

土工部に設置された曲線を有する角型情報板支柱の振動特性の検討 Investigation of vibration characteristics of square pillar information board installed in earthwork part

16N3100018F 瀬戸 大輔 (設計工学研究室)
Daisuke SETO/Desingn Lab.

Key Words : information board, measurement, damping factor, soil spring, Tuned Liquid Damper

1. 序論

道路情報板は、利用者に道路情報を伝える重要な高速道路付属物である。情報板には、張出し構造の支柱を持つ物があり、中日本高速道路管内でも6,000本余りが設置されている。これらの支柱は、交通振動、風荷重等が要因となる疲労問題を考慮し、数々の形式が採用されている。その中から道路会社の日常点検で指摘されている揺れやすい支柱で曲線形状を有する角型溶接構造支柱（以下、逆L型柱）に着目し、筆者らは現地計測と固有値解析を行ってきた¹⁾²⁾。この結果から計測値に比べ、解析値の固有振動数が高い傾向を掴んでいる。

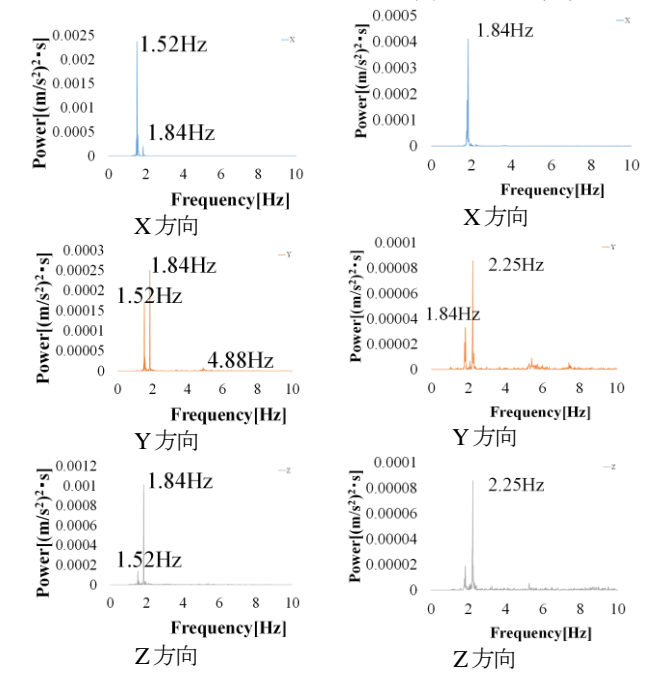
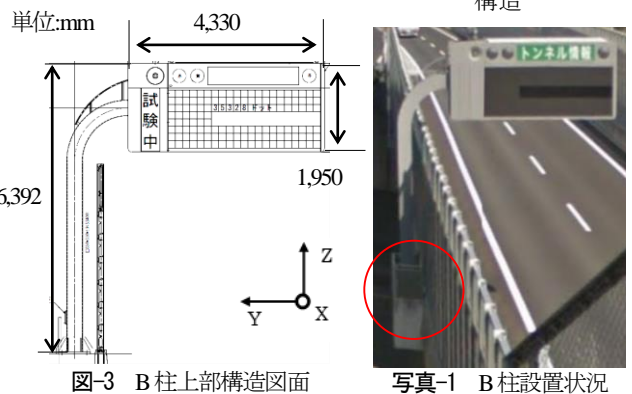
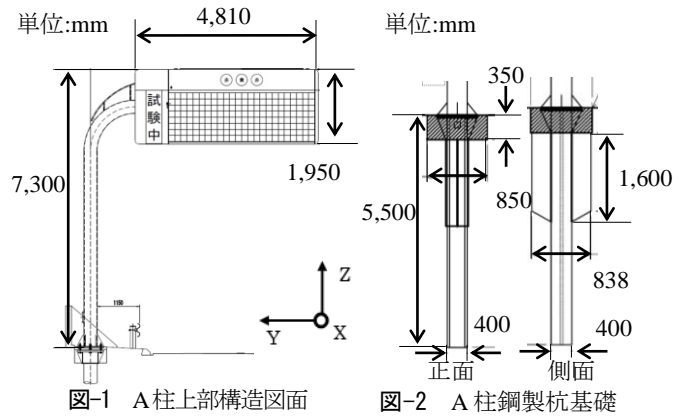
ところで、高速道路付属物のような非衝撃動の振動対策として、同調質量ダンパー(TMD,Tuned Mass Damper)³⁾、同調液体ダンパー(TLD,Tuned Liquid Damper)⁴⁾、転動型質量ダンパー(TRMD,Tuned Rolling-Mass Damper)⁵⁾などの設置があり、それぞれ成果が示されている。特にTLDは液体の揺動による制振であり、小さな加速度に対しても効果があることが知られている⁶⁾ので、道路付属物の常時振動にも効果的であると言える。

