

歩道縁石による車椅子の衝撃緩和および評価に関する研究

*The research on relaxation of impact wheelchair-user suffered caused by the curb and on evaluation of impact**

田中 正和** 大枝 良直*** 須賀 正志**** 角 知憲*****

Masakazu TANAKA** Yoshinao OOEDA*** Masashi SUGA**** Tomonori SUMI*****

1. はじめに

本研究では、車椅子利用者が不快要因として挙げる段差、特に横断歩道と歩道の境界をなす縁石の段差による衝撃について取り上げる。

構造規格では、縁石の高さは路面から2cmが標準とされている。これは、弱視者が横断歩道と歩道の境界を白杖で認識するために2cmの段差が必要であるとされているためである。一方、車椅子で縁石を上る際、小型の車椅子前輪は2cmの段差をスムーズに乗り越えることが出来ず、大きな衝撃が車椅子利用者に加わる。従って、横断歩道を車椅子が快適に通過するためには、縁石の段差の解消が必要である。

本研究では白杖によって段差を検知する際の荷重は微小であることに注目し、縁石の段差部分をゴムなどの弾性材料を用いた中空部材に置き換える事により、弱視者が段差を認識するために必要な段差2cmを保ちつつ、車椅子が車道と歩道の境界をなす縁石に乗り上げ時、乗り降り時に生じる衝撃を緩和してスムーズな走行を実現することが目的である。

2. 人・車椅子モデルと計算方法

縁石が、前輪、後輪に衝突する事から車椅子に生じる振動加速度スペクトルを求める。

* キーワード 交通弱者対策

** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科 修士課程
(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL:092-642-3275)

*** 正会員 九州大学大学院講師

**** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科 修士課程

***** 正会員 九州大学大学院教授

まず、前輪について考える。車椅子が速度 v で縁石を上る場合、前輪は縁石と前輪が衝突した点を中心に半径 r の回転運動をする。この時、縁石と前輪の衝突面に v_f が生じ、その鉛直成分を v_y 、水平成分を v_x とすると、

$$V_f = r \frac{V}{R}$$

$$V_x = V_f \cos \theta$$

$$V_y = V_f \sin \theta$$

となる(図-1)。

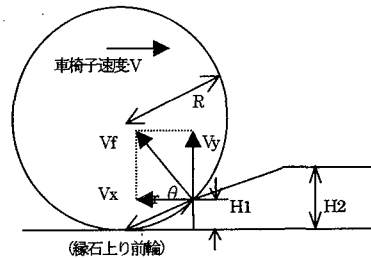


図-1 縁石衝突時の速度発生

例としてここでは、縁石を上る場合の上下方向振動について考える。前輪踏面の速度を $v_T(t)$ 、前輪が縁石の角に衝突する速度を $v_Y(t)$ 、前輪のバネ反力による応答を $v_\omega(t)$ とすると、

$$v_T(t) = v_Y(t) - v_\omega(t) \dots\dots\dots ①$$

次に、人体と車椅子を一体としたものを7つの部分に区切って考えた車椅子振動モデル(図-2)を作成する。縁石と車輪の衝突は2点接触であるため、2点接触の場合のモデルを用いる。モデルは上下・前後方向に適用した。また諸元は表-1である。

モデルの運動方程式は次の式②で表される。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = [F(t)] \dots\dots ②$$

ここで $\{F(t)\}$ は、車輪が縁石と衝突した時に受ける力である。

②式を周波数領域に変換すると、

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \dots\dots\dots ③$$

$$[H(\omega)] = -\omega^2[M] + i\omega[C] + [K]$$

となる。

ここに、

[M]: 質量行列 [C]: 減衰行列

[K]: 剛性行列 [X]: 変位行列

[H(ω)]: 周波数応答関数

[]: 7×7行列 { }: 7×1行列 とする。

③式から振動加速度スペクトルを求めると、

$$\{\alpha(\omega)\} = -\omega^2[H(\omega)]\{F(\omega)\} \dots\dots\dots ④$$

となる。

ここで、 $H(\omega)_{mn}$ は $H(\omega)$ の m 行 n 列の成分、 $F_n(\omega)$ は、 $\{F(\omega)\}$ の n 列目の成分とし、①式をフーリエ変換すると、

