

PC壁体の地盤振動遮断効果に関する中規模実験

立命館大学大学院	国際会員	早川 清
大阪大学	国際会員	鍋島康之
立命館大学大学院	学生会員	橋本佳奈
日本コンクリート工業(株)	正会員	可児幸彦
日本コンクリート工業(株)		田中勝也

1. はじめに

鉄道・道路網の輻輳化、超精密機械・施設などの先端技術の高度化、建設現場での大型重機の稼働などが振動源となり、地盤を媒介とする波が生ずる。この波(以下、地盤振動と称す)は、地盤を經由して周辺住民が日常生活を送る住宅建築物内に伝達され、人体や家具類に振動を与えて、屋内にいる人間に振動苦情が生じる。地盤振動と家屋内の振動は1:1に必ずしも対応するものではなく、家屋の構造、老朽度などにより大幅に変化する。振動に関する苦情の形態は様々であるが、大別すると①物的被害②生理影響③心理影響の3点である。

振動防止対策の基本的な考え方は、結果として受振点の振動を小さくすること、振動の存在を感知しないようにすることである。現在までに提案されている対策方法には、振動源-伝搬経路-受振部のそれぞれの過程において工夫されている。例えば、道路交通振動における発生源対策としては、道路での路面改良や車両の速度制限、受振部対策としては建築物の補強、構造様式の変更などが挙げられる。また、伝搬経路対策には、距離減衰によるもの、防振壁・防振溝によるものがある。

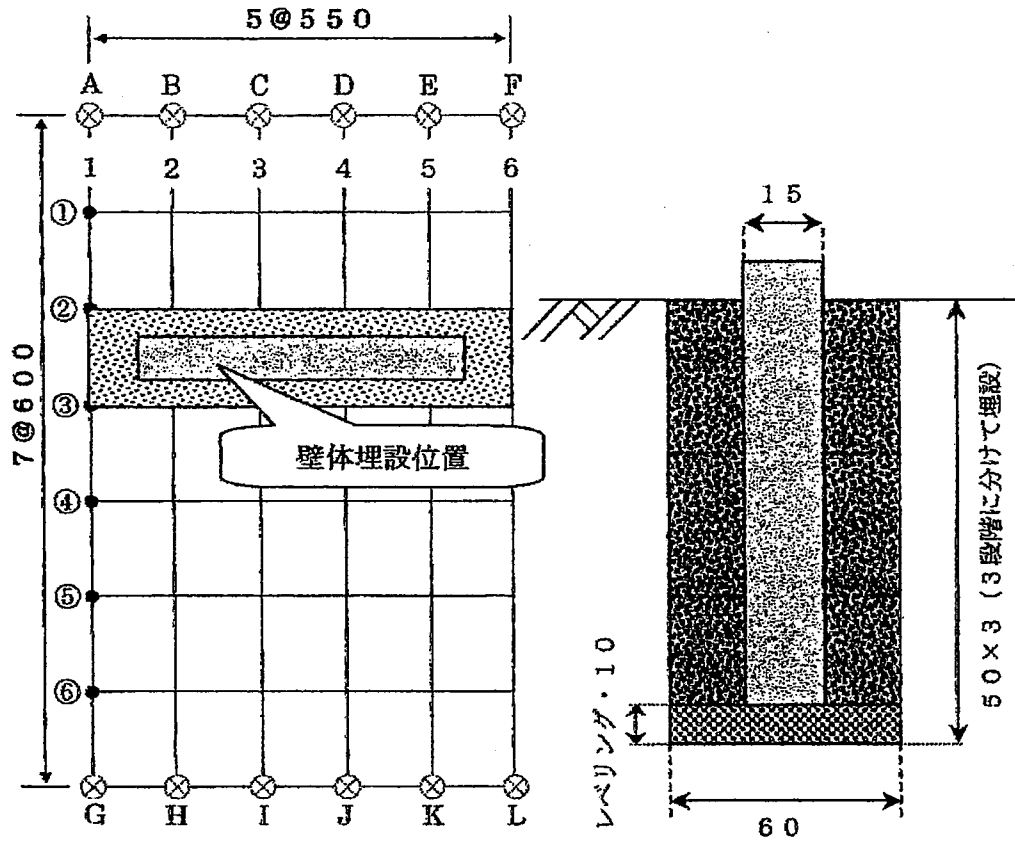
本論文では、伝搬経路における地中壁の利用に着目し、その中でも幾つかの現地調査事例^{1)~2)}により有効性が確認されている、中空部を有するコンクリート製構造部材のPC壁体の利用を考えている。しかしながら、様々な制約により振動遮断のメカニズムが十分解明されたとは言い難い。中空部に地下水などが介入することを想定した、充填物による影響についても検討が必要と思われる。本報告は、現場実験で得られた結果との相関性を検証することを目的として、野外における中規模実験の結果を考察したものである。

