特集2・環境に配慮した道路づくり

道路交通振動の対策技術

中 村 一 平・有 馬 伸 広*

1. はじめに

阪神高速道路は、大阪・神戸・京都を中心とする関西都市圏において幹線道路ネットワークを形成する、供用延長221.2km、1日あたりの利用台数92万台を超える有料道路である。その立地条件は、都市高速道路という性格から道路上・河川上が多く、必然的に高架構造が大多数を占めている。

阪神高速道路を管理する阪神高速道路公団では、騒音・振動など沿道環境へ与える影響を軽減させるためさまざまな対策を行っており、本稿では、阪神高速道路での事例を中心に、都市高速道路、特に高架構造を取り巻く道路交通振動の現状とその対策技術について紹介する。

2. 道路交通振動とは

2.1 道路交通振動の定義

道路交通振動は、道路を走行する車両によって、通常騒音、低周波空気振動とともに発生するもので、公害としての振動は、1～80Hzを対象としている。

公害としての振動は、人間活動に伴って人為的に地盤に発生し、建物に物理的な被害を与えたり、日常生活に影響を与える「不快な振動」を示し、典型7公害のひとつに含まれる。「不快な」という形容詞は、物理現象に対する人間の反応（生理的・心理的）を表し、振動の場合は、全身振動感覚に対する感覚的心理量である。振動は構成する振動数成分と各々の強さを表すレベルによって物理的現象が規定

図-1 道路交通振動の伝播経路

されている。

2.2 道路交通振動の伝播経路

音は空気の圧力の変化の伝播であるが、振動も構造物体、例えば土の変位の変化の伝播という物理現象であるといえる。振動の伝播経路は、震動源である道路から地盤振動が発生し、この振動が地表あるいは地中を振動として伝わり、建物基礎を加振する。これにより建物が振動し、そこに居住する人は直接受振するか、その振動により二次的に発生する襖や障子の音、物の動きによって認知する（図-1）。

2.3 道路交通振動に関する法令

現在、健康保護と生活環境の保全の上で維持されることが望ましい基準として、典型7公害のうち、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染および騒音について環境基準が定められているが、振動、悪臭および地盤沈下については、現在の科学的・技術的知見では定量的な測定方法が明確でなかったり、これらが人の健康や生活環境に与える影響が定量的に把握でき

*阪神高速道路公団交通環境室環境技術課
Ippei NAKAMURA, Nobuhiro ARIMA

図-2 官民境界上における振動レベル (平成11年度阪神高速道路沿道測定結果)

ないなどの理由で、環境基準は定められていない。

ただし、振動規制法では、「都道府県知事は、指定地域内における道路交通振動が、所定の限度（道路交通振動の要請限度値）を超えていることにより、道路周辺の生活環境が著しく損なわれていると認めるときは、道路管理者に対し当該道路の部分につき道路交通振動の防止のための舗装、維持または修繕の措置を執るべきことを要請するものとする。（一部略）」と規定されており、実際の上では、これが道路管理者の環境保全目標値となっているところが多い。

3. 都市高速道路における道路交通振動の現状

3.1 振動レベルの傾向

図-2は、阪神高速道路公団が行った測定結果をもとに、振動規制法の対象となる官民境界における鉛直方向振動レベル L_{10} の夜間の平均値を湾岸部・山間部を除いて路線別にまとめたものである。これによると、路線別の鉛直方向振動レベル L_{10} の夜間の平均値は、37～45dB、最も高い箇所でも50dBであり、昼間を含めても各々の要請限度値よりも10dB程度低い。

さらに阪神高速道路沿道では、過去一度も要請限度値を超えた値が測定されたことはなく、官民境界上においては、非常に低い振動レベルでしかないことが伺える。

3.2 道路交通振動に関する苦情

これら、低いレベルであるはずの振動についての苦情は、阪神高速道路公団に寄せられる沿道環境に関する苦情のうち全体の4割程度を占める。特に平成7年1月の兵庫県南部地震直後に急増し、現在も年間100件以上の苦情が寄せられている。

4. 都市高速道路における道路交通振動の対策

4.1 道路交通振動対策の考え方

このように、振動レベルは低いものの多数の苦情が寄せられていることから、阪神高速道路公団だけではなく道路管理者としては、過去から道路交通振動の問題に対して種々の調査・実験等の研究を継続し、その原因究明と効果的な振動軽減対策の開発に取り組んできた。

一般に道路交通振動対策は、発振源、伝播経路、受振側対策の3つに分類されているが、受振側対策については、家屋・建物内での対策であるため、個々の事情や条件に合わせて施工でき、効果的に振動を低減できる反面、現在のところ道路管理者として踏み込むことができない領域である。

