

PC 壁体による地盤振動の軽減効果とその評価

Ground Vibration Reduction due to PC-wall Piles and Its Evaluation

早川 清*、可児幸彦**、松原範幸***

Kiyoshi HAYAKAWA, Yukihiro KANI, Noriyuki MATSUBARA

*工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**工博 日本コンクリート工業(株)名古屋営業所長(〒450-0002 名古屋市中村区名駅 4-2-12)

*** 日本コンクリート工業(株)代表取締役社長(〒108 東京都港区港南 1-8-27)

This paper presents the results of the effectiveness of PC wall-piles for controlling ground vibrations. Field measurements were performed for a few cases having different types of PC wall-piles. Then, a method for estimation of vibration reduction by PC wall-piles was developed, being based on wave penetration theory. Vibration level as registered on the off-side of the PC wall-pile barrier was found to be 5 to 7dB lower than that recorded at the site with no such barrier. The theoretical results using the wave penetration theory showed a good agreement comparing with the field tests.

Key Words: Ground Vibration, Isolation Method, PC wall-piles, Site Investigation, Wave Propagation

1. まえがき

建設作業、各種の工場機械および道路・鉄道等の交通機関を発生源とする地盤振動は、地盤内に波動となって拡散される。これらの振動程度が大きい場合には、周辺の住民に心理的・生理的影響を与えたり、建築物・精密機械等へ物理的被害を及ぼす場合もある。このうち、鉄道・道路交通に関して述べれば、特に鉄道・道路の新線建設時には、沿道住民からの苦情の発生率が高く、地盤振動対策の検討が必須の要件になる状況にある。また、阪神・淡路大震災後には、住民が振動に対してより敏感になっていることもあり、阪神地域を走行する新幹線や高速道路を走行する自動車により発生される地盤振動が、大きな環境問題になってきている。

これらの地盤振動を波動の伝播経路で軽減する対策法の一つには、防振材料としてコンクリートや発泡スチロールを充填する地中防振壁やコンクリートブロックを地中に埋設する対策工法の効果¹⁾が検討されてきている。しかしながら、交通機関などから発生する地盤振動の波長を考慮すると、相当深くまで根入れしなければ、その効果は期待されないようである。

筆者等は、鉄道、道路の拡幅工事や、道路擁壁工事に使用されている中空部を有する PC 壁体の振動遮断効果に注目しており、幾つかの現地振動調査^{2)~5)}を実施してきている。また、最近では、この PC 壁体を高架道路から発生する地盤振動対策法として適用した事例^{6,7)}

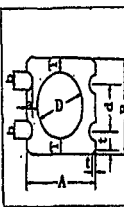
もある。地中壁による防振効果をより高めるためには、発生波動の 1 波長程度の根入れが必要とされているが、PC 壁体は十分な深さまでの施工も可能であり、防振対策工としての今後の展開が期待される。

本研究では、鉄道・道路拡幅工事や道路擁壁工事に施工された PC 壁体において、重錘落下実験および自動車走行による現地実験から PC 壁体の振動遮断特性を示すとともに、その振動軽減効果の評価法について考察した。

2. PC 壁体の標準寸法および施工方法

PC 壁体の標準寸法および施工方法の概要は、以下に示すようなものである。PC 壁体の断面寸法は 600mm × 600mm, 700mm × 700mm の角型で、円形の中空φ400, φ480 を内蔵する形状をしている。長さ方向には、プレストレス 40kgf/cm²、80kgf/cm² のプレキャスト二次製品を柱列状に並べて地中壁を構築することになる。PC 壁体の標準寸法(角型)を表-1 に示した。

表-1 標準寸法

	大きさ A×B (mm)	壁厚 T (mm)	内径 D (mm)	グラウト孔の大きさ a b (mm) (mm)		グラウト孔の 中心間隔; d(mm)	ハンチの 大きさ; t(mm)
	400×400	75	250	30	95	200	25
	500×500	80	340	40	125	250	30
	600×600	100	400	40	125	290	35
	700×700	110	480	40	125	350	35
	800×800	120	560	40	125	400	35