2. 実験対象領域および振動測定の概要

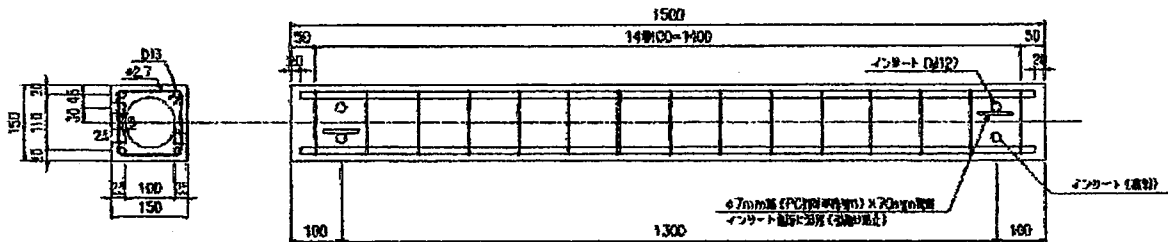
振動測定は、立命館大学BKCキャンパス内のエクセル3(土質実験室)前の敷地にて行っている。対象領域は420(cm)×横幅 275(cm)の測定敷地であり、測点配置、空溝作製位置を図-1に示す。土質状況は、採取資料の含水比が24.0(%)、密度が2.5(g/cm³)、SH波の伝播速度が149(m/s)であった。縦幅60(cm)×横幅(275cm)×深さ150(cm)の空溝を測点No.2と測点No.3の間に作製し、この空溝に正方形(15cm×15cm)×長さ150(cm)・中空部内径10(cm)のコンクリート製PC壁体を12本埋設して振動実験を行った。使用したPC壁体の断面図を図-2に示す。

振動測定には、振動レベル計を6台使用し、重さ5(kgf)の重錘を定位置1(m)の高さから自由落下させ、このとき発生する振動加速度レベル(VAL)の鉛直成分を測定した。測定方法は、測点間隔を縦60cm×横55cmで6測点、6ラインに配置し、壁体の埋設段階を空溝底部から50cm・100cm・150cmの3段階に分け、各段階において振動計測を行った。A~Fで加振した時およびG~Lで加振した時の振動を各測点ごとに測定し、同一ラインの距離減衰を比較する。この一連の作業を、中空状態、壁体中空部に充填物(土・水)を入れた状態で行い、自然地盤、空溝での状態で行ったデータを比較することにより振動軽減効果の検証を行った。

An Experimental Study On GroundVibration Isolation Using a PC - Wall Piiles, Ritsumeikan University, Hayakawa Kiyoshi, Nabeshima Yasuyuki, Hashimoto Kana, Kani Yukihiko, Tanaka Katsuya



図一1 測点配置図および壁体の埋設断面図



注) インサートは、型枠底面と打設面に取り付ける (4個/貫)

図一2 使用PC壁体断面図

3. 実験結果および考察

3. 1 防振壁材に着目した振動加速度レベルの距離変化

PC壁体の振動遮断効果を比較するために、測点1における振動加速度レベル値を同一レベルとし、加振点A～Lのラインで振動加速度レベルの距離変化を比較した。代表例として、加振点Dと加振点Jのグラフを図-3に示す。ここでは、PC壁体の効果を、自然地盤および空溝のものと比較して検討している。自然地盤の状態では振動値の減少が少なく、距離減衰のみが見られる。これは、すべてのラインにおいて言えることである。防振壁と加振点間の距離が近い加振点Dのグラフでは、PC壁体の振動減衰効果より空溝の効果の方が大きい結果となっている。しかし、微妙な差であり、PC壁体を設置した場合でも壁体背後の測点における振動値が20 dB以上減少している。一般に、加振点付近に施工される遮断壁は、P波やS波などの実体波の遮断に有効であることが知られている。従って、衝撃加振実験により発生した振動には効果的に作用したものと考えられる。一方、防振壁と加振点間の距離が遠い加振点Jでは、壁体側面からの反射波の影響による振動値の増加はさほど見られないが、PC壁体による振動値の減少は約4～10 dB程度であった。この原因として、壁体までの距離が長いことから、波動が壁体に入射する以前に低周波成分を多く含む表面波(レイリー波)となり遮断されにくくなったためと推測される。

