

弾性歩道縁石による車椅子の衝撃緩和に関する研究

A research on impact redaction suffered by wheelchair-users at curb *

壇 和喜 ** 田中 正和 *** 大枝 良直 **** 角 知憲 *****

Kazuki DAN ** Masakazu TANAKA*** Yoshinao OOEDA **** Tomonori SUMI *****

1. はじめに

車椅子利用者が走行時における不快要因として挙げられるのにインターロック舗装の凹凸や歩車道境界をなす縁石の段差等による振動がある。特に横断歩道と歩道の境界縁石の段差を車椅子が通行する際に生じ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困難な上、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には、縁石の段差解消が考えられる。

本研究では白杖によって段差を検知・認知する際の荷重(力)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ことにより、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、乗り下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・後輪に衝突することから車椅子に生じる振動加速度スペクトルを求める。走行には上

り・下りがあり、車椅子の振動には上下・前後の2方向に分解して考える。まず前輪について考えると、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(接触)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、

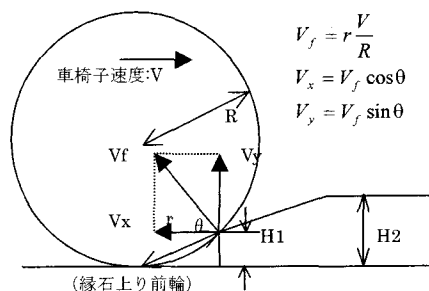


図-1 縁石衝突時の速度発生

その鉛直成分を v_y 、水平成分を v_x とすると、図-1のようになる。

ここでは縁石を上る場合の上下方向振動について述べる。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 $v_o(t)$ とすると、

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

$$v_T(t) = v_Y(t) - v_o(t) \quad \text{.....①}$$

成する。このモデルは上下・前後方向に適用し、また諸元は表-1に示す通りである。

モデルの運動は次の式②で表すことができ、

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

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、

$$\begin{aligned} \{X(\omega)\} &= [H(\omega)]^{-1} \{F(\omega)\} \\ [H(\omega)] &= -\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K] \end{aligned} \quad \text{.....③}$$

となる。ここに、

* キーワード 交通弱者対策

** 正会員 技官 九州大学大学院工学部

(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL:092-642-3275)

*** 正会員 福岡県

**** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院

***** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院

[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.

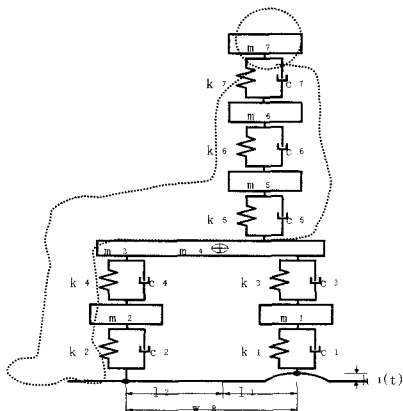


図-2 車椅子振動モデル

表-1 モデルの諸元

記号	単位	意味
m_1	kg	前輪および下質量
m_2	kg	後輪および下質量
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	前輪のばね係数
k_4	N/m	後輪のばね係数
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_0	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	前輪の減衰係数
c_4	NS/m	後輪の減衰係数
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	前輪位置における路面の変位
h_2	m	後輪位置における路面の変位

③式から振動加速度スペクトルを求めると

$$\{\alpha(\omega)\} = -\omega^2 [H(\omega)]^{-1} \{F(\omega)\} \dots\dots\dots ④$$

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、

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{v}_0 e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{v}_0 e^{i\omega t} d\omega - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega H_{(1)11} F_{1(\omega)} e^{i\omega t} d\omega$$

上式より次式が求まる.

$$F_1(\omega) = \frac{1}{-\omega^2} \left(\frac{1}{K_1} + H(\omega)_{11} \right)^{-1} \dot{v}_0 e^{i\omega t}$$

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 を前輪の半径, R_2 を後輪の半径とすると、

$$F_2(\omega) = \frac{1}{-\omega^2} \left(\frac{1}{K_2} + H(\omega)_{22} \right)^{-1} \frac{R_1}{R_2} \dot{v}_0 e^{i\omega t}$$