PC壁体の施工方法は、一般に行われている既製コンクリート杭の中掘り工法と同一要領であり、角型柱列を精度よく接合して並べている。

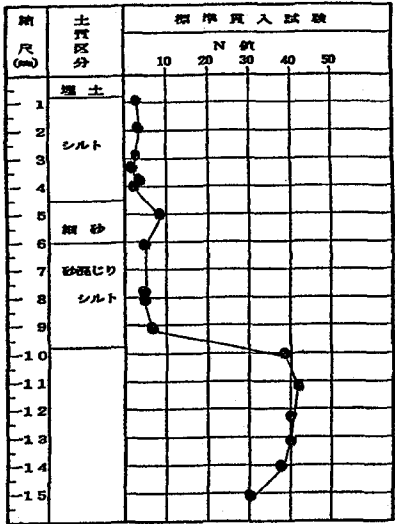
3. 現地振動実験の概要^{8),9)}

3.1 測定場所および土質状況

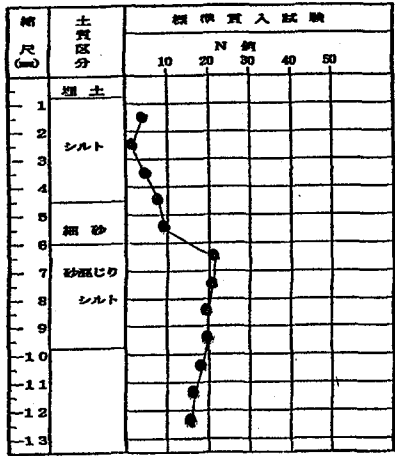
測定場所は、愛知県内の2箇所、調査地1：高浜、調査地2：一宮である。表-2には、使用したPC壁体の形状・寸法、建設用途および振動源を示した。

表-2 PC壁体の形状・寸法、建設用途および振動源

調査地	調査地名	建設用途	PC壁体の形状 寸法・根入れ長	振動源
1	高浜	貯水池	700-18(10C+8B)	重錘落下
2	一宮	道路拡幅	600-15(B)	重錘落下 自動車



調査地1
(高浜)



調査地2
(一宮)

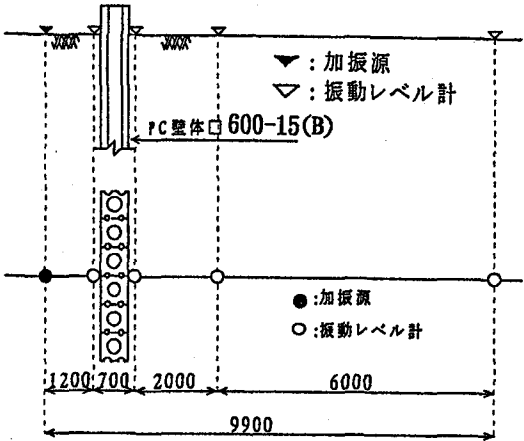
図-1 ボーリング柱状図

各々の調査地のボーリング柱状図を図-1に示した。調査地1(高浜)の土質状況は、深さ5mまでは、N値2

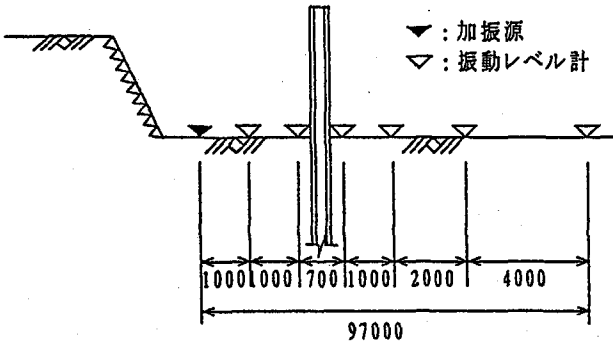
～3のシルト、深さ5～7mはN値5～9の砂、深さ7～10mはN値5～6のシルト、深さ10m以深はN値40以上の支持層である。調査地2(一宮)の土質状況は、深さ1.5m～5mまでがN値2～7のシルトとシルト質細砂、深さ6m～9mはN値10程度の細砂、これ以下は、N値20程度の砂混りシルトと細砂となっている。

