様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年　５月１７日現在

機関番号：１２３０１
研究種目：若手研究（B）
研究期間：２００８～２０１０
課題番号：２０７６０１４４
研究課題名（和文）衝突時の歩行者保護衝撃緩和自動車ボンネットの開発

研究課題名（英文）Development of an impact-decreased bonnet of an automobile protecting a walker

研究代表者
丸山　真一（MARUYAMA　SHINICHI）
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：６０３４４９２５

研究成果の概要（和文）：
本研究の目的は，自動車事故の際，歩行者に与える衝撃力を最小にし得るボンネットの機構を開発するために，薄肉弾性体における面内変位とたわみとの非線形連成効果を積極的に活用することを提案するものである．そのために，衝撃緩和機構開発のための基礎資料として，連続弾性体における非線形連成を考慮した，衝撃応答の解析を行った．その結果，構造要素の曲率や弾性拘束が衝撃力に与える影響を明らかにし，設計のための基礎資料が得られた

研究成果の概要（英文）：
In this research, utilization of nonlinear coupling between deflection and in-plain displacement in a thin-walled elastic body to develop an automobile bonnet with can minimize impact force for a walker in a traffic accident. For the design of an impact-decrease mechanism, nonlinear responses of a continuous elastic body subjected to an impact are analyzed. As a result, effects of a curvature and elastic constraint on the impact force are investigated in detail.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００８年度	1,000,000	300,000	1,300,000
２００９年度	1,500,000	450,000	1,950,000
２０１０年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総　計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：機械力学・計測制御
科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御
キーワード：機械力学・制御，非線形力学

１．研究開始当初の背景

近年，乗員への衝突安全保護対策の進展などに伴って，自動車による交通死亡者数そのものは減少傾向にある．しかしながら，対歩行者事故では深刻な被害が生じる場合が多く，歩行時の事故における死亡者が全交通事故死亡者数に占める割合は増加傾向にある．そのため，自動車のボンネットに歩行者の頭部が衝突した際の衝撃に対し，安全基準が設けられるようになっている．現状では，ボンネットとその下に配置されるエンジンなどの機器との間の距離を広く取ることで，歩行者頭部とエンジンなどとの衝突を避ける対策が広く取られている．

ところで，乗用車のボンネットなどに広く用いられる曲率薄肉構造要素は，大変形状態において面内変位とたわみとの間に強い非線形連成を有することが知られている．この曲率薄肉構造要素における面内変位とたわみとの非線形連成を活用し，構造要素上に衝突する物体への衝撃力を緩和し得る機構の

構築が期待できる．
２．研究の目的
　本研究の目的は，自動車事故の際，歩行者に与える衝撃力を最小にし得るボンネットの機構を開発するために，薄肉弾性体における面内変位とたわみとの非線形連成効果を積極的に活用することを提案するものである．本研究では，衝撃緩和機構開発のための基礎資料として，連続弾性体における非線形連成を考慮した，衝撃応答の解析を行う．
３．研究の方法
　図１に解析モデルを示す．自動車ボンネットを模擬した基礎モデルとして，曲率半径 R のアーチを考える．アーチは，長さを L ，密度を ρ , 縦弾性係数を E とし，厚さ h , 幅 b の一様な長方形断面を有するものとする．断面積は $A=bh$ ，断面二次モーメントは $I=bh^3/12$ である．アーチは両端でたわみについて固定され，一端で軸方向に固定，他端でばね定数 K_1 のばねで軸方向に拘束される．アーチの軸線にそって， x 軸を設け，それと直交するたわみ方向に z 軸を設ける．アーチのたわみを $W(x,t)$ とする．ただし， t は時間である．アーチ上の位置 $x=x_2$ に，初期の z 軸方向速度 v_0 の物体が衝突するものとする．物体を質量 M_2 とばね定数 K_2 から成るばね質量系で模擬し，衝突後物体とアーチが接触している時間範囲を解析の対象とする．衝突時の位置を原点とした，質量 M_2 の z 軸方向変位を $W_m(t)$ とする．
　アーチおよび衝突物体の運動は，以下の無次元方程式で支配される．

$$G(\hat{w}) \equiv \hat{w}_{,\tau\tau} - n_x \hat{w}_{,\xi\xi} - \alpha n_x + \hat{w}_{,\xi\xi\xi\xi} + k_2 \delta(\xi-\xi_2)(\hat{w}-\hat{w}_m) + q_s \delta(\xi-\xi_0) = 0 \quad (1)$$

$$n_x = \frac{\kappa}{2}\int_0^1 \hat{w}_{,\xi}{}^2 d\xi \quad (2)$$

$$\xi = 0,1 : \hat{w} = 0, \hat{w}_{,\xi} = 0 \quad (3)$$

$$\beta_2 \hat{w}_{m,\tau\tau} + k_2\{\hat{w}_m - \hat{w}(\xi_2)\} = 0 \quad (4)$$