高架構造における道路交通振動対策の事例を表1～3に示すが、すべての構造物・地盤・家屋条件に対して、すべての振動数帯域における振動低減効果が得られる振動対策工はないといえる。したがって、振動対策を設定する際には、個々の苦情発生箇所周辺を十分に調査し、適切な振動対策工法を検討する

表1 発振源対策の事例

対策工の種類	対策内容	振動レベルの低減効果	問題点と課題
①交通量制御	・大型車の都市内流入を回避するため物流システム改善	・大型車交通量が半減すれば、官民境界の振動レベルVL (L_{10}) で2～3dBの低減効果がみられる。	・振動レベルVL (L_{10}) 値は低減できるが、ピーク値VL (max) にはほとんど効果がない。
②速度規制	・自動速度監視システムを苦情多発地域に重点配置	・速度が10 km/h 低下すれば官民境界の振動レベルピーク値VL (max) で1 dBの低減効果がみられる (実測値)。	・運転者の協力
③重量違反車の排除	・入路において、軸重違反車を排出路に排除する。 ・自動計測システム等による取締強化	・軸重違反車の徹底排除をすれば、官民境界の振動レベルピーク値VL (max) で3～9 dBの低減効果がみられる。	・一般道への軸重違反車を迂回させる場合、他の道路管理者との協議が必要。
④ジョイントの近傍2 m 程度の段差補修	・自動車走行によって劣化するジョイントや舗装の凹凸による段差を補修・取替等により対処するもの。	・効果は明確に計測されていない。	・現在頻繁に実施されている工法で、路面段差の解消分だけ、振動には効果があるものと考えられる。しかし、舗装やジョイントの劣化は経年的に発生するものであるため、新しい材料の開発が望まれる。
⑤ジョイント前後10 m 程度の緩やかな凹凸の改善	・伸縮装置周辺での急激な摺付けを行わず、周辺10 mでの舗装の凹凸に注意し、縦断が滑らかな変化となるよう補修を行う。	・車両のバネ上震動の実測や、橋脚直下での振動レベルピーク値、あるいは解析による橋脚下端反力などでは、振動低減効果が認められる。	・現在の舗装技術では、緩やかな摺付けが難しい。
⑥主桁連結ノージョイント化	・隣合う単純桁同士の主桁をつないで連続化し、併せて支承をゴム支承を取り替え、同時に橋面舗装を打ちかえる。	・11径間連続化の中央径間の官民境界では振動レベルVL (L_{10}) で2 dB、ピーク値VL (max) で7 dBの低減効果 (実測値)。 ・6径間連続化の中央の官民境界では、振動レベルVL (L_{10}) で1～2 dB、ピーク値VL (max) で3～4 dBの低減効果 (実測値)。 ・10 Hz以上の衝撃的な振動については効果が少ない。	・振動が明らかに衝撃的な振動である場合には、対策工として有効と考えられる。 ・連結化端部には伸縮装置が残り、さらに大きな伸縮装置となる可能性があり、その橋脚付近の振動は減少しないため、連結下端部の配置は沿道環境に配慮すべきである。 ・構造的に適用できる箇所が限られている。 ・防振対策の面からは、単に主桁を連結しただけでは効果がなく、橋面舗装を連結して打ち換えた後に効果を発揮する。
⑦その他のノージョイント化	・埋設型伸縮装置を用いた簡易連続舗装 ・床版連結工法によるノージョイント化		

