

**国際線エプロンにおける地盤改良振動試験
～SCP工法による既設構造物への振動影響調査(現地試験施工)～**

国際線エプロン JV 岡本達也

キーワード：SCP工法、既設構造物近接工事、試験施工、時間率振動レベル

1. まえがき

本事業のうち、既設構造物周辺の各地盤改良工については、既設構造物に発生する振動や変位等が確実に許容値以内に抑えられることを試験施工等により十分に確認した上で、適切な離隔距離を設定し、その結果を実施設計及び施工計画に反映することが、有識者等委員会の意見として求められている。

本事業の液状化対策としては、サンドコンパクションパイル工法（以下、SCP工法）、静的締固め砂杭工法、変位低減型深層混合処理工法の3工法の地盤改良工で施工する。このうちSCP工法は、パイプロハンマを用いて施工を行うことから既設構造物に対する振動影響が大きく懸念される。そこで、重要既設構造物である京急シールドトンネル及び三愛シールドトンネルに対して実施工機による試験施工を実施し、既設構造物に発生する振動や変位等が確実に許容値以内に抑えられることを十分に確認した上で、適切な離隔距離を設定し、その結果を実施設計及び施工計画に反映させた。

2. 試験施工計画

2-1 地盤条件

試験施工近傍の土層断面を図-1に示す。上位から埋土層（Bs層）、沖積砂質土層（As1層）、沖積粘性土層（Ac2上層、Ac2下層、Asc層）、洪積粘性土層（Dc1層、Dc2層）、洪積砂質土層（Ds1層、Ds2層、Ds3層）が堆積している。

SCP工法で施工する範囲は、液状化の可能性のある沖積砂質土層（As1層：AP-8.0mまで）である。

このAs1層は、当該地区全体に広く分布し、N値 5～12（Vs 130～180m/s）の地層である。その下位の沖積粘性土層（Ac2上層、Ac2下層）も当該区全体に広く分布し、N値 1～3（Vs 100～140m/s）の地層である。これらの沖積層は、地区全体に約40mの層厚で全体的に分布している。Vs 300m/sの耐震基盤（Ds3）層（約AP-50m）までの土層は、洪積層の範囲で複雑な層厚変化は認められるが洪積層上面と耐震基盤上面がほぼ水平であり、振動の伝播特性を検討する上では当該地盤はほぼ水平成層であると判断されることから、AP-8mまでのSCP打設による（点）振動は、表層の振動伝播に支配され、深層部の固い層からの反射による振動の重複による影響は少ないと判断される。

よって本試験施工で得られる振動の距離減衰特性は、単純な水平成層状態における振動の伝播特性として捉えることができると判断される。

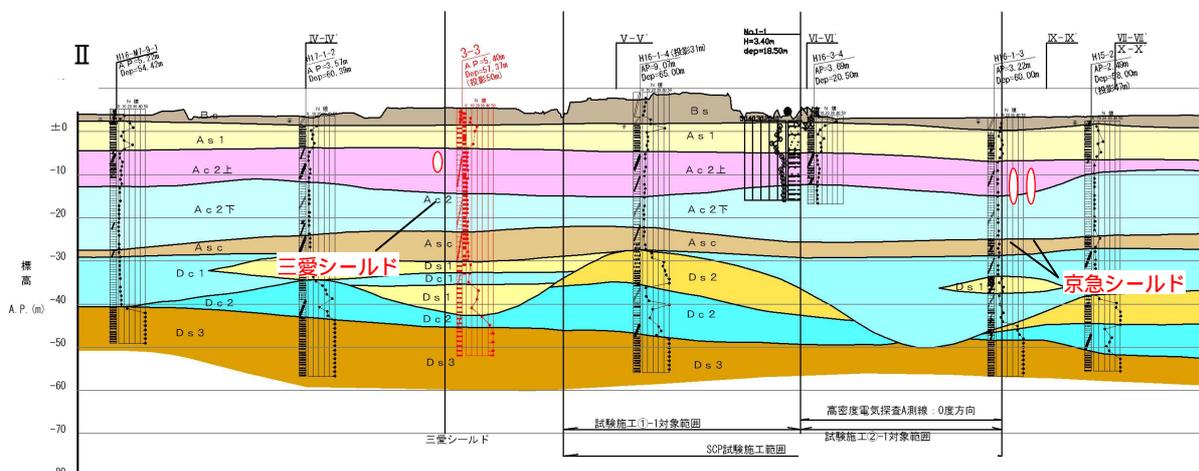


図-1 SCP試験施工近傍の土層断面図

2-2 検討フロー

地盤改良工による既設構造物への振動影響に対する検討フローを図-2に示す。

対象構造物に対して、SCP工法実機による試験施工を行い、SCP工法による地中内、構造物内での振動レベルの測定、当該地区の振動距離減衰の把握を行う。得られた結果より適用範囲（離隔距離）を設定し、本施工に反映した。

2-3 既設構造物への振動に対する規制値について

特定建設作業等における振動の規制で用いられる振動レベルの評価方法としては、時間率振動レベルがある（図-3参照）。これは測定結果の上位10%、下位10%を除いた80%のデータのうち、その上端値を採用するものであり、本検討においても80%レンジ上端（L10）で評価する。

既設構造物のうち、京急・三愛シールドに対する規制値を下記に示す。

- ・京急シールド 昼 55dB
夜 85dB
(要求水準書による規制)
- ・三愛シールド 75dB
(建設作業振動規制規準による規制)

2-4 既存の知見による距離減衰特性の推定

SCP工法等、各種地盤改良工事による振動の距離減衰特性については図-4に示す知見があり、今回の振動機で推定した場合、SCP工法による振動は、5m近接で約100dB、100m地点で約75dB、200m地点で約60dBである。

ただし、図-4は地表の振動レベルからの離隔であり、これに対して各々のシールドがある地中の振動レベルは、地表の振動レベルに対して、約5~10dB小さいという傾向が知られていた²⁾。これより、約10dBを加えた規制値に対する離隔を確保すればよいと想定し、離隔距離は京急シールド規制値55dB（昼）に対しては約130m、三愛シールド規制値75dBについては約20mと推定した。