ここで，以下の無次元量と諸量を導入した．

$$[\xi,\xi_0,\xi_2] = [x,x_0,x_2]/L, [\hat{w},\hat{w}_m] = [W,W_m]/r,$$
$$\kappa = (1+k_1^{-1})^{-1}, k_1 = K_1 L/(EA), k_2 = K_2 L^3/(EI),$$
$$\alpha = L^2/Rr, \beta_2 = M_2/(\rho AL), \tau = \Omega_0 t,$$
$$q_s = Q_s L^3/(EIr)$$
$$r = \sqrt{I/A}, \Omega_0 = \sqrt{EI/(\rho A)}/L^2 \quad (5)$$

r はアーチの断面二次半径，Ω_0 は振動数の代表量である． ξ は無次元座標， ξ_2 は物体衝突位置の無次元座標， $\hat{w}, \hat{w}_m$ は，アーチのたわみと衝突物体の無次元変位， k_1 , k_2 はそれぞれ軸方向弾性拘束と衝突物体の無次元ばね定数，α はアーチの無次元曲率，β_2 は衝突物体の無次元質量， τ は無次元時間である．また，Q_s はアーチの静的復元力特性の計算において，位置 x_0 に加えられる静的集中荷重であり，それらの無次元量を q_s と ξ_0 とする．

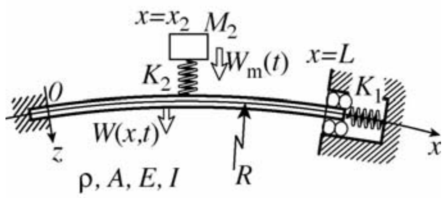


図１　解析モデル

　式(1)はアーチの運動方程式を表し，式(2)で示されるアーチの無次元軸力 n_x には，たわみの非線形項が含まれる．式(3)はアーチ両端での固定境界条件を，また式(4)は衝突物体の運動方程式を表す．
　解析にあたり，境界条件を満足する形状関数 $\zeta_j(\xi)$ を用いて，アーチのたわみと，衝突物体の変位を以下のように表す．

$$\hat{w} = \sum_j \tilde{b}_j(\tau)\zeta_j(\xi), \quad \hat{w}_m = \tilde{b}_0(\tau)$$

$$\zeta_j(\xi) = (\xi^2 - 2\xi^3 + \xi^4)\cos(j-1)\pi\xi \quad (6)$$
$$(j = 1,2,3,\ldots M)$$

上式で，$\tilde{b}_0(\tau)$ と $\tilde{b}_j(\tau)$ は未知時間関数である．
　式(1)にガラーキン法を適用すると，式(1)と式(2)で示される，アーチと衝突物体の運動方程式は，以下の非線形連立常微分方程式に変換される．

$$\sum_j \tilde{B}_{ij}\tilde{b}_{j,\tau\tau} + \sum_j \tilde{C}_{ij}\tilde{b}_j + \sum_j\sum_k \tilde{D}_{ijk}\tilde{b}_j\tilde{b}_k + \sum_j\sum_k\sum_l \tilde{E}_{ijkl}\tilde{b}_j\tilde{b}_k\tilde{b}_l = 0 \quad (7)$$
$$(i,j,k,l = 0,1,2,3,\ldots,M)$$

$$\tilde{B}_{ij} = \delta_{i0}\delta_{j0}\beta_2 + (1-\delta_{i0})(1-\delta_{j0})J_{ij}{}^{(0)}$$
$$\tilde{C}_{ij} = \delta_{i0}\delta_{j0}k_2 - \delta_{i0}(1-\delta_{j0})k_2\zeta_j(\xi_2)$$
$$-\delta_{j0}(1-\delta_{i0})k_2\zeta_i(\xi_2)$$
$$+(1-\delta_{i0})(1-\delta_{j0})\{\kappa\alpha^2 I_i I_j + J_{ij}{}^{(2)} + k_2\zeta_i(\xi_2)\zeta_j(\xi_2)\}$$
$$\tilde{D}_{ijk} = -\frac{\kappa\alpha}{2}(I_i J_{jk}{}^{(1)} + I_j J_{ki}{}^{(1)} + I_k J_{ij}{}^{(1)})$$
$$\tilde{E}_{ijkl} = \frac{\kappa}{2}J_{ij}{}^{(1)}J_{kl}{}^{(1)}$$
$$J_{ij}{}^{(p)} = \int_0^1 \zeta_i{}^{(p)}\zeta_j{}^{(p)}d\xi, \; I_i = \int_0^1 \zeta_i{}^{(0)}d\xi, \quad (8)$$