3.2 振動測定方法と測定断面

振動測定には振動レベル計を使用し、鉛直成分および水平成分(2方向)の振動加速度出力をデータレコーダに磁器録音する方法とした。表-2に示したように、振動源は、大型トラック等の自動車の走行(壁体より12m離れた高速道路上を走行する一般大型車を対象とした)によるものと、標準貫入試験用のランマー(63.5kgf)を高さ100cmから自由落下させるものとした。



調査地1(高浜)



調査地2(一宮)

図-2 測定断面図

図-2の測定断面に示すように、各調査地ともにPC壁体に直交する測定ラインの数箇所地表面にピックアップを設置し、測定ラインは基本的にPC壁体の中央部に設置した。ただし、調査地2の一宮では、壁体端部からの波動の回折効果を調べるために、壁体端部にも測定ラインを設定した。また、調査地1の高浜では、PC壁体の中空部および接合部の充填の有無による振動軽減効果の相違を調べるために、表-3に示すような5ケースについての実験を行った。

表-3 測定ケース一覧

充填条件	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
接合部のグラウト充填	有	無	有	無	PC壁体
中空部のモルタル充填	有	有	無	無	無

4. 実験結果および考察

図-3には、調査地2（一宮）の壁体完成後に計測した加速度記録の時刻歴波形を示した。卓越振動数は重錘落下時では32 Hz付近にあり、大型トラック走行時では10 Hz付近にある。

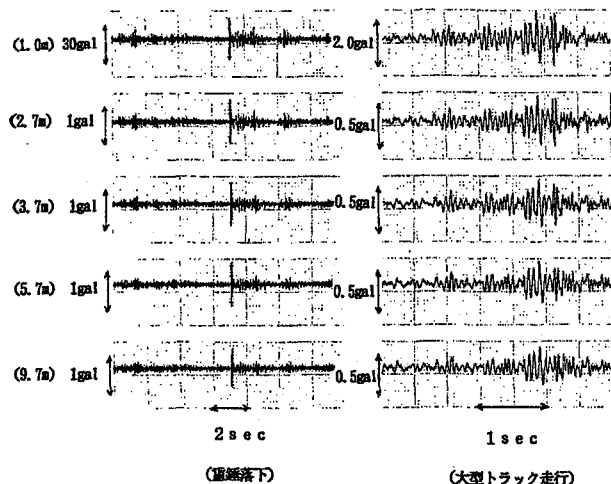


図-3 加速度記録の時刻歴波形（壁体完成後—調査値2，一宮）

4.1 壁体中空部の充填の有無による振動軽減効果の比較

PC壁体の有無、接合部および中空部の充填の有無による振動値を比較するために、図-4は振動加速度レベルの最大値について、5 ケースでの距離減衰を比較したものである。

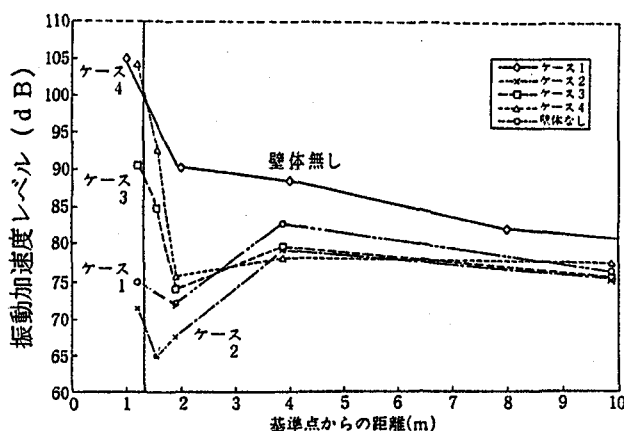


図-4 中空部の充填による距離減衰の比較

この図から理解されることは、PC壁体のあるケースでは、ないケースに比較して壁体背後の2m 地点で14～

18dB, 4～8m 地点では5～10dB 振動が軽減されている。充填の有無による振動遮断効果は、ケース1からケース4の順序で大きくなるようであり、ケース1とケース4との差は距離4m では4dB 程度である。すなわち、全く充填物のないケースが最大の振動遮断効果を示している。