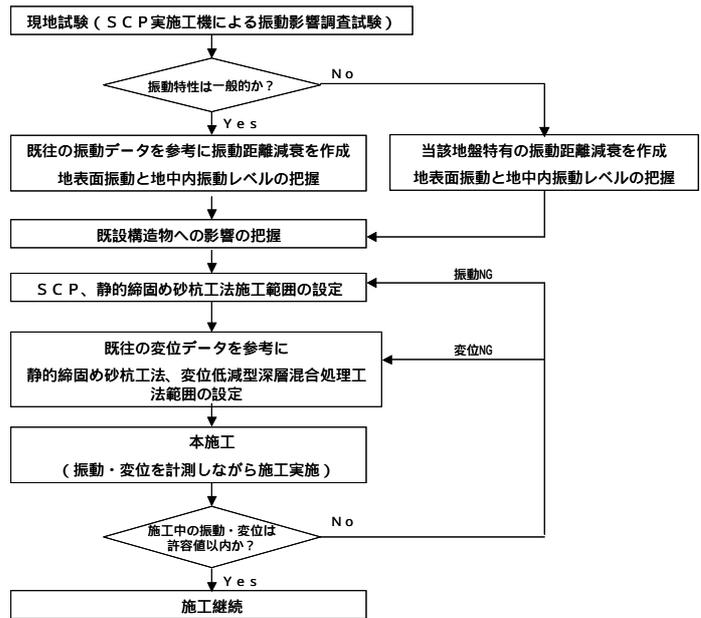


図-2 検討フロー

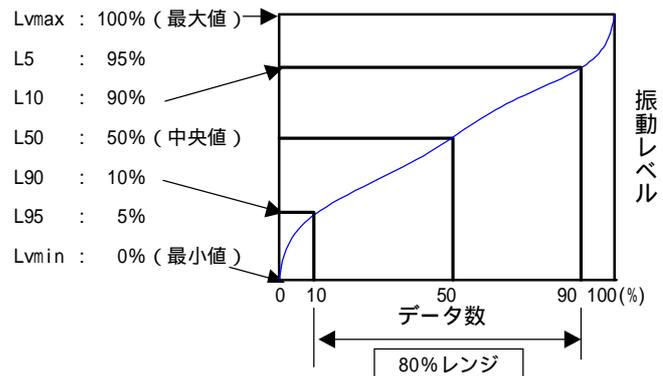


図-3 時間率振動レベルの概念図

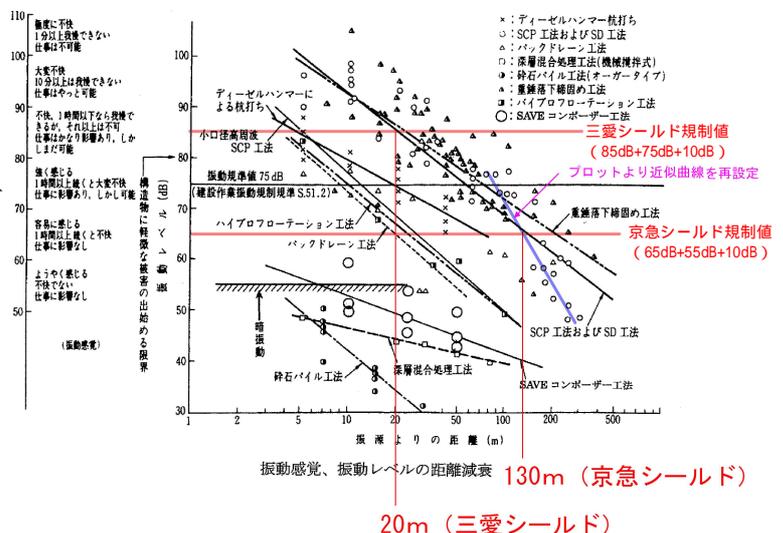


図-4 各種地盤改良工事における振動の距離減衰特性¹⁾

2-5 試験施工計画

2-5-1 地盤振動特性の把握（試験施工）

当該地区の振動距離減衰の把握及び地表面と地中での振動レベルの関連性を確認することを目的とし京急及び三愛各シールドから200m以上離れた位置で試験施工を行った。

試験施工では、加速度計の位置より200、100、50、30m、10m位置でSCP杭をAP-8.0mまで打設した。なお、10m位置では同心円（放射）探査を実施した。試験施工の計測概念図を図-5に示す。

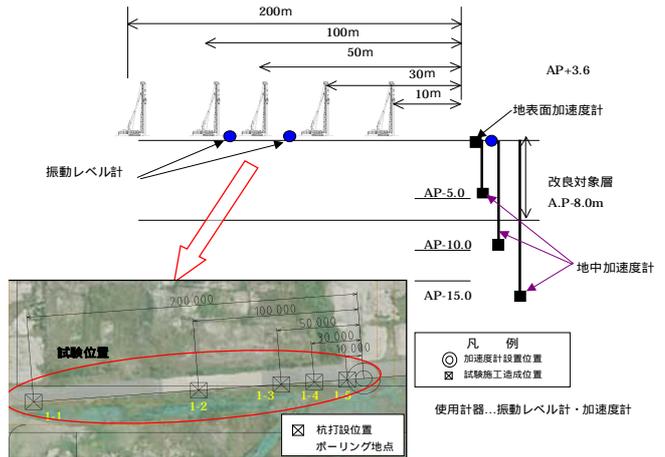


図-5 試験施工 概念図

2-5-2 シールド近傍での試験施工（試験施工）

京急及び三愛各シールドに与える振動影響について把握するため、それぞれ試験施工-1、-2を行った。加速度計は各シールド内及び地表面に設置して測定した。また、暗振動レベルを把握するために、振動レベル計を更に地表3ヶ所、トンネル内（京急：3ヶ所、三愛：2ヶ所）に設置して測定した。試験施工の計測概念図を図-6に示す。