以上を踏まえ、本研究では、現地計測データを元に逆L型柱の固有振動数や減衰定数を算出する。次に有限要素法による構造解析で、地盤ばねを適用し、固有値の比較を行う。これらにより土工部設置逆L型柱の動的な問題を明らかにする。また、逆L型柱の情報板内にTLDを設置し、計測を行った結果、制振効果を確認できたのでこれを報告する。

2. 対象情報板支柱

図-1は、本報で検討する逆L型の情報板(以下、A柱)である。支柱の構造は、高さ7,300mm、断面350mm×350mm、板厚9mm、角型溶接構造である。情報板は、高さ1,950mm、幅4,810mm、奥行き1,000mm、質量は1,524kgである。また、基礎は土工部に設置されており、パイロハンマ工法による打込み杭が採用されている。図-2に示す通り、幅400mm、板厚12.7mmのH型鋼で根入れ深さは5,500mmである。杭上部1,600mmには進行方向に幅838mmの抵抗杭が付いている。また、根巻コンクリートは高さ350mm、幅850mmであり、地中に全体が埋まっている。また、A柱付近のN値は深さ4m程度までN<10であり、比較的軟弱な地盤に単柱杭が打たれている。

また、土工部における振動特性と比較を行う為、図-3に示す逆L型柱(以下、B柱)の計測を行う。このB柱は写真-1に示すように、コンクリート橋支柱部に取付けられている。支柱高さは6,392mm、情報板は、高さ1,950mm、幅4,330mm、奥行き1,000mm、質量は1,469kgである。



3. 固有振動数の検討

3.1 現地計測

(1) 計測概要

動的挙動を把握するために、加速度計により応答加速度を計測する。設置箇所は、情報板内部の先端部分及び支柱頂部付近とし、座標軸は車両進行方向X、横断方向Y、鉛直方向Zとする。ここでのサンプリング周波数は100Hz、1回の計測時間を100秒とし、車両通行による外力（以下、一般交通）のみの条件下で計測を行う。

(2) 計測結果

一般交通時の応答加速度を高速フーリエ変換することでパワースペクトルを算出し、卓越振動数を算出する。ここで1Hz～10Hzの範囲でバンドパスフィルターをかけ、窓関数はハンニングを使用する。

図-4にA柱の加速度パワースペクトルグラフを示す。1.52Hzは、X方向が卓越する面外1次モード、1.84HzはY方向、Z方向が卓越する面内1次モード、Y方向の4.8Hz付近の小ピークは、面内2次モードであると考えられる。

図-5にB柱の加速度パワースペクトルを示す。1.84Hzが面外1次モード、2.25Hzが面内1次モードであると言える。A柱よりも高い卓越振動数がみられるが、これはB柱の高さがA柱と比べて1m程度低いためである。

3.2 構造解析

汎用構造解析ソフトADINAを用いて固有値解析を行う。境界条件は、土工部での性質の把握のため、

- ①ベースプレートを全方向固定(A柱, B柱)
- ②ベースプレート下面に地盤ばね設置(A柱のみ)