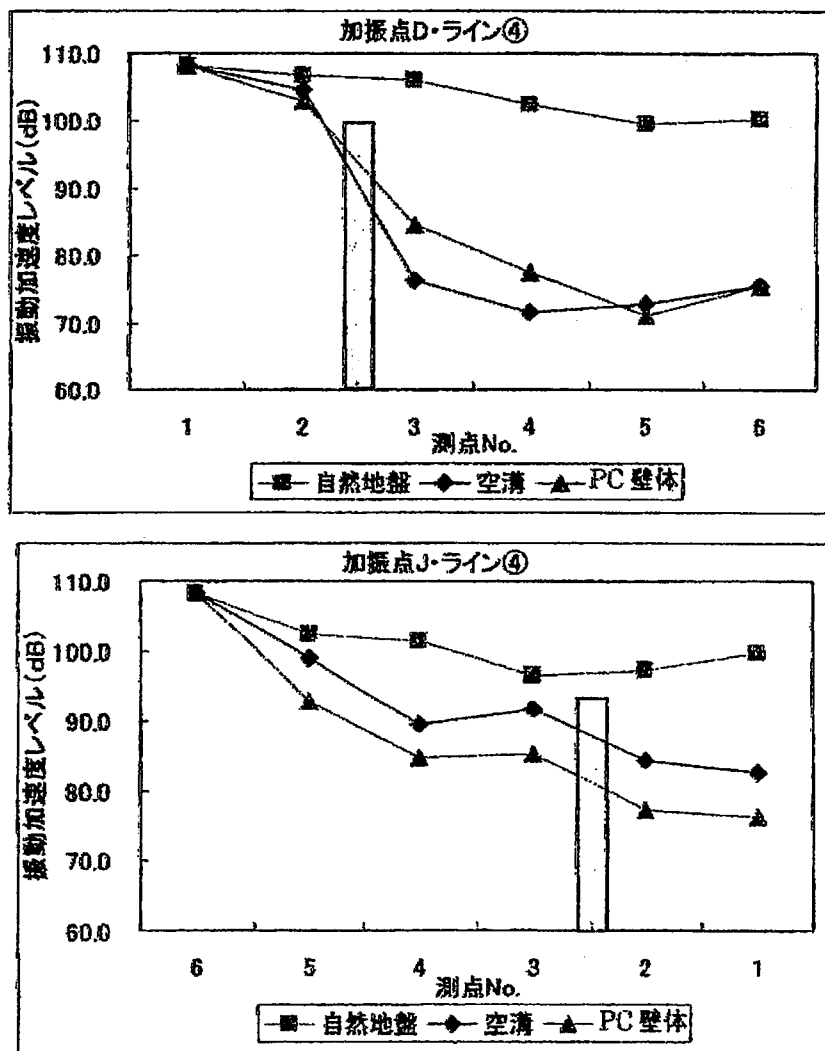


図-3 PC壁体による距離減衰特性

3. 2 各埋設段階における低減量の比較

図-4は、縦軸に振動低減量、横軸に各埋設段階を取り、空溝部分および壁体の埋設深さごとの振動遮断効果を比較したものである。ここでの振動遮断量は、壁体設置前後の振動加速度レベルの差である。50cm、100cm、150cmは空溝底部からの高さで、例えば50cmの場合は、壁体埋設部分が50cm、空溝部分が100cmとなる。150cmは完全に壁体が埋設された状態であり、比較のために空溝の低減量もグラフに示した。この図より、全体的に100cm(壁体埋設部分100cm、空溝部分50cm)の時に、最大の振動低減効果が現れている。測点3で大きく下がった振動値は、その後の測点においても大きな増減も無く最も安定している。空溝の時よりも10dB、150cmの時よりも約15dB多く低減しているのが分かる。この原因として、空溝による振動軽減効果は、空溝の深さと波長の比(H/λ)に関係し、 H/λ が大きいくほど効果が大きくなること、過去の研究成果³⁾より知られている。すなわち、振動数の高いほど波長が短くなるため、地中壁底部からの回折波の影響が少なくなり、振動遮断効果が増加する。今回の実験での振動数および伝搬経路を考慮すると、振動遮断効果を向上させるに適した深さであったのではないかと考えられる。このことは、壁体の空洞内径と波長との関係(D/λ)においても言えることである。あるいは、壁体自体が共振により2次的な振動源になったと考えると、壁体が完全に埋設された状態では壁体から発生された振動がすべて地盤内に伝わるが、100cmでは空溝の部分で減少したことが効果的であったのではないかと考えられる。上述より、壁体の埋設深さと振動低減量には、特定の関係があると推察される。