以上のことより

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

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. 車椅子の走行実験

走行実験を行うにあたり, 縁石の形状としては従来型, 弾性材料(塩化ビニール)を用いた試作1(図-3)及び今回新たに天然ゴムを二層にした試作2(図-4)の3パターンを考え, 各縁石への乗り上げ乗り下りの走行で, 縁石の弾性係数は試作1が100000(N/m), 試作2は98000(N/m)であった. 試作1, 2における前輪との接触点高さは7mm, 4.6mmとなった. また被験者は10人でいずれも健康者であった. 車椅子の前輪付近と座席シート直下に圧電式加速度計を取り付け, 車椅子が縁石を通過する時の衝撃を測定した. 衝撃は上下方向・前後方向共に測定し, またその際の車椅子の走行速度も測定する. 被験者には各走行終了後に衝撃の感じ方を表-2に示す5段階で回答してもらった.

4. 実測値と解析値の比較

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ものが図-6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についてもよく再現(実測値; 0.647G, 解析値; 0.605G)できていると思われる. よって本論で提案した解析手法により求めた解析値と実測値とは近いものであり, この結果を踏まえて解析方法を用いることにした.

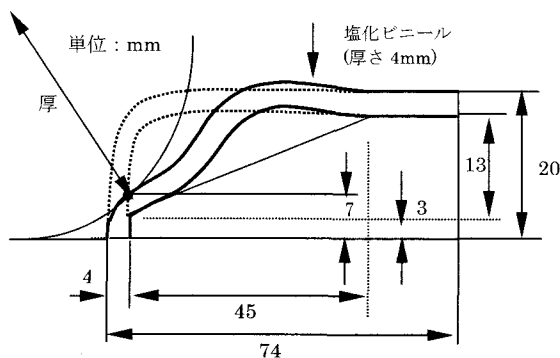


図-3 実験に使用した縁石（試作1）

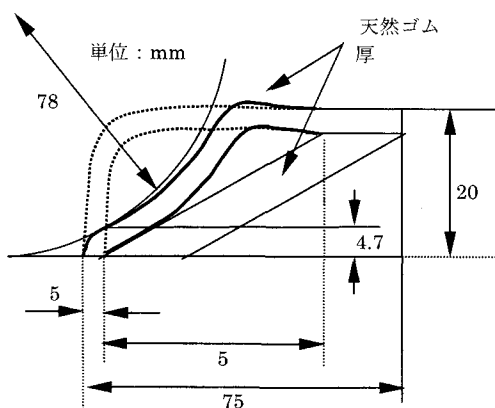


図-4 実験に使用した縁石（試作2）

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（図-3、4）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（図-7、8）

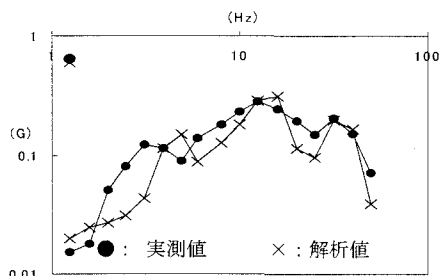
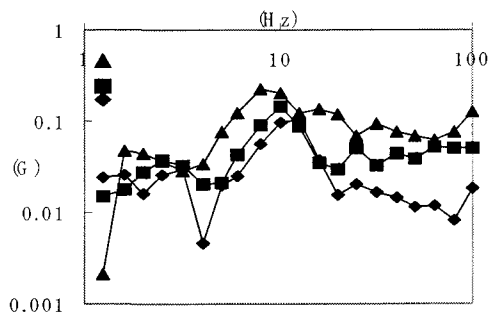