式(7)を固有振動形に基づく規準形の連立非線形常微分方程式に変換する．式(7)において，非線形項を省略すると， i 次の固有振動数 ω_i と固有ベクトル ϕ_{ip} $(i = 1,2,3,\ldots,M+1)$ が得られる．次式のように固有ベクトルを正規化する．

$$\psi_{pi} = \phi_{ip}\left[\sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{M}\phi_{im}\tilde{B}_{mn}\phi_{in}\right]^{-1/2} \quad (9)$$

この正規化ベクトルを用いると，アーチと衝突物体の固有振動形は次式で表される．

$$\tilde{\zeta}_i(\xi)=\frac{1}{n_i}\sum_{p=1}^{M}\psi_{pi}\zeta_p(\xi),\ \tilde{\zeta}_{0i}=\frac{1}{n_i}\psi_{0i}\ , \tag{10}$$

ここで，n_i は，振動モードの最大変位を単位量にするための係数である．固有振動形に基づく規準座標を b_i とすると，アーチのたわみと衝突物体の変位は次式のように表される．

$$\hat{w}=\sum_j b_j(\tau)\tilde{\zeta}_j(\xi),\ \hat{w}_m=\sum_j b_j(\tau)\tilde{\zeta}_{0j} \tag{11}$$

式(11)より，式(7)は次の規準系非線形連立常微分方程式に変換される．

$$M(b_i)\equiv b_{i,\tau\tau}+2\varepsilon_i\omega_i b_{i,\tau}+\omega_i^{\,2}b_i+\sum_j\sum_k D_{ijk}b_jb_k+\sum_j\sum_k\sum_l E_{ijkl}b_jb_kb_l=0 \tag{12}$$

$$D_{ijk}=\frac{n_i}{n_jn_k}\sum_{p=0}^{M}\sum_{q=0}^{M}\sum_{r=0}^{M}\tilde{D}_{pqr}\psi_{pi}\psi_{qj}\psi_{rk}$$

$$E_{ijkl}=\frac{n_i}{n_jn_kn_l}\sum_{p=0}^{M}\sum_{q=0}^{M}\sum_{r=0}^{M}\sum_{s=0}^{M}\tilde{E}_{pqrs}\psi_{pi}\psi_{qj}\psi_{rk}\psi_{sl} \tag{13}$$

式(12)において，時刻 $\tau=0$ においてアーチのたわみと速度が 0 であり，衝突物体について $\hat{w}_m=0,\hat{w}_{m,\tau}=v_0$ の初期条件の下で，Runge-Kutta-Gill 法により数値積分を行い，衝突挙動を明らかにする．

４．研究成果

アーチの基本特性として静的復元力特性を図 2 と図 3 に示す．図は，アーチ中央 $\xi_0=0.5$ に集中荷重 q_s を与えた際の，アーチ中央でのたわみを示している．図 1 は軸方向弾性拘束のばね定数を $k_1=1$ に固定し，曲率 α を変化させた結果である． $\alpha=0$ ，つまりはりの状態では，たわみの正負について対称な特性を示し，たわみ増大に伴い軸力が増加することで剛性が増大する，漸硬型の復元力特性を示す．一方，曲率 α が増加してアーチが非対称な形状を有するようになると，原点よりアーチの曲率を減ずるように荷重を加えた場合，はじめ剛性は減少していくことがわかる．たわみがより増大すると，剛性は上昇に転ずる．つまり，アーチは漸軟−漸硬型の復元力特性を示す．曲率 α が大きいアーチほど，比較的低い剛性を示すたわみの範囲が広いことが分かる．つまり，アーチに物体が衝突した際，物体に働く力を小さく保てる可能性がある．図 3 は，アーチの曲率を $\alpha=20$ で一定とし，軸方向弾性拘束のばね定数 k_1 を変化させた際の静的復元力特性である．軸方向弾性拘束のばね定数が大きくなると，アーチの漸硬型の特性がより強まり，大たわみの状態では復元力が増大することがわかる．