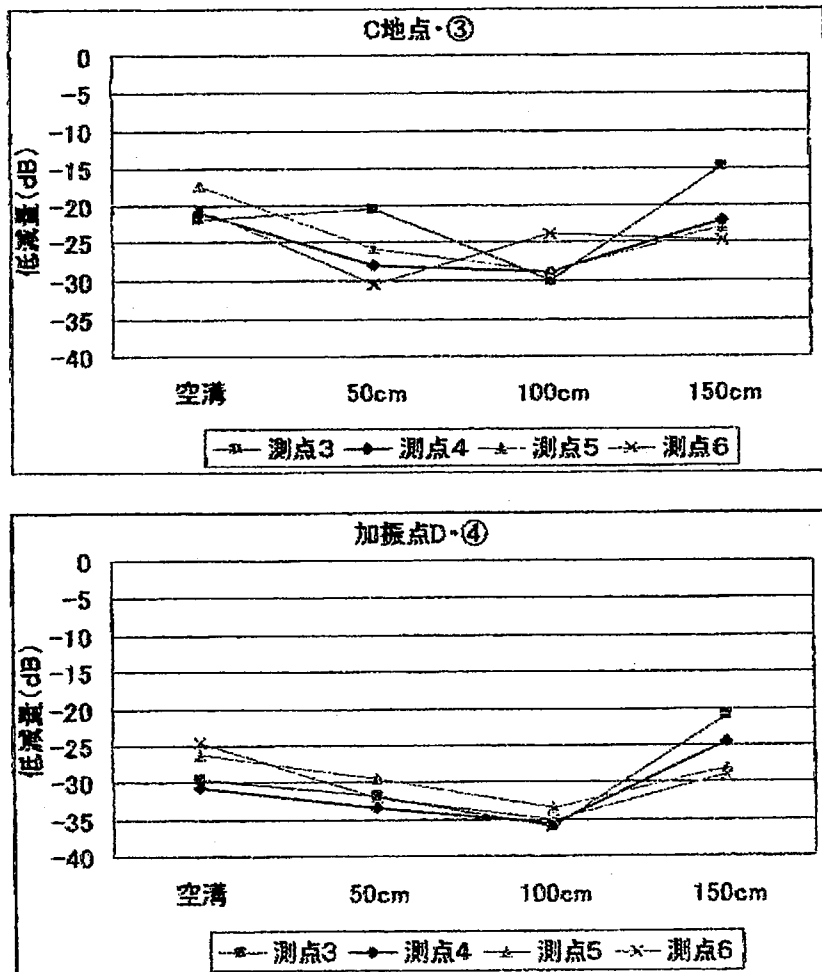


図-4 各埋設段階の振動遮断効果

3. 3 充填物による振動遮断効果の比較

過去の現場における施工実験から、実際にPC壁体を施工した時に空溝部を空に保つことは、地下水や雨水の影響により困難であると報告されている。また、波動透過理論⁴⁾によれば、空溝内に他の材料を充填した場合、波動インピーダンス(密度×波動速度)が空溝よりも大きくなるため、振動遮断効果は小さくなることが知られている。この実験においては、内径10cmの壁体の空洞に、測定敷地内の土(土質特性が同一)および水(氷嚢を使用)を充填させた状態でそれぞれ計測を行っている。

図-5に示す低減量は、壁体設置前後の振動加速度レベルの差である。中心のラインの加振点Cと加振点Dによるグラフを見ると、空溝の次に中空部が空のPC壁体が効果的であることが分かる。充填物の違いによる振動遮断効果は、各測点において回折波の影響により振動値にばらつきがあるため、一概には言えないが、中心ライン(加振点C)においては空溝、PC壁体、土、水という順に低減量が小さくなっており、インピーダンス(縦波の伝搬速度×密度)が大きくなるほど、振動遮断効果の小さくなっていることが分かる。