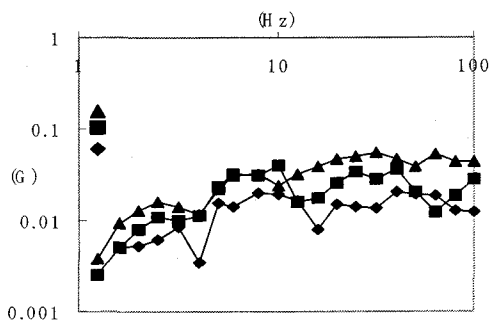
図-5 実測値と解析値の比較

である。図は車椅子の前後振動と上下振動についてそれぞれ比較したもので、被験者は体重55 kgの男子学生である。また縁石形状のみの影響を見るため



	速度(m/s)	OVERALL(G)
■：試作1	0.52	0.245
◆：試作2	0.49	0.174
▲：従来品	0.51	0.466

図-6 前後方向の衝撃の比較（座席下）



	速度(m/s)	OVERALL(G)
■：試作1	0.52	0.104
◆：試作2	0.49	0.061
▲：従来品	0.51	0.158

図-7 上下方向の衝撃の比較（座席下）

きるだけ速度の近いものを取り出した。

前後振動・上下振動いずれの場合も、ほとんどの周波数域において最もスペクトル値が高いのが従来型の縁石であり、試作1、試作2の順に下がっている傾向が解る。

前後方向・上下方向を併せた衝撃そのもののoverallは、従来型が0.492G、試作1が0.266G、試作2が0.184Gとなっており、今回製作した縁石で60%以上の衝撃を減衰させている。ここで、従来型と試作1で生じている差は段差を実質小さくしたとと弾性材料を貼付した結果と考えられ、試作1と試作2の差は段差をさらに低くし、また2層にしたゴム板によって衝撃をさらに減少させたと思われる。

6. 衝撃評価関数

衝撃と感覚の関係を調べるために、走行実験の際

に被験者に対してそのつど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）の内容で表した。個々の評価にはそれぞれ個人差があり、従来型の縁石を上る場合と試作2の下りについては回答に偏りがみられた。3パターンの縁石の中で評価に場合差が顕著に現れていた試作1の評価をもとに、各人の上り・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、他の縁石に対して評価の拡張較正を行った。従って較正後の評価に5以上、1以下の評価が存在している

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

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と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量に、被説明変量は実験により得られた較正後の評価として重回帰分析を行い評価関数を作成した。

個人別の衝撃と評価の関係をみると相関係数が

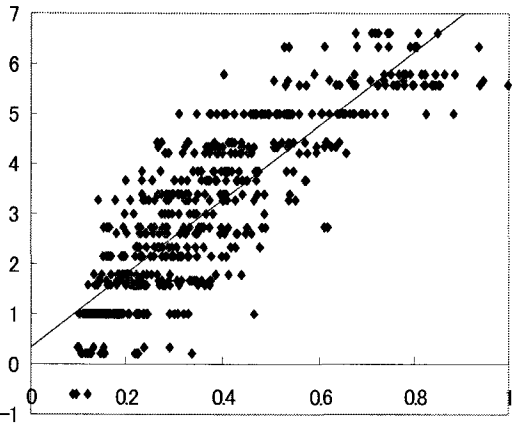


図-8 衝撃評価関数

0.79 から 0.91 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、10 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 0.86 であった。（図-8）

評価関数： $y=7.37x+0.35$

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

X_1, X_2 : 上下・前後方向の衝撃の overall 値

相関係数： $R=0.86$

7. 結 論

(1) 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。

(2) 衝撃は前輪の接触点高さよところが大きい吸収材を貼付することによって一層効果が上がり、より衝撃を軽減できると思われる。

(3) 各縁石における車椅子の衝撃の評価を上下・前後方向の overall 値を用いて重回帰分析した結果、相関係数が 0.86 であったことから縁石によらず衝撃の大きさから衝撃の感じ方を予測できるようになったといえる。

(4) 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。

参考文献

- 1) 田中正和：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，土木計画学研究・講演集 23(2)，pp.883-886，2000
- 2) 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
- 3) 寺町賢一：路面凹凸を考慮した人-車椅子系力学モデル，九州大学工学集報，第 72 巻第 3 号
- 4) 日本音響学会編：騒音・振動（上），コロナ社
- 5) Harris, C. M. and C. E. Crede (Ed.): Shock and vibration handbook, Vol.3