⑧防振連結板	・主桁のたわみを減少させることを目的とし、単径間の鋼桁同士を連結する。 ・当初の防振連結板は、耐震連結板を緊結する形式から出発し、単純鉋桁の主桁の腹板部分をΩ型曲面連結板でつなぐ形式まで、改良を加えながら実施された。現在は⑥主桁連結ノーゾジョイント化に取って代わられた工法である。	・鋼Ⅰ型単純合成成桁に対する対策工実施前後の計測結果によればスパン中央で1～2dB、地盤で1～2dB程度の減少がみられるものや、同じような測点で顕著な変化がみられないもの、あるいは橋脚直下で少し(3dB)減少傾向がみられるが、官民境界では変化がみられないものなどがある。	・事例によっては橋脚直下で少し減少傾向がみられるものの、官民境界での変化はみられておらず、今後、振動対策としての発展性は低い。 ・連結板取付部材の疲労破壊によって効果を発揮できていないものがあること、現在は対策工法として採用されていない等、工法自体にも問題がある。
⑨端横桁補強	・箱桁の主桁間隔が非常に広い場合に、端横桁の弾性沈下による伸縮装置の段差軽減、床版端部剛性強化による振動低減を目的としたもの。 ・端横桁への支承設置、端横桁の補強などがある。	・主桁間隔の長い箱桁(横桁支間=11.4m)で官民境界で地盤振動のL_{10}の平均が1.7dB低下した事例がある。	・構造的に適用できる箇所が限られている。
⑩床版補強	・床版の剛性強化により振動低減を目的としたもので、RC床版の下面に鋼板を接着する等の工法がとられている。	・既往の事例調査においては、地盤(上下・水平)および橋体において増加または変化なしとなっている。	・単独では防振対策工として期待できない。
⑪支承交換	・ゴムの衝撃吸収性能を利用して振動の軽減を目的としたもので、鋼製支承をゴム支承に取替えた例がある。		
⑫主桁への動吸振器(TMD)	・ねじり振動の低減を目的とし、弾性ばねと粘性減衰機構を備えた付加質量を橋梁に設置し、その連成振動によって主桁の振動系の振動減衰を図る。	TMDの固有周期(主桁の固有周期)だけの低減であり、オールバスの振動レベルでは期待できない。	・起振器によるきれいなピークを有する振動を対象とした検討結果であり、さらに、TMDの制振影響範囲は対象とする周波数の$\pm 0.005 \sim 0.10$Hzに限られている。 ・したがって、複数のピークを有する道路交通振動に対する効果は期待できない。
⑬その他の上部構造対策	・鉋桁の箱桁化 ・桁端ダンパーの設置	・オールバスの振動レベルでは期待できない。	
⑭下部構造対策	・柱の補強、梁の補強 ・橋脚への吸振器設置	・オールバスの振動レベルでは期待できない。	・橋脚の変化モードや固有振動数が若干変わる可能性はあるが、一般に橋脚の変化は地盤振動に大きなウエイトを占めていないため、振動低減効果は少ないといえる。
⑮基礎構造対策	・増し杭 ・フーチング増厚	・モデルの解析結果では振動低減効果がない。	

表2 伝播経路対策の事例

対策工の種類	対策内容	振動レベルの低減効果	問題点と課題
①EPSを用いた地中防振壁	・振動発生源となる橋脚・基礎周辺の地盤に発泡スチロールを設置し、地盤振動を反射する。 ・その他ウレタン材と鋼矢板を組み合わせた地中防振壁も提案されている。	・高架道路で低い振動数が卓越する地盤では、オールバスの効果が少ない。 ・平面道路に対する既往の事例によれば、幅80cm、深さ35mの発泡スチロール壁を設定した場合、壁の後方30～35mの位置で2～12dBの効果があるとしている。 ・深さ8m、厚さ1mのEPS地中防振壁実験結果では、10Hz以上の振動数帯域のみに橋軸直角方向と鉛直方向で5dB程度の低減効果が認められた。	・10Hz以上の高い振動数が卓越している場合には、振動対策工として期待できる。 ・防振壁を設ける場合には、設置地点の地盤条件や卓越振動数あるいは基礎構造を考慮したうえで、最も適当な構造、位置、深さを採用するのがよい。
②空溝	・振動発生源となる橋脚・基礎周辺の地盤に空溝を施工し、地盤振動を反射する。	・高架道路で低い振動数が卓越する地盤では、オールバスの効果が少ない。 ・①の施工段階（3段切梁工鋼矢板締め切り）の状態では、EPSとほぼ同様の効果が認められた。	・空溝を設ける場合は溝の維持、安全性への留意が必要となる。 ・その他の留意点はEPS地中壁と同じ。
③地盤改良材による地中防振壁	・ソイルコラム工法による地中防振壁で、地盤振動を遮断する。	・同上 ・①の隣接箇所における実測では、EPS・空溝とほぼ同様の効果が認められた。	
④地盤改良	・橋脚周辺の地盤を締め固め、振動を伝わりにくくさせる。 ・地表付近を厚さ50cm程度貧配合コンクリートで置き換える。	・既往の事例の中で直径0.4m、深さ12mのケミコバイルを10～2m×30m打てば効果大としているが、定量的に把握できない。	・解析では高振動数成分に効果があるとされているが、実証されていない。 ・計測事例は少ない。
⑤PC中空壁体	・壁体ないしは既設コンクリートパイルを地中に壁状に打設し、振動伝播を抑制しようとするもの。 あるいは地盤改良材を遮断層として期待するもの。	・既設コンクリートパイルを壁状に打設した既往の事例によれば、打設位置より26m後方の位置で施工前に6～8galあった振動が1galに軽減されたとしている。	・①と同様にその地域の地盤条件にあった施工法の検討が必要。
⑥水平板の埋設	・地盤内に水平な波動遮断層を設けるもの（WIB工法）。	・実験や解析では期待されているが、鉄道脇に2m×2m×10cm×2枚を埋設した実験では効果がなかった。	・特定の高い周波数（鉄道など）には効果があるようだが開発途上である。
⑦環境施設帯の設置	・高速道路の沿道を買上げ植樹したり、オープンスペースとするものである。	・施設帯として確保した幅分だけ効果が見込める。 ・施設帯の地盤を伝わる振動が高周波ほど、また粘土より砂地盤の方が、振動の距離減衰が大きくなるため効果が高い。	・街造りという都市計画との整合性、沿道地域住民の合意を考慮する必要がある。

