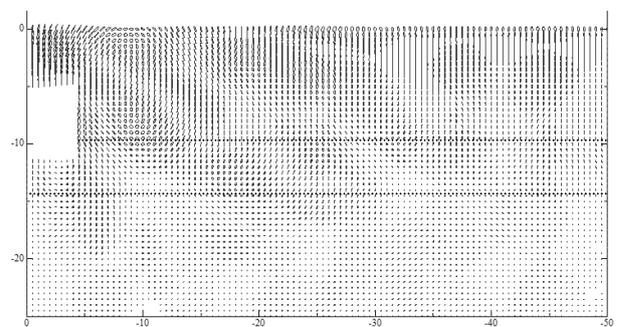
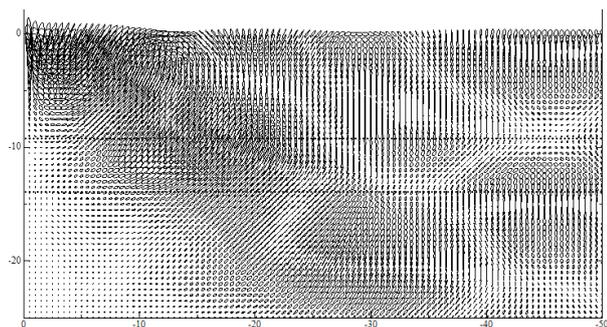


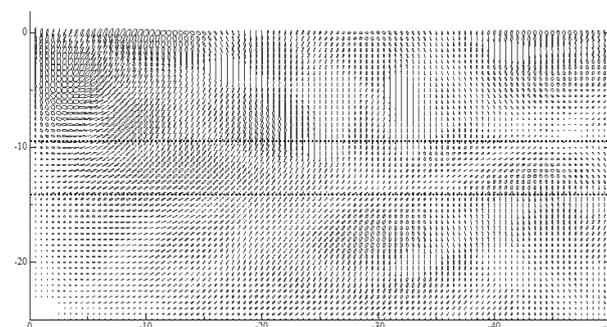
図-13 Case2(埋戻し: 流動化処理土)の変位軌跡 (20Hz 加振)

(2) 開削トンネル無(地盤のみ)

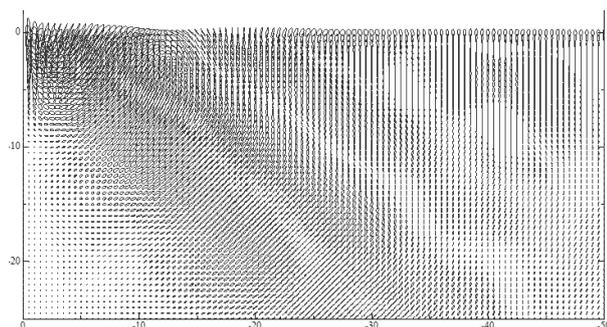
開削トンネル無の地盤のみの場合についても、変位軌跡を描き図-14に示す。同図(1)の現地盤では多層地盤の影響で振動が地表、地中とも複雑な様子が分かる。同図(2)で、流動化処理土を配置すると振動は全体的に振幅が小さくなっていることが分かる。一様な半無限地盤とした同図(3)では、地表面に着目すると25m以降では一様な表面波のみが残存しており、この距離では(1)のような振幅の増減は見られない。地表面の振動が距離により増減することは、表層が多層構造であることも原因であり、振動評価においては、評価点の設定は重要と考えられる。



(1) Case10 現地盤



(2) Case11 流動化処理土



(3) Case13 半無限地盤

図-14 開削トンネル無しの変位軌跡(20Hz)

9. まとめ

本研究では、開削トンネルの埋戻し土に着目し、通常の埋戻し土の場合と流動化処理土を用いた場合を中心に、埋戻し部の特性を変化させた場合の地盤の振動特性を2次元

FEMにより解析的に考察した。なお、本検討での対象振動数は0~40 Hzまでとした。

評価は、通常の埋戻し土と流動化処理土の場合の、加速度伝達関数の差分を主な指標として行った。その結果、以下のことが分かった。

- 流動化処理土による埋戻し改良は、地表面交通荷重による地盤振動を低減する効果がある。
- 流動化処理土による地盤振動低減効果は、トンネル内部の列車荷重に対しては、地表面交通荷重の場合ほどの効果がない。

さらに、振動変位軌跡の可視化等により、振動特性を考察した結果、振動対策を考える上での以下の留意点を再認識することができた。

- 鉛直振動、水平振動の着目により地点の評価は異なる。
- 環境評価として、地表面振動を官民境界や工事境界の単一地点と方向で評価されることが多いが、振動の伝播は地層構成で広がり方が異なるため、条件によっては複数指標による評価が適切かもしれない。

以上より、従来、環境保全や施工性の観点から有用とされてきた流動化処理土が、交通振動対策としても有効であり、流動化処理土の新たな利点を指摘することができた。

ただし、今回の解析は正弦波による仮想的な加振力による評価であり、そのため振動の節が顕著に現れた可能性がある。実際の不規則波では、これらの影響は小さくなる傾向にある。今後、より詳細には交通振動が不規則波であることも考慮する必要がある。

同様に、今回の評価は伝達関数の差分に着目したものであり、加振源の荷重特性は埋戻し土により変化しておらず、埋戻し土と走行荷重との連成の考慮なども、今後の課題である。

参考文献

- 1) 木幡行宏・市川昌嗣・Nguyen Cong Giang・加藤勇一：繊維補強した流動化処理土の三軸せん断に伴う損傷特性の検討，ジオシンセティックス論文集，第22巻，pp.55-62, 2007
- 2) 矢的照夫・梅原俊夫・青木一二三・中村晋・江崎順一・末富岩雄：兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析，土木学会論文集No.537/I-35, 303-320, 1996.4
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計：鉄道総合技術研究所 平成11年
- 4) 江島淳：地盤振動と対策，集文社，昭和54年
- 5) 早川清：改良軌道による地下鉄振動の軽減対策，土木学会論文集，No.659/III-52, 17-25, 2000.9
- 6) 渡辺勉・横山秀史・武居泰：鉄道トンネル上の地盤振動解析，RRR 2008.10
- 7) 津野究・古田勝・藤井光次郎・長嶋文雄・日下部治：地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性，土木学会論文集 No.792/III-71, 185-197, 2005.6

(2009年4月9日 受付)