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v_{(\omega)} e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\omega_0} v_0 e^{i\omega t} d\omega - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega H_{(\omega)11} F_{1(\omega)} e^{i\omega t} d\omega$$

より次式が求まる。

$$F_1(\omega) = \frac{1}{-\omega^2} \left(\frac{1}{K_1} + H(\omega)_{11} \right)^{-1} v_0 e^{i\omega t}$$

後輪の前輪に対する時間遅れ、半径比を考慮して後輪も同様に考える。 R_1 は前輪の半径、 R_2 は後輪の半径とすると、

$$F_2(\omega) = \frac{1}{-\omega^2} \left(\frac{1}{K_2} + H(\omega)_{22} \right)^{-1} \frac{R_1}{R_2} e^{i\omega t_1} v_0$$

以上より

$$\{F(\omega)\} = \{F_1(\omega), F_2(\omega), 0, \dots, 0\}^T$$

となる。

これを④式に代入することにより、振動加速度スペクトルを求める。

3. 車椅子の衝撃の測定について

車椅子の衝撃の計測は図-3 の縁石及び従来の縁石について行った。被験者は、男子学生7人であった。図-4 の通り、シート下に圧電式加速度計を取り付け車椅子が縁石に衝突するときの衝撃を測定した。衝撃は上下方向・前後方向共に測定した。

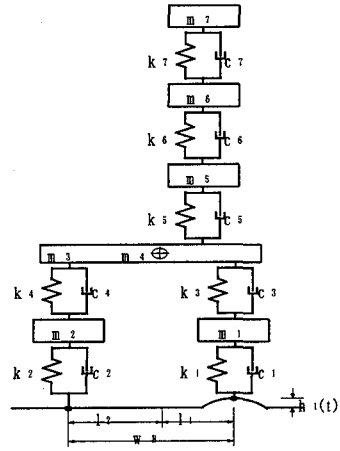


図-2 車椅子振動モデル

表-1 モデルの精元

| 記号 | 単位 | 意味 |
|-------|-------------------|--------------------------|
| m_1 | kg | 前軸ばね下質量 |
| m_2 | kg | 後軸ばね下質量 |
| m_3 | kg | ばね上質量 |
| m_4 | Kg・m ² | ピッチングモーメント |
| m_5 | kg | シートと腰の質量 |
| m_6 | kg | 胸・腹の質量 |
| m_7 | kg | 頭の質量 |
| k_1 | N/m | 前輪のばね係数 |
| k_2 | N/m | 後輪のばね係数 |
| k_3 | N/m | 前軸のばね係数 |
| k_4 | N/m | 後軸のばね係数 |
| k_5 | N/m | 座席のばね係数 |
| k_6 | N/m | 腰と腹のばね係数 |
| k_7 | N/m | 肩と頭のばね係数 |
| l_1 | m | 車体重心から前軸までの距離 |
| l_2 | m | 車体重心から後軸までの距離 |
| w_B | m | ホイールベース (= $l_1 + l_2$) |
| C_1 | NS/m | 前輪の減衰係数 |
| C_2 | NS/m | 後輪の減衰係数 |
| C_3 | NS/m | 前軸の減衰係数 |
| C_4 | NS/m | 後軸の減衰係数 |
| C_5 | NS/m | 座席の減衰係数 |
| C_6 | NS/m | 腰と腹の減衰係数 |
| C_7 | NS/m | 肩と頭の減衰係数 |
| h_1 | m | 前軸位置における路面の変位 |
| h_2 | m | 後軸位置における路面の変位 |