4.2 壁体中央部と端部における振動軽減効果の比較

調査地2の一宮では、壁体中央部と壁体端部に測線を設けて、壁体端部からの回折波による振動軽減効果の減少度を調べる測定を行った。重錘落下実験による結果を示したものが図-5である。この結果によると、壁体背後の距離4m までの振動軽減量は、壁体の中央ラインでは7.5～13dB, 壁体端部のラインでは11～16dB である。後者が前者より大きく生じているのは、波動の回折効果を考えると逆転した現象である。この原因としては、衝撃的振動を与えているので、明確な波動の回折現象が生じなかったものと考えている。今後、連続的な加振源による振動実験を行って、波動の回折効果をより明らかにしていきたい。

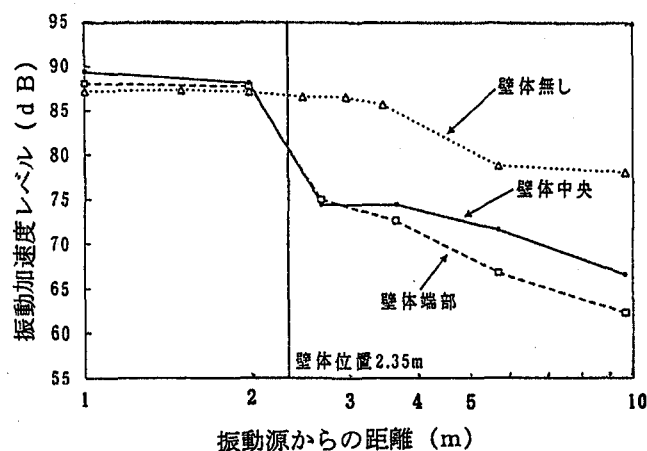


図-5 壁体中央部と端部における距離減衰の比較

4.3 盛土完工後の振動軽減効果

調査地2の一宮では、PC壁体と背面の盛り土拡幅工事後も振動計測を行っている。盛り土法肩から12m

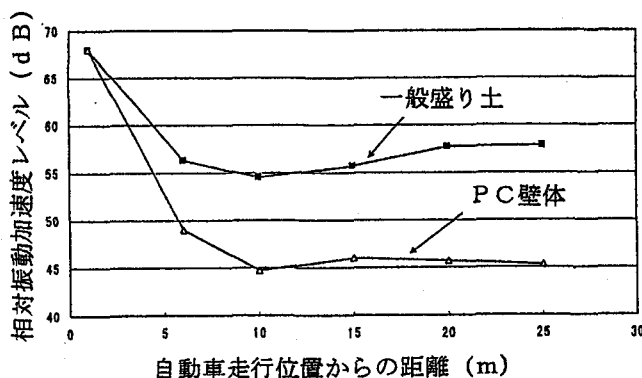


図-6 盛土完工後の距離減衰の比較

の位置にある東海北陸自動車道を大型車類（トラック、ダンプ等）が走行した時に発生する振動加速度レベル値を50個読取り、これらの累積頻度曲線から L_{10} 値（累積頻度の80%レンジの上端に相当する値）を求めた。これより、PC壁体盛り土と一般盛り土における L_{10} 値の距離減衰を比較したものが図-6である。

この場合、両方の測定部の基準点（距離12mの盛り土上の地点）における発生振動量に約10dBの差が生じていたので、これを補正して相対振動加速度レベルで比較した。両者のレベル差は距離6m～15mでは7～10dBであり、距離20m以降は12～12.5dBとさらに大きくなっている。したがって、PC壁体による地盤振動の遮断効果が明確に理解される。