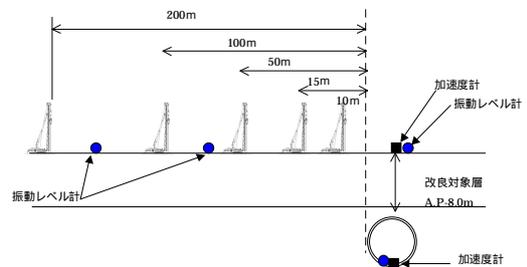


図-6 試験施工 概念図

2-6 地盤内加速度計の設置方法

地盤内加速度計の設置状況図を図-7に示す。地盤内加速度計の設置に際しては、地層確認を目的として、ボーリング調査と標準貫入試験（1mピッチで実施）を実施した。

2-7 地表面及びトンネル内加速度計の設置方法

地表面加速度計の設置状況図を図-8に、各トンネル内の加速度計設置位置を図-9に示す。

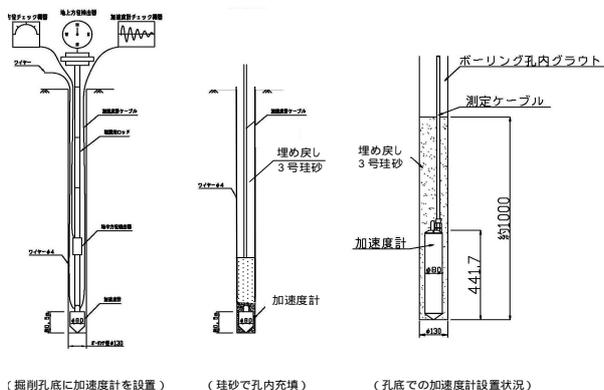


図-7 地盤内加速度計設置状況図

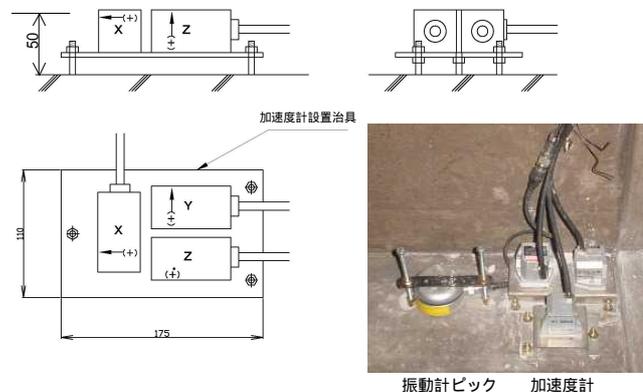


図-8 地表面加速度計設置状況図

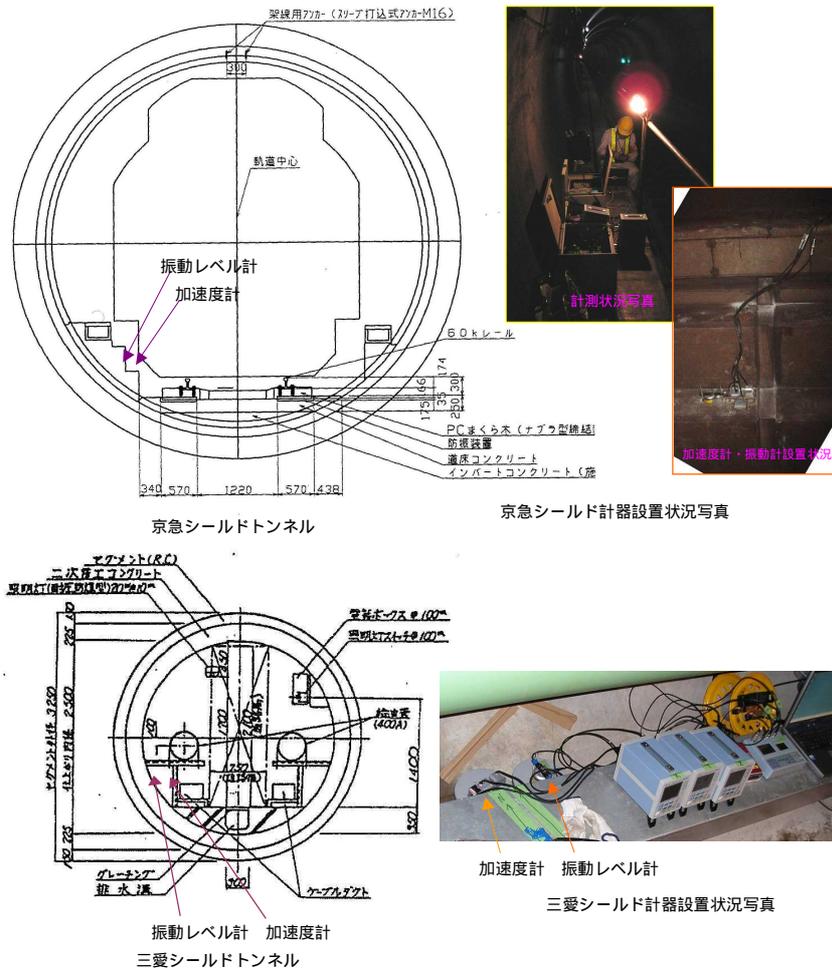


図 - 9 トンネル内加速度計設置位置

3. 試験施工結果

3-1 試験施工範囲のS波速度分布特性

振動伝播特性（距離減衰特性）の把握を目的とした高密度表面波探査の測線を図 - 10、同調査によるS波速度分布を図 - 11～13に示す。

As 1層とAc 2層のS波速度の差から、地層を区分すると、黄色～緑系は砂質土系で、水色～青色系は粘性土に区分される。

これより、土層構成がほぼ水平成層であること、またS波速度分布も異常なところがないことから、試験施工で得られる振動の距離減衰特性は、当該地区の他の施工エリアにおいても、ほぼ同等の土層状態であれば問題ないと判断される。

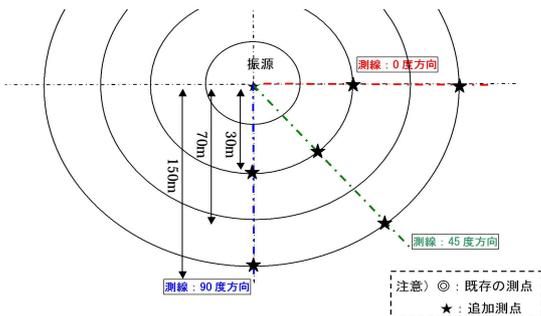


図 - 10 高密度表面波探査の測線

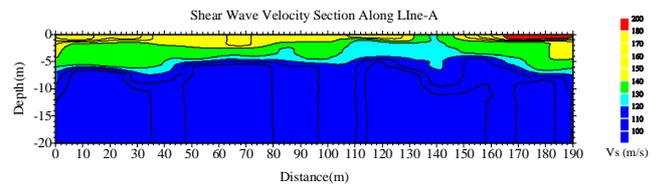


図 - 11 S波速度分布 (0度方向)

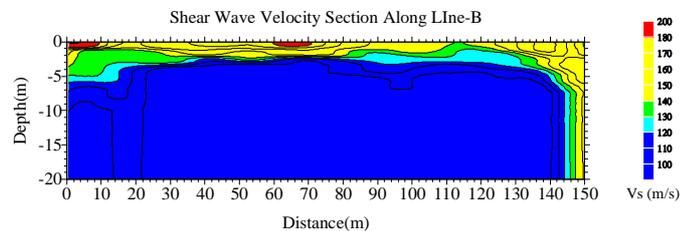


図 - 12 S波速度分布 (45度方向)