ことが望ましく、場合によっては、複数の対策工を組み合わせることも考える必要がある。

4.2 道路交通振動対策の具体例

4.2.1 発振源対策

発振源対策としては、交通制御によるほか、構造物対策として路面の平滑化上部構造対策、下部構造対策があり、最も一般的な対策方法といえる。特に主桁を連結するノージョイント化工法は阪神高速道路で顕著な効果を上げている。

4.2.2 伝播経路対策

道路交通振動の伝播経路は、地盤であり、対策としては、距離減衰を目的とする環境施設帯、もしくは、伝播経路において振動低減を目的とした地盤対策がある。いずれの工法も、伝播経路（道路外）で大規模に行われる対策であり、一般に用地確保の点から実施することは困難なことが多い。

4.2.3 受振側対策

発振源対策が第一に優先され、第二に伝播経路対

表3 受振側対策の事例

対策工の種類	対策内容	振動レベルの低減効果	問題点と課題
①家屋防振補強	・地盤～基礎・床組に至るまでの伝播経路で振動を増幅させる弱点をなくし、地盤に対する家屋の振動増幅を抑制するものである。 ・水平方向の振動に対しては、筋交いなどの耐震壁の増強・増設による家屋骨組の剛性増加や、内壁材・外壁材の取付方法の改善による水平剛性や減衰性能の向上がある。	・鉄道沿線の木造家屋や鉄骨造家屋に対し実施した鉛直方向振動対策事例によれば、VL(max)で3～10dB(鉛直振動)の低減効果が認められている。 ・水平方向の振動に対しては、3階床での解析だけであるが、VL(max)に対して、水平剛性を10%向上すれば1～2dB、水平剛性を2倍にすれば、最大10dBの低減効果がある。 ・鉛直方向の振動低減は、床組の固有振動数(10Hz以上)で低減効果がある。 ・水平方向は、家屋の固有振動数(3～6Hz程度)と地盤の固有振動数が一致している場合に低減効果が大い。	・鉄道沿線の例は、基準値(新幹線鉄道騒音・振動障害防止対策処理要綱)70dB以下を守るための対策事例である。 ・道路に関しては、制度化されていない。
②家屋への制振装置の設置	・建物に動吸振器等の制振装置を付加し、建物の共振による水平方向の振動増幅を抑制するもの。	・出路付近の高架下実建物(2階建)に適用した事例によると、建物の地盤に対する加速度振幅比率はTMD設置前後で半減している。 ・シミュレーションでは、家屋の減衰定数が小さい場合にVL(max)で2～7dBの振動低減効果がある。 ・水平方向の家屋の固有振動数(3～6Hz程度)で地盤と共振している場合にのみ振動低減効果がある。	・建物に明瞭な共振現象がみられる場合、対策工として期待できるものと思われる。
③沿道整備	・沿道法を活用したり、地域計画の見直しにより家屋を移転するもの。	・緩衝建築物や揺れに強い建築物に変わることで、大きな効果が望める。 ・RC建物の場合には、平均すると家屋による振動増幅は少ない。	・対策として期待できる。 ・ただし、法律の整備や地方自治体・国・地域住民の合意など困難な問題を克服しなければならない。

策が検討されるべきであるが、すでにその道路構造物が供用中であるためなどのさまざまな制約や、その対策がもたらす全体への費用対効果等の経済性を検討すると、受振側対策が現実的である場合がある。

受振側対策としては、家屋に対する防振工法、建て替え土地の買い取り、防振建物の誘導があるものの、道路管理者が積極的に行える対策ではない。

5. おわりに

振動問題は、発生している場所(高架構造、地盤性状、家屋構造など)などによって、千差万別である。すなわち、振動の発生源は複数の走行車両であり、ひとつの家屋に対しても複数の橋脚を介して時

間的なずれを伴って立体的に地盤を伝播し、その家屋構造もまちまちである。

このため振動対策を選定するにあたっては、可能な限りその低減効果予測を行い、できれば実測値に基づくシミュレーションを行うことが望まれる。

また、振動対策の実施計画策定にあたっては、

- ① 道路敷内で施工できること
- ② 振動低減効果の永続性があること
- ③ 振動低減効果が大いこと
- ④ 施工費が低廉であること
- ⑤ 施工が容易であること
- ⑥ 場合によっては、複数の対策の組み合わせを考えること

などを留意する必要がある。