4.4 振動減衰効果のまとめ

図-7は、今回の現地実験で得た結果に既往の調査結果を加えて、PC壁体背後からの距離による振動軽減効果を示したものである。縦軸は、同一距離におけるPC壁体の有無による振動値の差である。

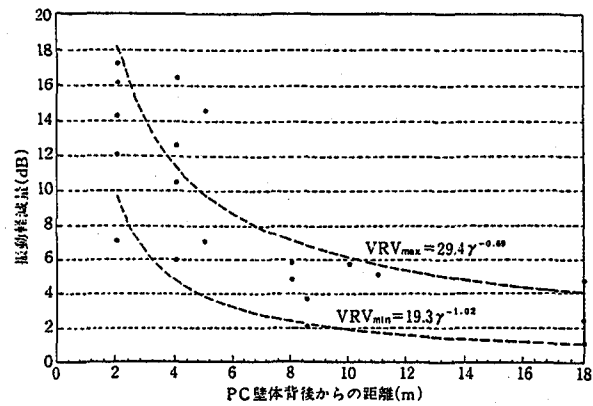


図-7 壁体背後からの距離による振動軽減効果

これらは、現地振動実験結果をまとめたものなので、振動軽減量は、地盤条件、対象振動源およびPC壁体の設置位置や長さなどの影響を受けてかなりばらついている。しかしながら、傾向的な事柄をまとめると以下のようになる。

- ① 壁体背後からの距離による振動軽減量は指数関数的に小さくなる。最大・最小値の傾向は式（1）の実験式で示される。
- ② 振動軽減量の変動は、壁体背後の近傍で大きく10dB程度であるが、距離10m付近では5dB程度になる。

$$\begin{aligned} VRV_{max} &= 29.4 r^{-0.49} \\ VRV_{min} &= 19.3 r^{-1.02} \end{aligned} \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 VRV_{max} ：最大の振動軽減量(dB)
 VRV_{min} ：最小の振動軽減量(dB)
 r ：壁体背後からの距離(m)

5. 振動軽減量の評価

5.1 波動透過理論による振動軽減量の評価^{11)～13)}

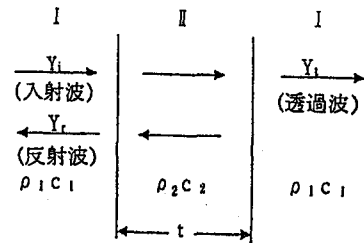


図-8 波動透過モデル

図-8に示すように、地盤内に地中壁のような遮断層を設けた場合、遮断層の左側から右側に透過する波動の振幅比は、以下の波動透過理論式¹⁰⁾によって算定される。

$$R=20\log_{10}\frac{1}{\tau_0} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\tau_0=\frac{4\alpha}{\sqrt{(1+\alpha)^4+(1-\alpha)^4-2(1-\alpha^2)^2\cos(4\pi ft/c_2)}}$$

- ここに、
 R ：振幅比
 τ_0 ：振動伝達率
 $\alpha=\frac{\rho_2c_2}{\rho_1c_1}$ ， ρ_1, ρ_2 ：媒質Ⅰ、Ⅱの密度
 c_1, c_2 ：媒質Ⅰ、ⅡのS波速度(m/sec)
 t ：地中壁の幅(m)
 f ：入力波の振動数(Hz)