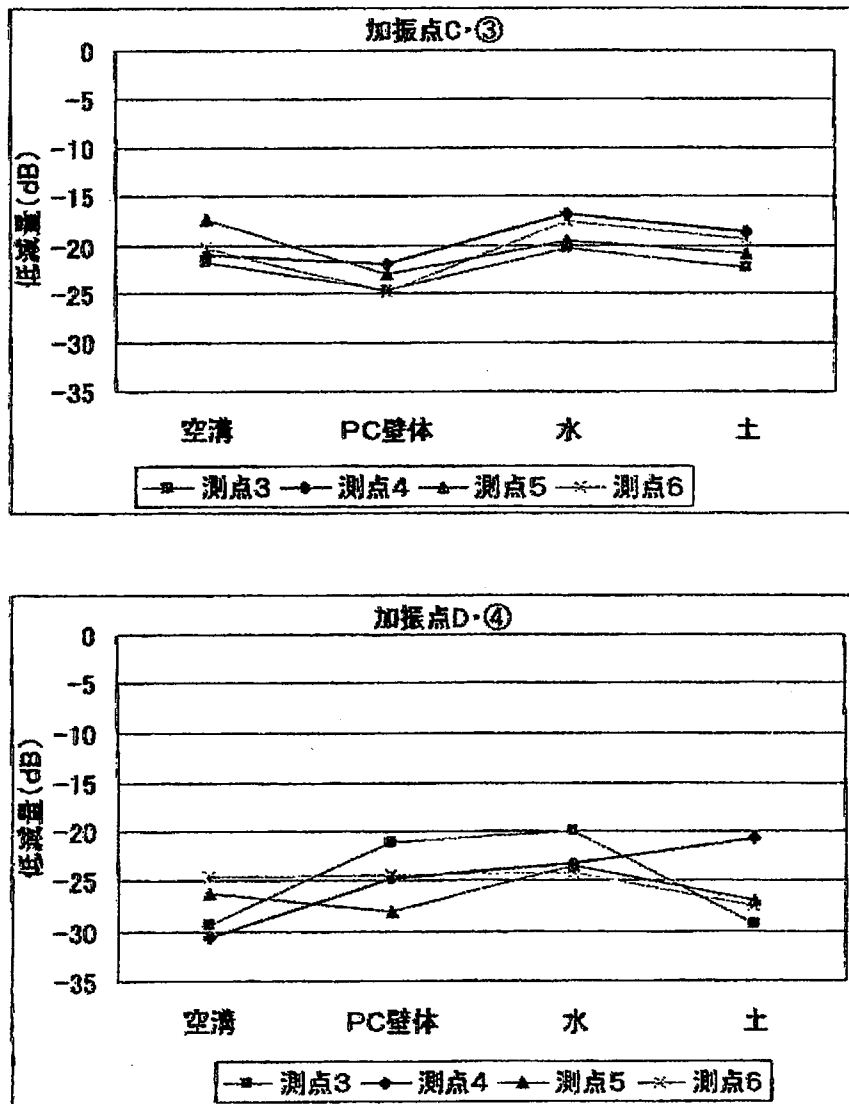


図-5 充填物の違いによる振動遮断効果への影響

4. 振動軽減効果の評価

4. 1 各種の地中壁を用いた既往研究との比較

地中壁体による振動遮断実験に関する代表的な研究事例には、模型実験⁵⁾、実規模実験⁶⁾およびFEMやBEMを用いた数値シミュレーションによる研究⁷⁾などがある。図-6は、実規模実験を対象としてデータを回帰的に整理し、縦軸に振動軽減量(地中壁設置前後の振動レベルの差)、横軸に地中壁からの距離をとり、各材質における振動軽減量をまとめたものである。このグラフに、今回の実験における測定結果をプロットして振動軽減効果を比較する。

既存データの各壁材の施行深さは、発泡壁：1.5～2.0m、鋼矢板：10m以上、コンクリート：5～10mである。この図から、防振壁の近傍においてはPC壁体、コンクリート、鋼矢板、発泡スチロール壁の順に大きな振動低減効果が得られているが、距離が離れるに従って、発泡スチロール壁の効果が大きくなっている。これは、地盤よりも波動インピーダンス(密度×波動の伝搬速度)の大きいコンクリートや鋼矢板は、低振動数の波動を遮断しにくいという特性を持っているからである。今回の実験では測定距離が短いため一概には言えないが、壁体からの距離が2mのところでは既存データのPC壁体の低減量とほぼ同じ辺りに測定値が点在しており、遮断効果は既往の研究結果の傾向とよく一致している。