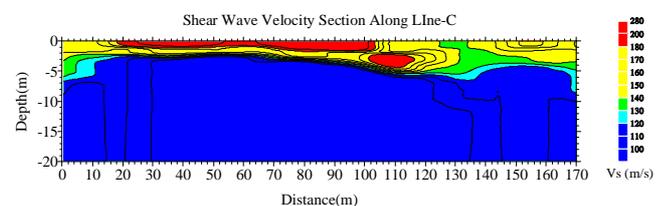


図 - 13 S波速度分布 (90度方向)

3-2 当該地の暗振動

当該地区の地表面の暗振動は、約 14~20dB である。

京急シールド内の振動レベルは「列車運行時（昼間）：L10 75dB、暗振動（昼間）：L10 45~50dB、暗振動（夜間）：L10 14dB」である。図 - 14 に 7 時 14 分~8 時 24 分間の振動レベル測定例を示す。

昼間の列車運行時の振動レベル L10 75dB という数値は、本工事の振動規制値「昼間：55dB」を上回る数値である。規制値の L10 55dB が重なった場合の振動レベルを計算したところ、規制値の L10 55dB が加わっても、増加振動は L10 0.04dB であり、問題ないものと判断される。

一方、三愛シールド内の暗振動は「暗振動（夜間）：L10 36dB」である。本工事の規制値「昼・夜：75dB」に対して余裕のある暗振動レベルである。

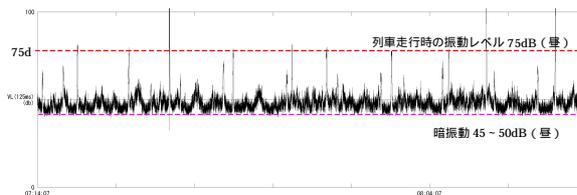


図 - 14 列車走行時の振動レベル測定例
(7時14分~8時24分)

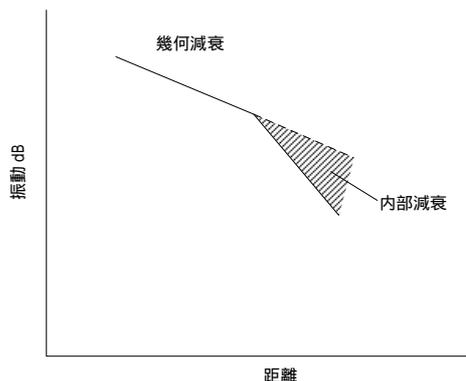


図 - 15 距離減衰の一般的な傾向

3-3 地盤の振動特性

地盤内を振動が伝播する場合、振源から遠ざかるほど振動は小さくなるのが普通であり、通常これを距離減衰と呼んでいる。地盤内を伝播する振動は、地表付近や地下深層部の硬質地盤、あるいは様々な地形・地質条件や構造物の条件等、伝播経路が複雑であること、また、表層地盤の増幅特性が関係すること、土の内部粘性に起因した減衰特性が影響すること等から、理論的に検討することは困難である。

ここで、距離減衰は、振動の幾何減衰と土の内部減衰によるものであり、後者は一般的に粘性土の減衰定数で 0.02~0.01 の値である。この 2 つの減衰は、一般的に図 - 15 に示すような傾向として表される。

図 - 16 には、地表面と地中の振動レベルを、図 - 17 には当該地区の面的な地表の振動レベルを示す。

これより、以下のことがわかる。

1) 地表の振動レベル

距離 10~200m の範囲 L10 78~60dB

2) 地中の振動レベル

距離 10~200m の範囲 L10 78~63dB

3) 地表と地中の振動レベル：大差不い（ほぼ同一）

4) 面的な地表の振動レベル：大差不い（同一）

地盤特性に変化が無ければ、地区全体で地盤の振動特性は同じであると判断される。

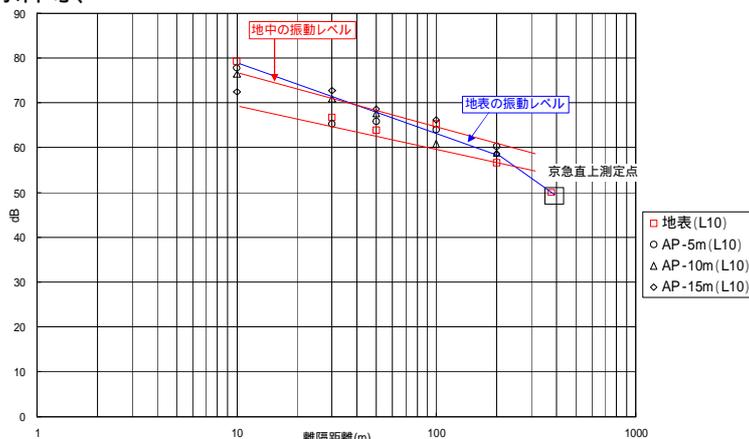


図 - 16 地表面と地中の振動レベル

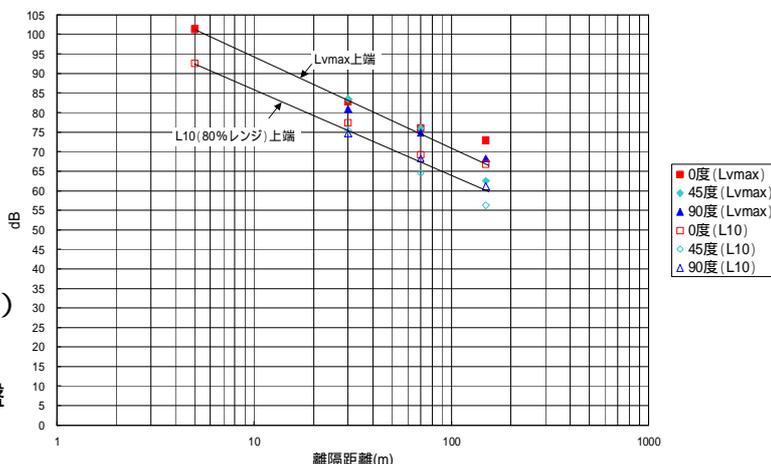
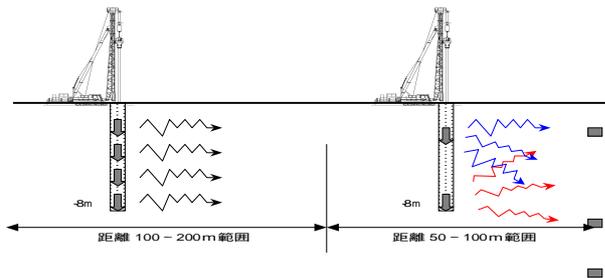