ここで、調査地1：高浜での実測結果に関し、PC壁体の中空部と接合部がモルタルとグラウトで充填された場合を地中壁と考え、波動透過理論式により振動軽減量を計算したものが、図-9中の実線($V_s=100\text{m/sec}$)と波線($V_s=300\text{m/sec}$)である。 V_s （横波速度）は特に実測していないので、既往の以下の実験式に深さ10mまでの平均N値を代入して求めた。

$$V_s=92N^{0.239} \quad \dots \dots \dots (3)$$

- ここに、
 V_s ：横波速度(m/sec)
 N ：N値

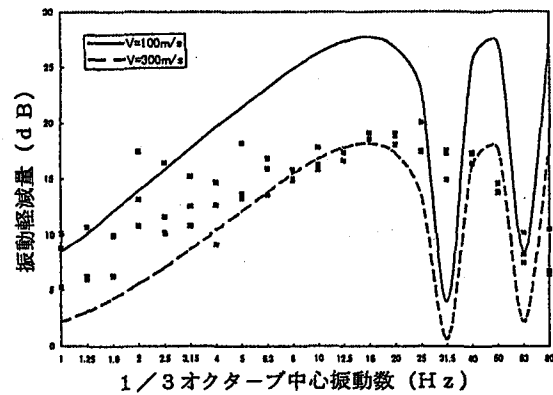


図-9 振動軽減量の比較（中空部充填有り）

一方、FFT アナライザを用いて実測記録の 1/3 オクターブ周波数分析を行った結果から、壁体背後の距離 1.9m における振動軽減量を同図中に■印で示した。

波動透過理論によると、このモデルでは 31.5 Hz および 63 Hz で入射波は全て透過波になる。したがって 31.5Hz の特異点を除くと、1 ~ 80Hz の周波数領域において両者は比較的良好に一致している。同様に、充填無し of PC 壁体の中空部を空溝と仮定し、式 (4) に示す既住の空溝の振動遮断効果の実験式¹⁴⁾を用いて波動透過理論から求めた理論値を補正して計算値とし、実験値と比較したものが図-10である。

$$Ar = e^{-2.35H/\lambda} \quad \dots\dots (4)$$

ここに、

Ar : 振幅軽減比
H : 空溝の深さ (m)
 λ : 波長 (m)

この場合も、1 ~ 80Hz の周波数領域において両者は一致していると思われる。従って、壁体背後の近傍での振動軽減量の評価が、これらの方法によって十分に可能と言えよう。

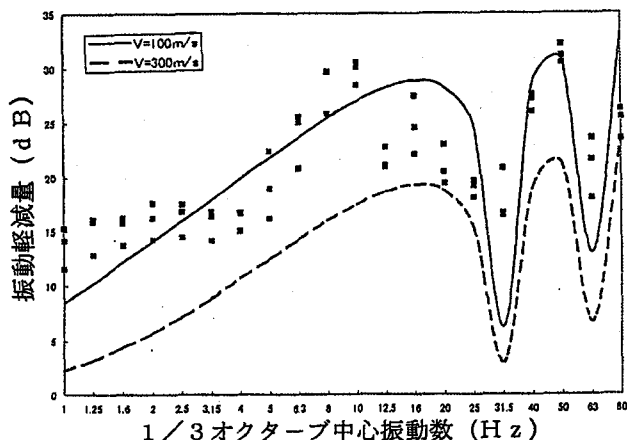


図-10 振動軽減量の比較 (中空部充填無し)

5.2 既住の数値計算値との比較

(1) Haupt による計算値との比較

Haupt^{15, 16)}は、FEM 手法により、コンクリート地中壁のような剛な媒体についての振幅軽減比: Ar とレイリー波の波長で正規化した地中壁の断面積: $S = B \cdot T / \lambda r^2$ (ここに、B : 幅、T : 深さ、 λr : レイリー波の波長) との関係を図示している。この関係図に筆者等の実測結果を●印でプロットしたものが図-11である。

ここで、レイリー波速度は、上述の5.1で求めたS波速度の0.9倍とし、代表的な加振振動数との関係からレイリー波の波長を算出している。また、振幅軽減比 Ar は、振動加速レベルを振動加速度に換算して求めている。