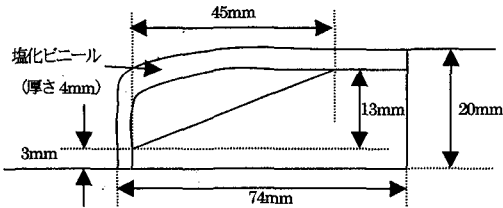


図-3 実験に使用した縁石

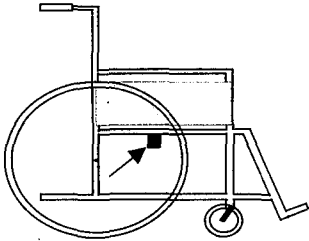


図-4 測点配置

4. 実測値と解析値の比較

図-5 は従来の縁石を上る場合の上下方向振動の実測値と解析値を 1/3 オクターブバンドスペクトル表示したグラフである。実測値のピーク値が解析値とほぼ一致しており、また OVERALL についてもほぼ一致（実測値；0.128G、解析値；0.112G）しており、非常によい結果が得られた。よって、本論で提案した解析手法により導かれた結果は、非常に実測と近いものであり、この結果を用いることに問題はない。

5. 縁石の形状による比較

従来の縁石による衝撃と、形状を変化させた縁石により得られた衝撃との比較を 1/3 オクターブバンドスペクトル表示したグラフで行う。

図-6, 7 は車椅子の前後振動と上下振動について比較したものである。被験者は体重 55 kg の男子学生である。前後振動・上下振動いずれの場合も全周波数域におけるスペクトル値が減少しており、縁石の形状を変化させることによって振動が減少していると考えられる。

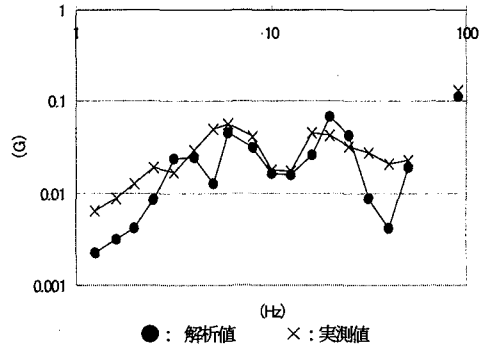
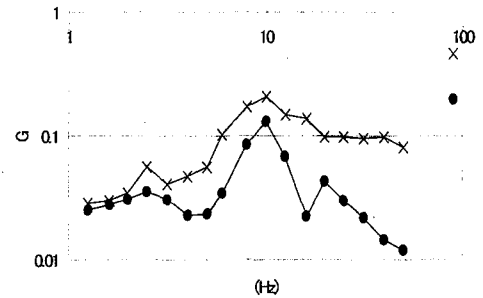
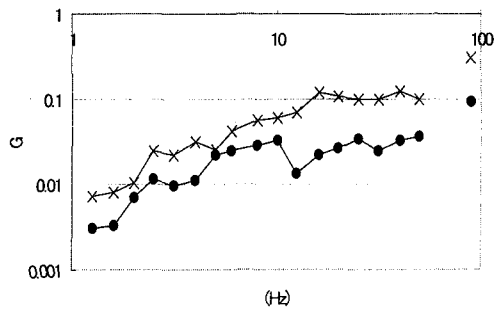


図-5 実測値と解析値の比較



| 凡例 | | | |
|---------------|--------|---------|---------|
| | 体重(kg) | 速度(m/s) | OVERALL |
| ●: ゴムチューブ添付縁石 | 55 | 0.534 | 0.198 |
| ×: 普通の縁石 | | 0.532 | 0.463 |

図-6 振動加速度スペクトルの前後方向の比較



| 凡例 | | | |
|---------------|--------|---------|---------|
| | 体重(kg) | 速度(m/s) | OVERALL |
| ●: ゴムチューブ添付縁石 | 55 | 0.534 | 0.094 |
| ×: 普通の縁石 | | 0.532 | 0.307 |