図 - 17 当該地区の面的な地表の振動レベル

ここで、『地表と地中の振動レベル：大差ない（ほぼ同じ）』という結果が得られた理由として、以下のことが考えられる。

S C P 杭打設において、図 - 18 に示すように締固め打設先端の位置と測定深度との振動伝播距離に大きな差がない。

S C P 杭打設強度は、図 - 19 に示すように、N 値が最も大きい As 1 層で大きく、振動レベルも同層内のケーシング貫入時と打ち戻し時に大きくなる。



基準高さ(AP+3.4m)		杭打設標高: AP+3.4mの場合(地表)				
AP-()m	離隔距離(m)					
	200	100	50	30	10	
3.4	200.00	100.00	50.00	30.00	10.00	
-5	200.18	100.35	50.70	31.15	13.06	
-8	200.32	100.65	51.28	32.09	15.16	
-10	200.45	100.89	51.76	32.86	16.72	
-15	200.84	101.68	53.28	35.19	20.94	
備考	大差ない					

基準高さ(AP-5m)		杭打設標高: AP-5mの場合(GL-8.4m)				
AP-()m	離隔距離(m)					
	200	100	50	30	10	
3.4	200.18	100.35	50.70	31.15	13.06	
-5	200.00	100.00	50.00	30.00	10.00	
-8	200.02	100.04	50.09	30.15	10.44	
-10	200.06	100.12	50.25	30.41	11.18	
-15	200.25	100.50	50.99	31.82	14.14	
備考	大差ない					

基準高さ(AP-8m)		杭打設標高: AP-8mの場合(GL-11.4m)				
AP-()m	離隔距離(m)					
	200	100	50	30	10	
3.4	200.32	100.65	51.28	32.09	15.16	
-5	200.02	100.04	50.09	30.15	10.44	
-8	200.00	100.00	50.00	30.00	10.00	
-10	200.01	100.02	50.04	30.07	10.20	
-15	200.12	100.24	50.49	30.81	12.21	
備考	大差ない					

地盤のN値
硬軟及び土の内部減衰が支配的

小

伝播距離
が支配的

大

図 - 18 杭打設深度と加速度計設置標高の関係

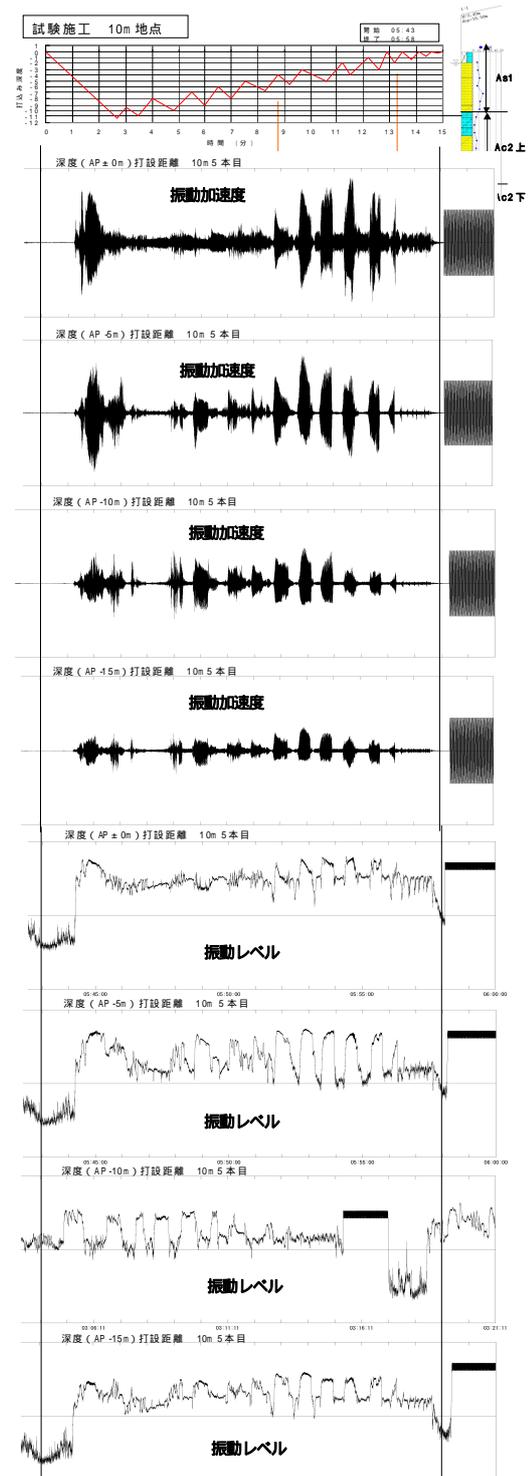


図 - 19 杭打設時間と振動時刻歴

3 4 京急シールド内の振動伝播特性

京急シールド内に伝播する振動は、図 - 20 に示したように大きく 2 つに区分される。

起振源から最短距離で同心円状に伝播する振動（図 - 20 参照）

起振源から地盤を介して最短距離で京急シールド躯体を伝播する振動（図 - 20 参照）

前者は、同心円状に伝播する一般的な振動である。後者は、地盤を介して最短距離でシールドへ直角に入射した振動がシールド躯体を伝播（減衰）していく振動を表したもので、その場合、図 - 21 に示すように、線状の長いトンネル構造物に様々な方向から伝播してくる振動の重ね合わせと減衰を考慮する必要があるが、本試験ではこれらの波の干渉は今回の測定で得られていると判断して整理した。

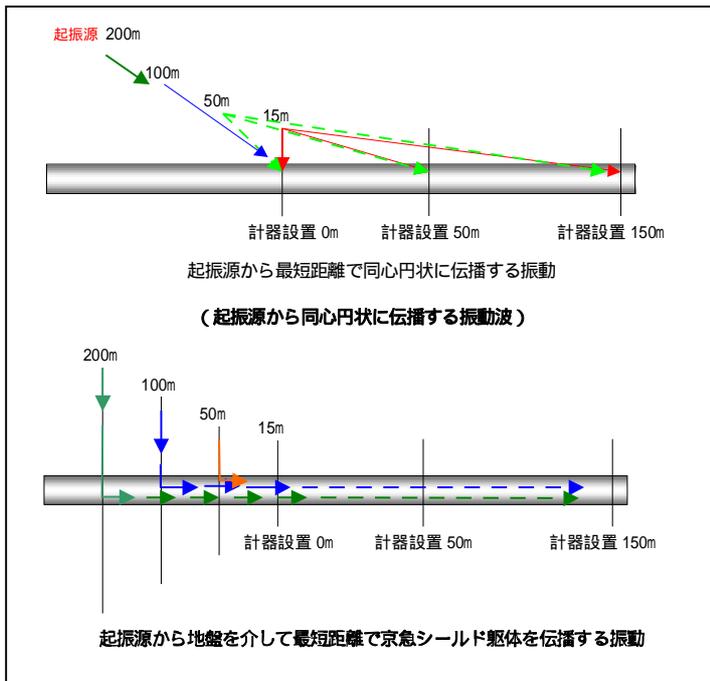


図 - 20 京急シールド内に伝播する振動形態

各起振源から京急シールドに下ろした垂線とシールドの交点をそれぞれ基点とすると、各基点からの追加距離は表 - 1 に示すとおりとなる。

図 - 22 には、起振源から最短距離で同心円状に伝播する振動の距離減衰特性を、図 - 23 には、伝播距離の補正(表 - 1)を加えた京急シールドトンネル躯体を伝播する振動の距離減衰特性を示す。