の2パターンとし、他に拘束点は設けない。また、支柱と情報板の接合は、接触面全体を接合部として簡略化を施している。

(1) 基部完全固定での解析

図-6に基部完全固定でA柱をモデル化した固有値解析結果である各モードの挙動を示す。面外1次モードは1.60Hzで、X方向に対して支柱を軸にねじる挙動、面内1次モードは2.08Hz、面内2次モードは情報板と支柱の位相が逆転する。B柱もモード形状はほぼ同様である。

表-1にA柱及びB柱の固有値解析結果と計測結果をあわせて示す。A柱の固有値解析結果は、計測結果と比べて小さい値となっており、特に面内1次、2次モードでは（計測値／解析値）の値が88.5%、84.3%と大きく乖離する結果となっている。一方でB柱はA柱と比べて計測値と解析値と乖離が小さい。

(2) 地盤ばねを適用した解析

前述のように現地計測で求めた卓越振動数と固有値解析結果の差異が見られるが、この原因が基部完全固定としている境界条件にあるという仮説の下、ベースプレート面に地盤ばねを均等割り付けすることで地盤状況を再現する。地盤ばねは図-7のように設定する。またその値を表-2に示す。この値は道路橋示方書⁷⁾より、杭の軸方向ばね定数 K_v [kN/m]を式(1)で定義している。

$$K_v = a \frac{A_p E_p}{L} \quad (1)$$

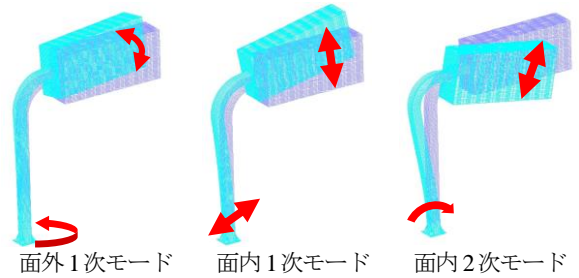


図-6 固有値解析結果

表-1 固有振動数一覧

モード	A柱固有振動数[Hz]		B柱固有振動数[Hz]	
	計測値	解析値	計測値	解析値
面外1次	1.52	1.60	1.84	1.86
面内1次	1.84	2.08	2.25	2.48
面内2次	4.88	5.80	未確認	7.11

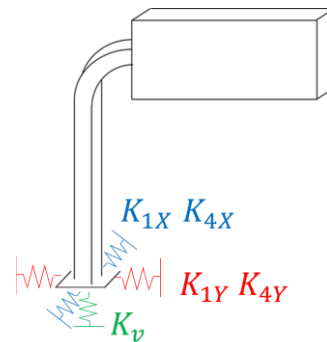


図-7 地盤ばね設定

表-2 ばね定数一覧

K_v [kN/m]	162,388
K_{1X} [kN/m]	43,078
K_{4X} [kN・m/rad]	55,723
K_{1Y} [kN/m]	51,811
K_{4Y} [kN・m/rad]	120,981

表-3 固有振動数の比較

モード	解析値 (地盤ばね設定前)[Hz]	計測値[Hz]
面外1次	1.50 (1.60)	1.52
面内1次	1.83 (2.08)	1.84
面内2次	5.08 (5.80)	4.88

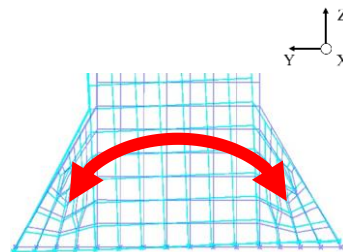


図-8 基部付近の挙動



写真-2 土間コンクリートのクラック

a : 工法による係数, A_p : 杭の純断面積[mm²],
 E_p : 杭のヤング係数[kN/mm²], L : 杭長[m]
 また, 杭軸直角方向について, ばね定数 K_{li} [kN/m]を式(2),
 回転ばね定数 K_{4i} [kN・m/rad]を式(3)で定義する.