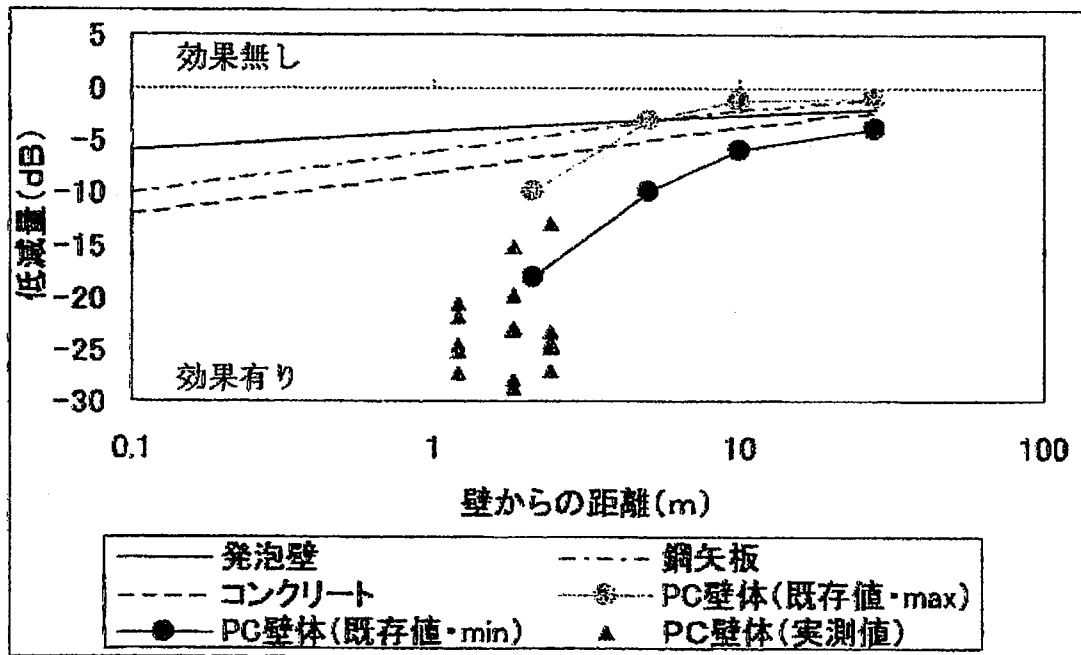


図-6 各材質の低減効果比較

4. 2 PC壁体に関する既往研究との比較

振動遮断工法において中空部を有するPC壁体の振動遮断実験(高浜・一宮)⁸⁾が、幾つか行われている。これらの効果に既往の調査結果を加え、PC壁体の振動遮断効果をまとめると、実験式(1)のように表される。そのグラフに今回の実験値を加え比較したものが図-7である。縦軸の振動軽減量は、同一距離におけるPC壁体の有無による振動値の差であり、横軸はPC壁体背後からの距離である。

$$VRV_{max} = 24.9 r^{-0.49}$$

$$VRV_{min} = 19.3 r^{-1.02} \dots \dots \dots (1)$$

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)である。

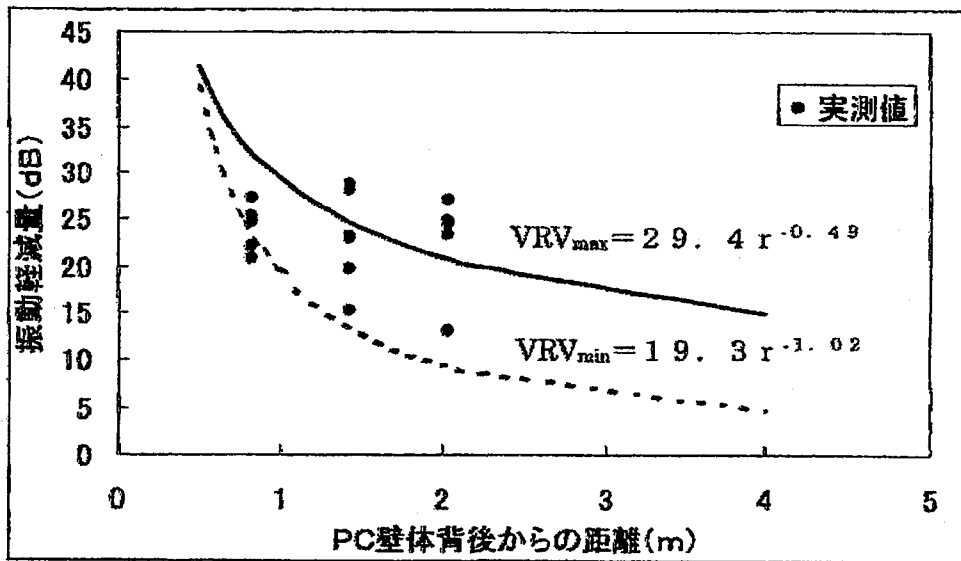
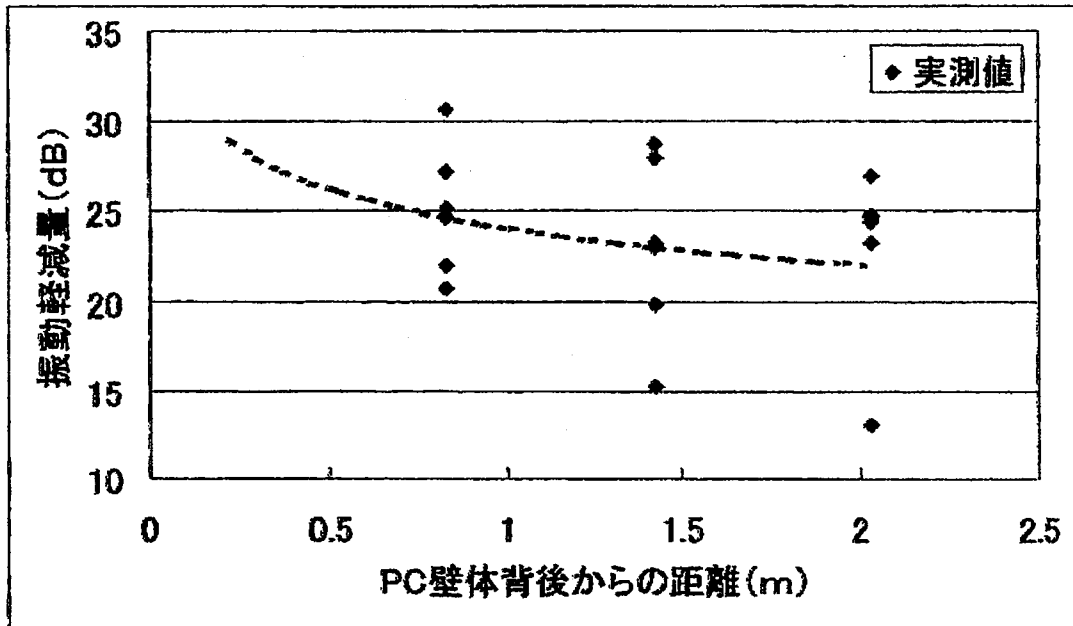