規制値を満足するための離隔距離の設定は、起振源から最短距離で同心円状に伝播する振動波の距離減衰特性(図 - 22)から設定した。

これより、以下のことがわかる。

- 1) シールド直上の地表の振動レベル(図 - 22 参照)
距離 12 ~ 300m L10 85 ~ 55dB
- 2) シールド内の振動レベル(図 - 22 参照)
距離 12 ~ 300m L10 75 ~ 40dB
- 3) シールド内の振動レベルは、直上の地表の振動レベルに対して、約 120m 範囲内は約 4 ~ 10dB、120m 範囲を超えると約 5 ~ 15dB 小さいことから、京急シールドの規制値である「昼間：55dB、夜間：85dB」にこの値を加えた振動レベルを、地表の規制値として考える事ができる(図 - 22 参照)。
- 4) シールド躯体の振動伝播特性
地盤から伝わってくる振動レベルの大きさによって、トンネル躯体の減衰特性が異なる。これは、セグメント継手及び覆工コンクリート等の

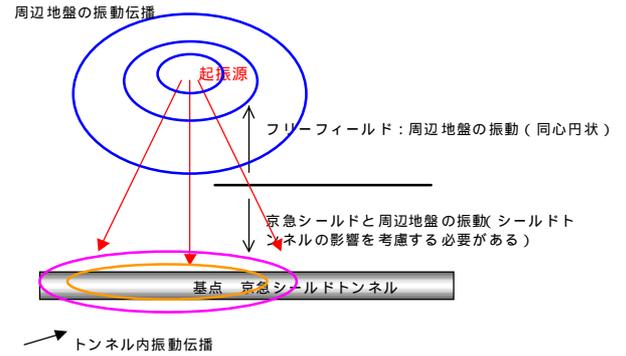


図 - 21 周辺地盤からシールド躯体の振動伝播の模式図

表 - 1 各基点からの追加距離

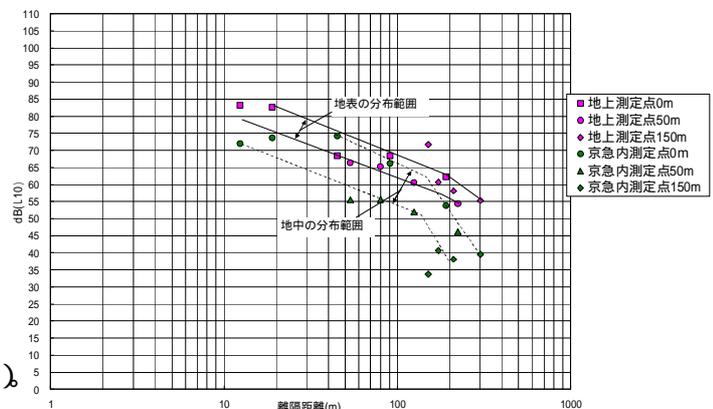
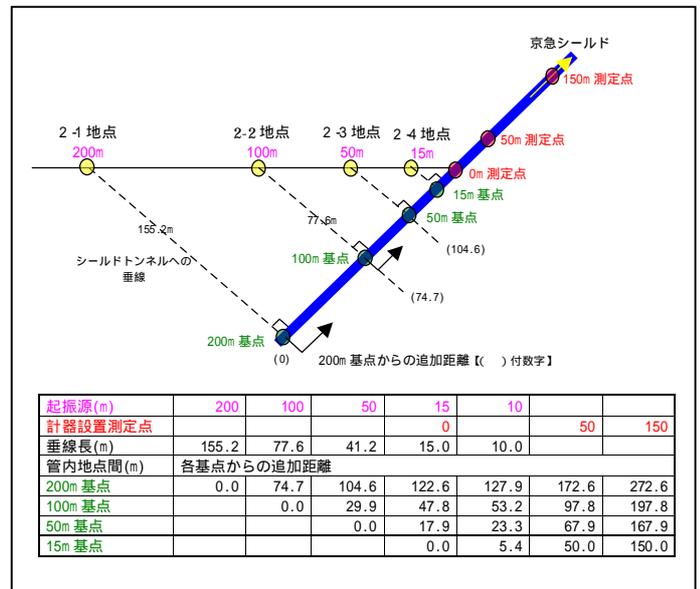


図 - 22 起振源から最短距離で同心円状に伝播する振動の距離減衰特性

影響によるものと判断される(図-23参照)。

ここで、図-23の意味するところは、地表を伝播してきた振動(緑のライン)、例えば、50m基点でL10 70dB相当の振動がトンネル躯体に伝播したとすると、トンネル躯体の振動は同図に示した関係(側点)に沿って減衰する事を表している。減衰特性は、基点の振動レベルと直線の勾配から、振動レベルが、大きい程トンネル躯体の振動は減衰しにくく、小さい程トンネル躯体の振動は減衰しやすいことがわかる。

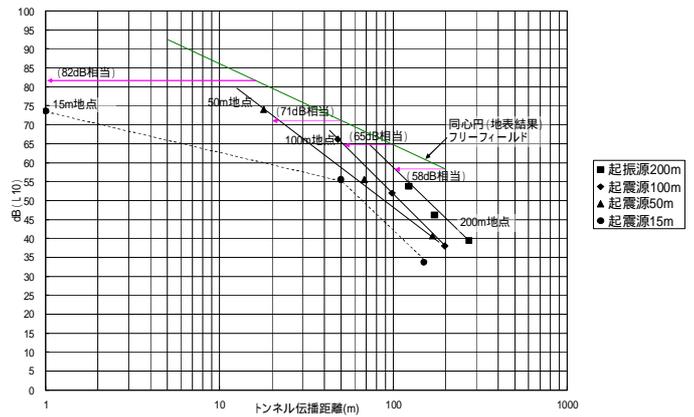


図-23 起振源から地盤を介して京急シールド躯体を伝播する振動の距離減衰特性

3.5 三愛シールドトンネル内の振動特性

三愛シールドの距離減衰特性を図-24に示す。

同図より、三愛シールドトンネルの振動レベルは、地表の方がL10で8~20dB程度の範囲で、トンネル内より大きい値が得られた。

また、三愛シールドの測定値は、京急シールドの測定値を含めた全地中の分布範囲とほぼ同じ範囲で得られている。したがって、三愛シールドの振動は、地中のデータを用いることによって推定できると判断される。