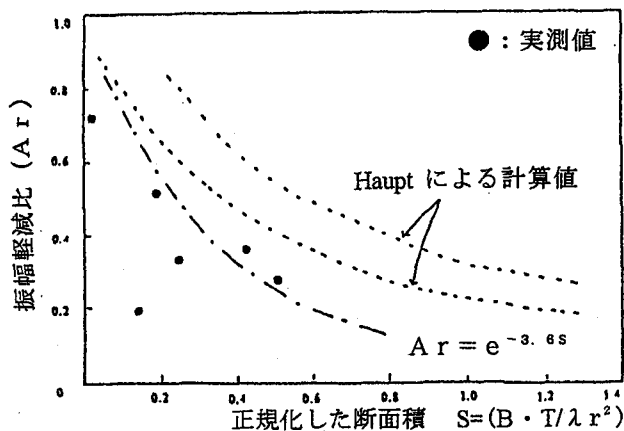


図-11 実測値と Haupt による計算値との比較

少しばらつきがあるが、筆者等の実測結果を近似すると次式のようになる。

$$Ar = e^{-3.6S} \quad \dots\dots (5)$$

この図から理解されるように、中空の PC 壁体による振幅軽減比のプロットは、Haupt による計算カーブの下側にある。このことは、PC 壁体による振幅軽減比が、剛な地中壁より大きくなることに相当する。すなわち、PC 壁体の周辺部は剛体として作用し、中空部がさらに振動軽減効果を高めているものと考えられる。従って、Haupt の下限カーブと実測結果との差が、PC 壁体の中空部による振動軽減効果と推察される。

(2) Ahmad による数値計算値との比較

Ahmad^{17, 18)}は、FEM 手法により、コンクリート地中壁とガスクッション地中壁による Ar 値と、地中壁背後からの距離の関係を図-12のように示している。

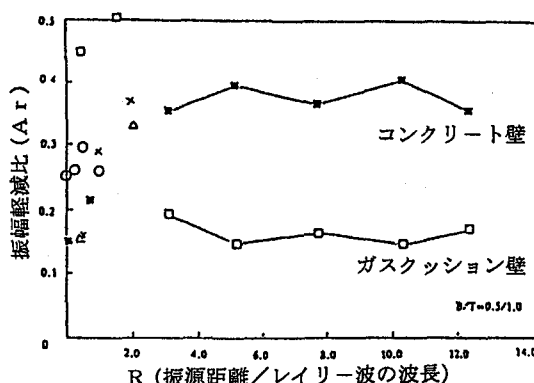


図-12 実測値と Ahmad による計算値との比較

この関係図に今回の結果をプロットしてみると、測定距離が短いために実測値は左側部分に集中している。しかしながら、実測値がコンクリート地中壁とガスクッション地中壁の計算値の中間部に位置することは、十分に理解される。このことは、上述5.2(1)の結果を裏づけするものである。従って、中空部を有する PC 壁体

は、壁体部分の剛性による振動遮断効果と中空部の遮断効果との複合効果を生じているものと考えられる。

6. まとめ

本論文ではPC壁体を用いた新しい地盤振動の遮断法の効果に関して述べた。すなわち、道路拡幅工事や道路擁壁工事用として施工されたPC壁体を対象とし、2箇所において現地振動実験を行った。また、PC壁体の振動軽減量の評価を波動透過理論を用いて検討するとともに、既往の数値計算結果との比較も行った。この一連の検討結果から得られた知見は以下のようである。

1. PC壁体による振動軽減量は、壁体背後の近傍では10～15dB、距離10m付近では5dB程度であり、距離との関係は指数関数式で近似される。

2. PC壁体中空部の充填の有無により、振動軽減量は4～7dB変化する。

3. 振動軽減量の評価は、中空部を充填したPC壁体では波動透過理論により、中空部を有するPC壁体では、前述の理論に空溝の実験式を合成すれば、1～80Hzの周波数領域で十分に可能である。

4. 既応の理論的検討結果と比較した結果、PC壁体による地盤振動の遮断効果は、コンクリートのような剛な地中壁とガスクッションのような中空地中壁との中間領域にある。