図-7 壁体背後からの距離による振動軽減効果

この実験式によると、振動軽減量は壁体背後からの指数関数的に小さくなる。また、10 dB程度の振動軽減量が期待できる範囲は、壁体の背後2~5mとなる。今回の実験による測定値は、最大の振動軽減量と最小の振動軽減量のほぼ中間付近に点在している。幾つかの現地振動実験をまとめたものと今回の実験には、振動軽減量に関する影響パラメータに相違があるため一概に判断できないが、概ね同じ様な傾向を示すと推察できる。また、本実験の振動源が現地実験と同様な衝撃加振であることや、今回対象とした振動数が現実に問題となる振動数に近いものであったことも、要因の一つであると考えられる。そこで、図-8に今回の実験のみを図-7と同じ方法でグラフ化した。これにより求められた今回の結果を近似すると、次のようになる。

$$VRV = 24.1 r^{-0.13} \dots \dots \dots (2)$$

壁体背後から2mのところでも約20 dBの振動軽減量を得ていることから、遮断効果の有効性が明確に理解できる。



図一八 壁体背後からの距離による振動軽減効果

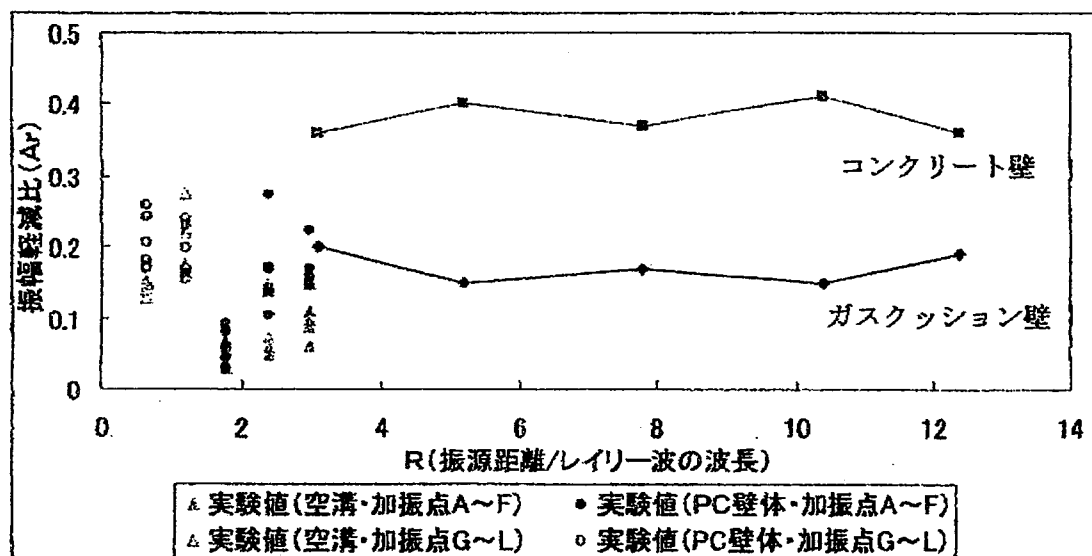
4. 3 コンクリート壁およびガスクッション壁との比較

Ahmad⁹⁾はFEM解析により、コンクリート地中壁のような剛な媒体およびガスクッション壁のような空溝に近い壁体、それぞれについて振幅軽減比：A_r値とレイリー波長で無次元化した地中壁背後からの距離：R=L/λ(ここで、L：地中壁背後からの距離、λ：レイリー波の波長)との関係を図示している。この関係図に著者の実験結果をプロットして比較したものが図一九である。