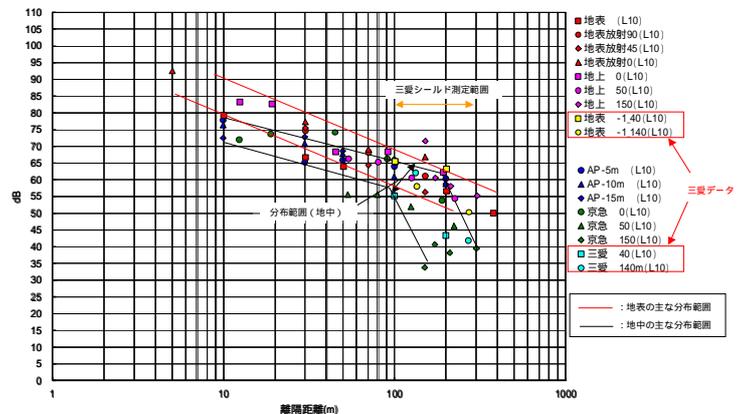


図-24 全地中測点と三愛シールドの距離減衰特性

3.6 測定値L10と規制値、離隔距離の関係

京急シールド及び三愛シールドにおける距離減衰特性を図-25に示す。京急シールド部についてはシールド内の3測定点(0m、50m、150m)で得られた全ての振動レベル値を用いた。三愛シールド部については、SCP杭の離隔距離は100m以上であることから、規制値に近い範囲の離隔距離の設定精度を上げるため、試験施工により得られた距離減衰特性も併記し、これらの振動レベル値も用いた。

図-25には振動レベル値から求めた近似曲線及び回帰式を併記した。

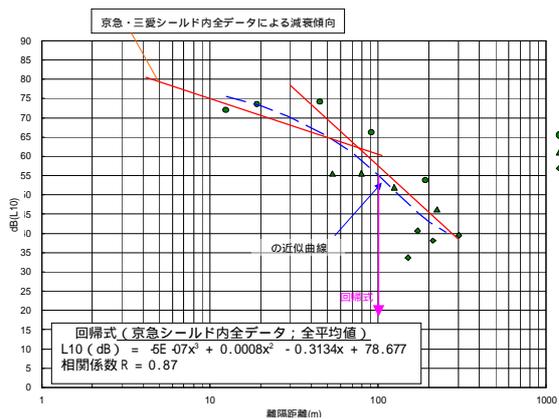
京急シールド及び三愛シールドの規制値を満足するために必要なSCP杭の離隔距離を、図-25の回帰式で算定した結果を表-2に示す。

三愛シールドの離隔距離については、図-25の測定値分布範囲の回帰式により計算した値が8mとなるが、試験施工の最小離隔距離が10mのため、これを下回る算出値は一律10mと考えた設定値としている。

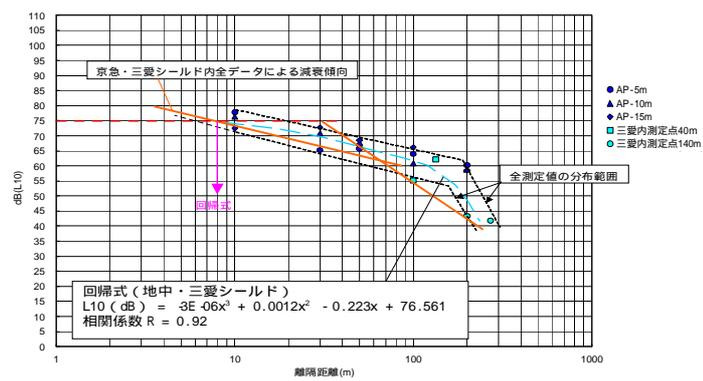
表-2 測定値L10と管理基準値、離隔距離の関係

(京急シールド)	
管理基準値	L10 (80%レンジ上端)
	回帰式
55 dB (昼)	100m
85 dB (夜)	10m未満

(三愛シールド)	
管理基準値	L10 (80%レンジ上端)
	回帰式
75 dB (昼)	10m



(京急シールド)



(三愛シールド)

図 - 25 シールド内の距離減衰特性

4. 本施工での地盤改良振動結果

本件工事は平成 19 年 3 月より本工事を着工したが、SCP工法の施工を開始するにあたり、実施設計時での試験施工による想定した振動による影響範囲の妥当性を確認する目的で本施工での振動計測を実施した。以下に京急シールド、三愛シールドへの振動計測結果を示す。

4.1 京急シールドトンネル内の振動結果

SCP打設位置および京急シールドトンネル内の振動計測位置を図 - 26 に示す。計測は夜間軌電停止時間に行い、計測位置は計 5 箇所にて振動計測を実施した。振動測定結果は図 - 27 に示すとおり、離隔距離 50m 以上で夜間の管理基準値 85 dB 以下かつ 100m 以上で昼間の管理基準値 55dB 以下を満足した。