$$K_{li} = 4EI\beta^3 \quad (i=X,Y) \quad (2)$$

$$K_{4i} = 2EI\beta \quad (i=X,Y) \quad (3)$$

EI : 杭の曲げ剛性[kN・m²], β : 杭の特性値[m⁻¹]
 なお, 周辺地盤の N 値は設計計算書より $N=15$ とする.
 表-3に解析値と計測値の比較を示す. 地盤ばねを適用することで実際の現象を精度良く再現できた. また, 図-8に面内1次モードの基部付近の挙動を示す. X方向を軸にベースプレートが回転挙動しており, 基部の拘束度を低下させたことにより地盤との相互作用が再現されたと考えられる. なお, 写真-2は, 基部の土間コンクリートを撮影したもので, クラックが発生している. さらに人力加振時にY方向に1~2mm程度開閉していることから, 上部構造の挙動による影響が考えられる.

4. 制振装置の検討・評価

比較的大きな加速度の発生が確認されているA柱に同調液体ダンパー(TLD)を設置し計測を行う. 制振のターゲットは加速度が最も大きい1次モード(1.5Hz程度)とする. 計測ケースは一般交通と人力加振の2ケースとし, 平常時の加速度レベルと減衰定数を求める. これらに関して, 制振装置設置前と設置後の比較を行い, 制振効果とその特性を確認する.

(1) 制振装置の概要

図-9に示すように, 情報板先端部にアクリル製矩形水槽を2機設置する. この水槽に170mmの深さまで水を入れる. 図-10に水槽の模式図を示す. 水槽の大きさは内寸340mm×340mm×340mm, 板厚5mmで, 深さ170mmまで水を入れる. また, 写真-3に示す様に, 浮体式の波動抑制装置を水槽内に入れる.

(2) 制振原理

TLDの原理は図-11に示す2自由度系モデルに置き換えられる. 制振原理は, 情報板の振動によって生じた液体の運動エネルギーが減衰係数 c_2 によって消費され, 結果的に系全体の減衰が付加されるというものである. ここで重要なのは, 以下の2点である.

①液体の運動エネルギーを大きくする

②液体の減衰を早くする

①のため, 液体と構造物の固有振動数を近づけ, 液面揺動(スロッシング現象)を起こす必要がある. 矩形水槽内の水の固有振動数は式(4)に示すHousnerの式⁹⁾によって推定する.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot g}{L} \cdot \tanh\left\{\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot H}{L}\right\}} \quad (4)$$

f はスロッシング固有振動数, n はスロッシング次数, L は水槽の幅, H は水位をそれぞれ表す. ここでは, 経験的⁹⁾にターゲットの1.52Hzよりも低い $f=1.45$ Hzとして, 式(4)から水位を計算する. 1.45Hz. また, ②のため, スロッシング減衰効果に実績がある浮体式波動抑制装置⁹⁾を使用する.