ここで、レイリー波の波長は、レイリー波速度がS波速度の0.9倍として算出している。また、振幅軽減比A_r値は、次式から振動加速度レベルを振動加速度に換算して求めている。

$$L_a = 20 \log(a/a_0) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、L_a：振動加速度レベル(dB)、a：振動加速度の実効値、a₀：基準の振動加速度(10⁻⁵m/s²)である。



図一 9 実測値と Ahmad による計算値との比較

加振点 A~F の実験値より、加振点 G~L の実測値の方が少し上方に分布しているのが分かる。一般に、地表面で特徴的性質を持つレイリー波は、実体波からかなり遅れて発生する。振動源に近い領域では、実体波が卓越する。反対に遠い場では、振動源から伝えられたエネルギーは、レイリー波によって支配される。また、レイリー波は、実体波よりも振動減衰が小さいとされている。したがって、加振点 A~F は振動源から近い場での遮断(主動的遮断)に該当し、主に実体波の遮断になる。一方、加振点 G~L は振動源から遠い場の遮断(受動的遮断)に該当し、レイリー波の遮断になる。それゆえに、受動的遮断よりも主動的遮断における振動遮断効果の大きいことが、十分に理解される。PC 壁体の実験結果が、ほぼガスクッション壁とコンクリート壁に対応する計算値の中間部およびこれ以下に位置していることから、中空部を有する PC 壁体は、壁体部分の剛性遮断効果と中空部における空溝的な遮断の両方における効果を持ち合わせていると考えられる。なお、実測値が左側部分に集中しているのは今回の実験では測定距離が短いためである。

5. まとめ

本報告では、PC 壁体の振動遮断効果を、野外における中規模実験を通して検討・考察した。結論を述べると、以下ようになる。

- (1) 防振壁と加振点間の距離が近い場合には、P 波や S 波などの実体波の遮断に有効である。また、防振壁と加振点間の距離が遠い加振点 G~L では、波動が壁体に入射する以前に低周波成分を多く含む表面波となり遮断されにくい。
- (2) 全体的に 100 cm (壁体埋設部分 100 cm、空溝部分 50 cm) の時、空溝よりも 10 dB、150 cm の時よりも約 15 dB 多く低減しており、最大の振動低減効果が現れている。このことより、壁体の埋設深さと空溝深さと振動低減量の特定には、特定の関係があると推察される。
- (3) 振動低減量は、空溝、PC 壁体、土、水の順に小さくなっており、充填材のインピーダンスが大きくなるほど、振動遮断効果は小さくなる。
- (4) 本研究と現地振動実験の結果を比較すると、振動遮断効果の傾向が良く対応した。これは、対象とする地盤状況や振動数などの影響パラメータを、相似的に評価することができたからと考えられる。
- (5) PC 壁体の実験結果は、ガスクッション壁とコンクリート壁の計算値のほぼ中間部に位置している。

このことから、中空部を有するPC壁体の振動遮断効果は、壁体部分の剛性による波動の反射効果と中空部の空溝的な振動遮断効果の複合したものと考えられる。

参考文献

- 1) 早川 清・可児幸彦・松原範幸：PC壁体による地盤振動の軽減効果とその評価、構造工学論文集 Vol.45 A, pp.713～718,1999.
- 2) 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.120～123,1997.7.
- 3) 早川 清：地盤振動の伝搬過程における防振対策の背景と動向、日本音響学会誌、55巻6号、1999、pp.449-454、1999.
- 4) 畠山直隆：振動伝搬の遮断、衛生工学ハンドブック、騒音・震動編(朝倉書店、1980)、pp.440-446
- 5) 江島 淳：空溝と地中壁による振動遮断効果、土と基礎28(3)、1980、pp.49-55.
- 6) 吉岡 修・石崎昭義：空溝・地中壁による地盤振動の低減効果に関する研究－東海道新幹線大草高架橋区間－、鉄道技術研究報告、No.1147、1980、pp.1-32.
- 7) 大保直人・片山恒夫：等価質点系モデルを用いた遮断溝の振動軽減効果に関する数値解析、土木学会論文報告集 335、1983、pp.51－57.
- 8) 上掲1)、2)
- 9) S.Asmad and T.M.Al-Hussaini：Simplefideed design for vibration screening by open and in-filled trenches、J.Geotech.Eng.Div.ASCE 117-1,pp.67-88.