5. 以上により、PC壁体による地盤振動の遮断メカニズムとして、壁体部分の剛性と中空部分のクッション効果が複合したものと推察される。

このような地盤振動の伝播問題には、対象振動源の特性、発生波動の種類、地盤条件および振動対策工の形状・寸法・設置条件（施工位置、深さ）等が複雑に影響するものである。本論文では限定された現場条件下での振動測定結果から、PC壁体による地盤振動の軽減効果について検討したので、振動遮断のメカニズムの全容までは解明しえなかった。

今後は、数値計算と模型実験も行って、PC壁体による地盤振動遮断のメカニズムをより明確にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 鳥野 清、戸松 征：地盤振動の低減対策、橋梁交通振動に関するコロキウム論文集；PART A, pp. 143～150, 1995.
- 2) 杉谷和弘・早川 清・可児幸彦：PC壁体の振動遮断特性に関する計測事例、土木学会、第51回年次学術講演会（第IV部門）、pp. 608-609, 1996.
- 3) 可児幸彦・薄葉信一・早川 清・杉谷和弘：PC壁体の振動遮断特性に関する計測事例（その2）、土木学会中部支部（第III部門）、pp. 787～788, 1997.
- 4) 杉谷和弘・早川 清・可児幸彦：PC壁体の振動遮断特性に関する計測事例（その5）、土木学会、第52回年次学術講演会（第III部門）、pp. 312～313, 1997. 9.
- 5) 松原範幸・可児幸彦・早川 清：PC壁体を用いた地盤振動の遮断効果に関する計測事例、基礎工、pp. 120～123, 1997. 8.
- 6) 日経コンストラクション：深谷高架橋下部工事（三重県）300本の中空杭で振動を軽減、pp. 54～59, 1995. 12.
- 7) 平岩直樹：深谷高架橋における振動対策について（PC壁体の施工）、平成8年度建設省中部地方建設局管内事業研究発表会論文集、pp. 125～130, 1996.
- 8) 早川 清・可児幸彦・村松竹司・室住篤子：盛土道路部におけるPC壁体の地盤振動遮断効果に関する実験、土木学会関西支部（第IV部門）、pp. 63-1～2, 1998. 5.
- 9) 早川 清・松原範幸・可児幸彦・室住篤子：PC壁体の背面盛り土の有無による防振特性、第33回地盤工学会研究発表会、pp. 1169～1170, 1998. 7.
- 10) 例えば、山原 浩：環境保全のための防振設計、彰国社、pp. 359～365, 1975.
- 11) 早川 清・杉谷和弘・薄葉信一・可児幸彦：PC壁体による地盤振動の遮断効果の評価について、土木学会、第52回年次学術講演会（第III部門）、pp. 308～309, 1997. 9.
- 12) Hayakawa, K. Kani, Y. Usuba, S. Matsubara, N. and Woods, R.D.: Isolation Effect of PC Wall-Piles on Wave Propagation through the Ground, JSCE 24th Earthquake Engineering Symposium, pp. 677-680, 1997.
- 13) Hayakawa, K. Kani, Y. Matsubara, N. Matsui, T and Woods, R.D.: Ground Vibrations Isolation by PC Wall-Piles, Proceedings, Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, pp. 672-677, 1998. 3.
- 14) 江島 淳：新幹線鉄道の桁式高架橋における地盤振動低減対策のための基礎的研究、鉄道技術研究所報告、No. 1292, pp. 1～292, 1981.
- 15) Haupt W.A.: Isolation of Vibration by Concrete Core Walls, Proc. of 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, Vol. 2, pp. 251-256, 1997.
- 16) Haupt W.A.: Model Test on Screening of Surface Waves, Proc of 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., San Francisco, Vol. 3, pp. 215-222, 1981.
- 17) Ahmad S. and Al-Hussaini, T.M.: Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-filled Trenches, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 67-88, 1991.
- 18) Al-Hussaini T.M. and Ahmad, S.: Design of Wave Barriers for Reduction of Horizontal Ground Vibration, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 616-636, 1991.