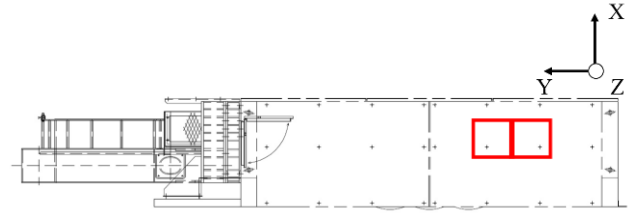


図-9 TLD設置位置

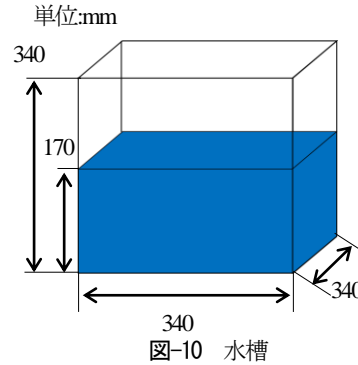


図-10 水槽

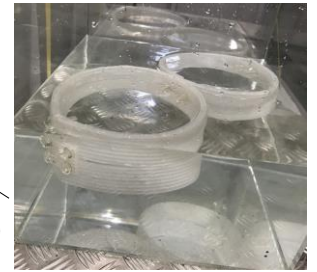


写真-3 波動抑制装置

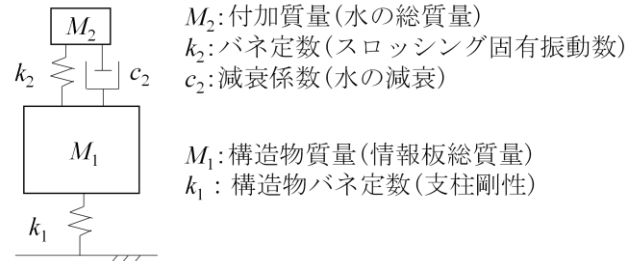


図-11 2自由度系制振モデル

表-4 減衰定数平均値比較

方向	非制振時[%]	制振時[%]	制振/非制振
X方向	0.93	3.23	3.47
Y方向	0.93	1.13	1.22
Z方向	0.93	0.80	0.86

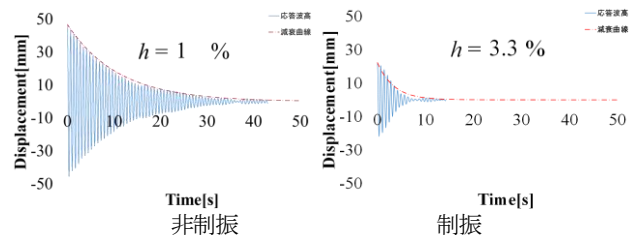


図-12 X方向減衰曲線(非制振・制振)

(3) 計測結果と制振効果の評価

以下の2種類の計測を 非制振状態(TLD未設置), 制振状態(TLD設置済)それぞれに対して行う.

①X, Y, Z各々の方向に人力で加振(以下, 人力加振)

②一般交通

①の加速度に対しては, 式(5)を用い, 人力加振時時刻歴変位波形の極大値を結ぶ包絡線に近似する減衰定数 h を, 最小二乗法により算出する¹⁰⁾.

$$y = A \times e^{-\omega h t} \quad (5)$$

ここで, y は減衰曲線, A は初期変位, ω は角振動数, t は時間をそれぞれ表す.

表-4に減衰定数平均値(非制振:3ケース, 制振:3ケース)を示す。X方向の減衰定数は非制振時は1%程度であったのに対し, 制振時は3%を越えており, 明確な減衰効果が付与されていることが分かる。一方でY方向, Z方向は大きな変化が見られない。

表-5に一般交通時の最大加速度平均値(非制振:3ケース, 制振:8ケース)を示す。全方向においてTLD設置による加速度の低減が見られるが, 減衰効果が確認できたX方向は56%まで低減されており, 顕著に加速度低減効果が見られる。図-13にX方向における一般交通時加速度時刻歴グラフの代表を示す。非制振時は3秒付近で最大加速度が発生した後, 十分減衰せず22秒付近で次のピークが発生している。一方で, 制振時はピークが発生した後速やかに減衰しているため, 非制振時に見られる振動柱の再加振という現象は発生していない。

以上のことから, TLDによって, 逆L型柱に発生するX方向, すなわち面外モードの常時の振動レベルが6割程度に低減され, 減衰定数が3倍以上増加することが分かる。一方でY方向すなわち面内モードには明確な効果が見られないことも確認された。この理由として, 1点目に発生加速度自体が小さいこと, 2点目にX方向の振動数(1.52Hz)にTLDをチューニングしたためY方向の振動数(1.84Hz)と同調しにくかったことが考えられる。この対策として, 面内1次モード振動数(1.84Hz)をターゲットとしたTLDを併設することで, それぞれの方向に対してチューニングが可能である。