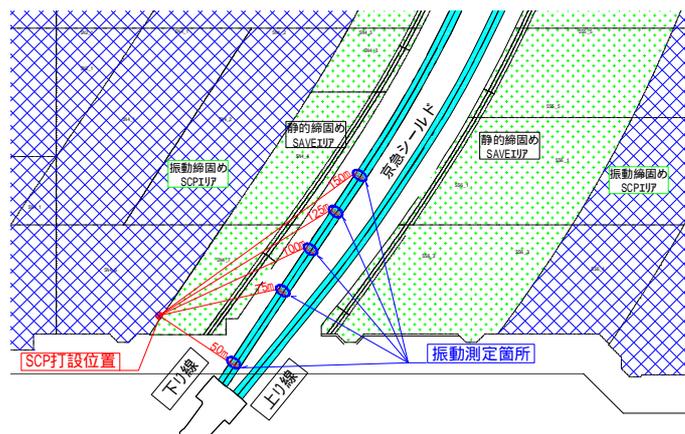
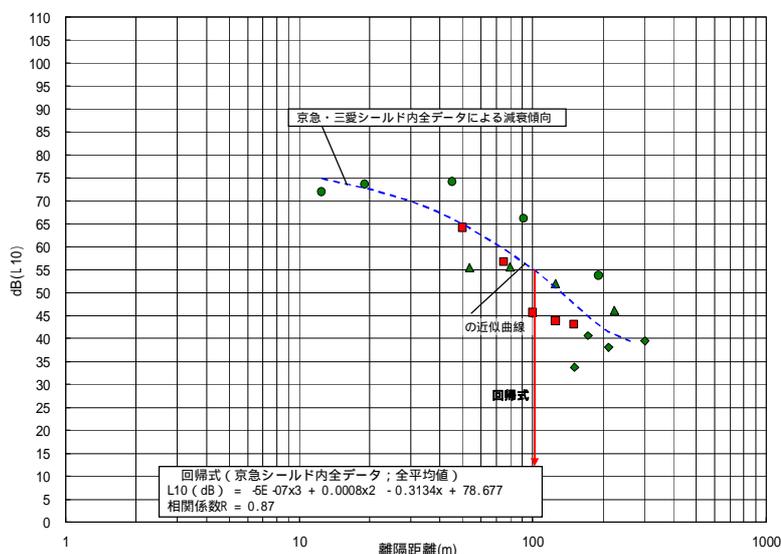


図 - 26 SCP打設位置および振動測定位置



NO.	測定点からの離隔	振動測定値
	(m)	
1	50	64.2
2	75	56.7
3	100	45.7
4	125	43.9
5	150	43.1

図 - 27 京急シールドトンネル内振動測定結果

4-2 三愛シールドトンネル内の振動結果

SCP打設位置および三愛シールドトンネル内の振動計測位置を図-28に示す。計測は昼間施工で行い、SCP杭最近接部に対する振動計測を実施した。振動測定結果は図-28に示すとおり、管理基準値75dB以下は満足したが、計測値のバラツキが大きく、管理基準値に近い73dBも測定されたことから、SCP杭は20m離隔を確保するものとした。

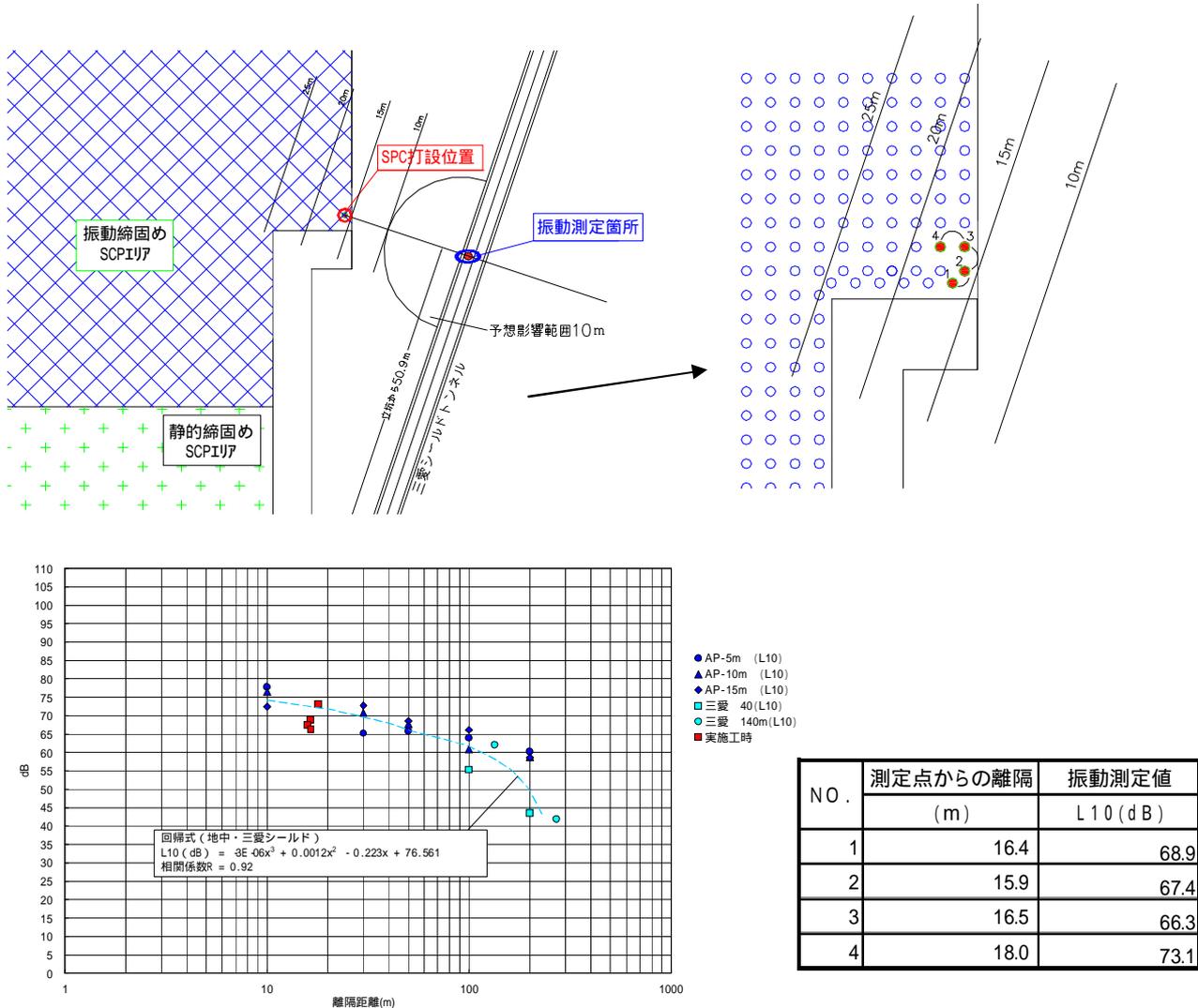


図-28 三愛シールドトンネル内振動測定結果

5. あとがき

実際の対象構造物に対して、SCP工法実機による試験施工を行い、地中内、構造物内での振動レベルの測定、当該地区の振動距離減衰の把握を行った。得られた結果から、SCP工法の適用範囲（離隔距離）を、当初設計時の値よりも既設構造物に対して近づけられることがわかり、合理的な実施設計を行うことができた。

【参考文献】

- 1) 地盤工学・実務シリーズ 18 液状化対策工法 社団法人 地盤工学会
- 2) 鉄鋼スラグの液状化対策 SPC 工法への適用について 第2回地盤工学会関東支部研究発表会 社団法人 地盤工学会 関東支部