図-7 振動加速度スペクトルの上下方向の比較

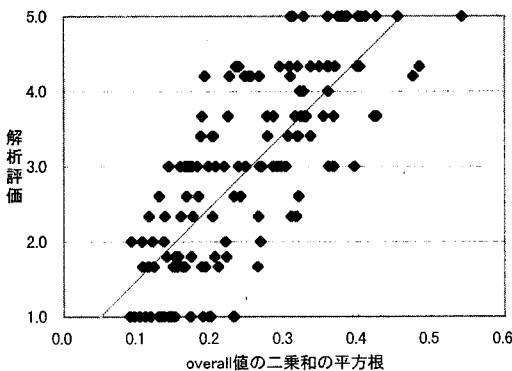
6. 衝撃評価関数

衝撃と感覚の関係を調べるために、形状を変化させた縁石の上り及び下り実験の際に被験者に対してアンケート調査を行った。アンケートは表-2に示す5段階評価(1.5, 2.5等の解答も有効にしたので実際9段階評価)で表し、走行終了後各人に答えてもらった。個々の評価にはそれぞれ個人差があるので、各人の上りと下りの評価の中で、最も大きいものを5、最も小さいものを1とし、評価を校正した。

衝撃評価関数を作成するに当たって、衝撃が大きくなるほど評価は悪くなる予想されることから、上下、前後方向のoverall値をそれぞれ二乗し、その和の平方根を説明変数に選び、被説明変数を実験により得られた評価として重回帰分析を行い評価関数を作成した。

調査の結果、各人のアンケートをグラフ化してみると、個人別の衝撃と評価の関係では、相関係数が0.71から0.88の値をとり、各個人が受ける衝撃の大きさとその評価を結びつけることができた。

一方、7人全員の評価と衝撃の関係も同様にある程度結びつけることができた。この場合、評価関数の相関係数は0.77であった。(図-8)



$$\text{評価関数: } Y = 9.79X + 0.514 \quad R = 0.77$$

$$X = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$$

・ R ; 相関係数

X_1, X_2 ; G単位

図-8 評価関数

表-2 感覚の5段階評価

| 評価 | 不快度 |
|----|-----------|
| 5 | 非常に不快 |
| 4 | 不快 |
| 3 | 少し不快 |
| 2 | あまり不快ではない |
| 1 | 全く不快ではない |

7. 結論

(1) 本研究では、縁石を車椅子が上り下りする時に生じる衝撃を路面の形状から求めることができた。しかし、縁石を下る場合の前後方向の衝撃は、実測値の方が理論値よりも大きな値となった。今後、この差を生じた原因を調べる必要がある。

(2) 縁石の形状を変化させ、弾性材料を添付することによって、普通の縁石を上り下り走行をするときよりも衝撃を軽減できることが分かった。今後の課題として、さらに衝撃を減らすために、縁石の形状・材料の改良、縁石に貼付する弾性材料の改良などが挙げられる。また、弾性材料の耐久性やメンテナンスの面を考慮に入れて検討していく必要がある。

(3) 車椅子の衝撃の評価を上下・前後方向のオーバーオール値を用いて分析した。相関係数が0.77であったことから衝撃の感じ方を予測できるようになったといえる。

この結果を、従来の縁石との衝突の場合に適用すると、形状を変化させた縁石は衝撃を1/3程度まで軽減していたことから、従来の縁石では相当に不快であるといえることができる。

参考文献

- 1) 藤原 優: 歩道路面の凹凸による車椅子の振動評価に関する研究 土木計画学研究・講演集 21(1), pp.523-526, 1998
- 2) 日本音響学会編 : 騒音・振動 (上), コロナ社
- 3) 小坪清真 : 土木振動学
- 4) Harris, C. M. and C. E. Crede (Ed.): Shock and vibration handbook, Vol.3