5. 結論

本研究では曲線形状を有する角型溶接構造支柱情報板を対象に現地計測と構造解析を行い, これまで重視されてこなかった土工部上での振動特性を確認した。さらに制振対策として実機に同調液体ダンパーを設置し, その効果を確認した。その結果をまとめると以下の様になる。

- ①逆L型柱の減衰定数は全方向において1%以下であり, 比較的減衰しにくい構造物である事が確認された。
- ②固有値解析において地盤ばねの適用により計測値に近い固有振動数になることから, 支柱の挙動が地盤と相互的に影響していることが確認された。
- ③TLD設置によって減衰定数が, 非制振時約1%から制振時約3%と3倍に増加しており, 逆L型柱面外モードへの減衰付与が確認された。
- ④常時振動の加速度結果から, X方向最大値比較で非制振時29.3Galから, 制振時16.5Galと6割程度に低減されており, TLDは面外モード常時振動の加速度レベルも抑えられることが確認された。

今後検討すべきことは, 荷重車を一定速度で走らせるなどして定量的な評価をすることであるといえる。本研究では, 供用中の高速道路上の実機を対象として計測を行ったため, 入力振動が一定ではなく, 定量的な評価が不足していると考えられる。また, 応力集中が懸念される基部リブ付近や支柱R部で発生応力レベルを計測し, 疲労予測をすることが課題となる。

なお, 高速道路会社の情報板支柱振動対策として,

表-5 一般交通時最大加速度平均値の比較

方向	非制振時[Gal]	制振時[Gal]	制振/非制振
X方向	29.3	16.5	0.56
Y方向	9.44	8.37	0.89
Z方向	15.7	13.3	0.85

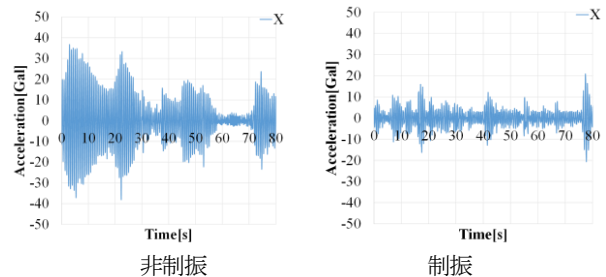


図-13 一般交通時情報板先端加速度時刻歴(非制振・制振)

軽量情報板への付け替えやT字型支柱への変更などが想定されている。軽量情報板への付け替えは, 支柱への負荷の減少が考えられる。また, T字型支柱への変更は, 現状の逆L型柱やF型柱が持つ, 水平方向への片持ち梁的な性質を解消することが期待される。

参考文献

- 1) 瀬戸他：土工部に設置された鋼製杭基礎を有する角型支柱情報板の振動特性に関して, 土木学会第71回年次学術講演会, I-087, 2016
- 2) 瀬戸他：LED情報板が設置された角型支柱の振動減衰特性の検討, 土木学会関東支部第44回技術研究発表, I05, 2017
- 3) 安藤他：高架道路上のF型標識柱に対する制振装置の振動抑制効果について, 土木学会第59回年次学術講演会, I-412, 2004
- 4) 野路他：水のスロッシングを利用した制振装置の研究(その1)装置の流体力特性と制振効果の特性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第411号, 1990
- 5) 井田他：多方向転動型同調質量ダンパーを用いた都市高架橋上ITV柱の制振対策と耐久性確認現地試験, 応用力学論文集 Vol.10, pp1071-1080, 2007
- 6) 藤野陽三：構造物の制振対策(土木分野), 日本風工学会誌, 44号, 1990
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp406-410, 2012
- 8) G.W.Housner：Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol.47, 1957
- 9) 小野他：貯水槽の耐震化向上のための8の字型浮体式制振装置の開発, 地震工学論文集, Vol.37, 2018掲載予定
- 10) 田村他：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, 1993