図 4 から図 6 は，曲率 $\alpha=20$ ，軸方向弾性拘束のばね定数 $k_1=1$ のアーチの中央 $\xi_2=0.5$ に，ばね定数 $k_2=100$, 無次元質量 $\beta_2=1$ の物体を初速 v_0 で衝突させた際の，衝

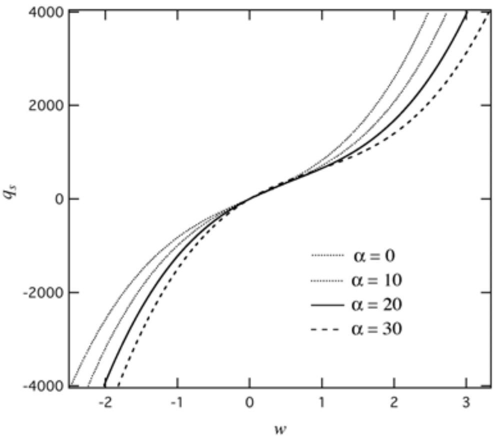


図 2　アーチの静的復元力特性

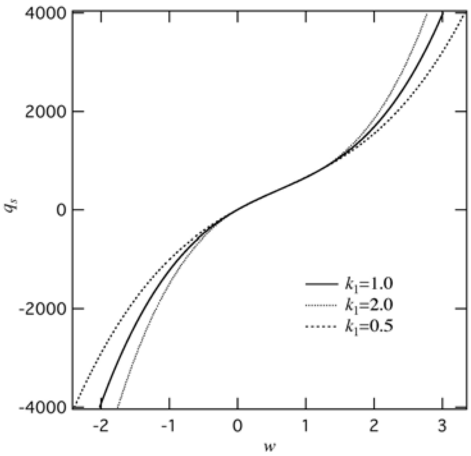


図 3　アーチの静的復元力特性

突物体の質量の変位 $\hat{w}_m$ ，アーチ中央の変位 $\hat{w}(0.5)$ と衝突物体に作用する力 $f_m=k_2\{\hat{w}(0.5)-\hat{w}_m\}$ の時刻歴を示している．図 4 より，アーチとの衝突に伴い，質量は減速し，最大変位を取ったのち，アーチから離れる方向に移動する．衝突物体の初速 v_0 が大きいほど，物体質量の最大変位が大きい．一方図 5 より，物体との衝突に伴って，アーチにもたわみが生じている事が分かる．衝突物体の初速 v_0 が大きいほど，アーチの最大たわみも大きくなっている．しかし，とくに初速が大きい条件では，衝突物体の最大変位ほどは最大たわみの増大が顕著でないことがわかる．これは，衝突物体の初速が増大し，アーチに比較的大きなたわみが生じると，先に示した復元力特性の結果より，アーチの剛性が急激に増大するためである．逆に，アーチの復元力特性が漸軟型の特性を示す，比較的小さいたわみを示す初速の際には，アーチが低い剛性を示し，衝撃緩和の意味で有利になるものと考えられる．また，初速が大きく，アーチのたわみが大きいほど，アーチのたわみ振動の振動数が高いことがわかる．これは，図 2 に示した，漸軟−漸硬型の復元力特性に対応している．図 6 より衝突物体に働く力も，

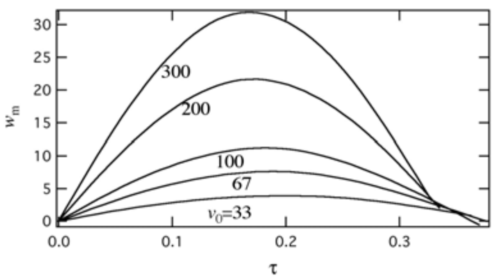


図 4　衝突物体質量の変位の時系列波形

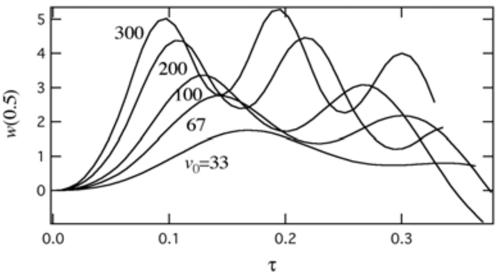


図 5　アーチたわみの時系列波形

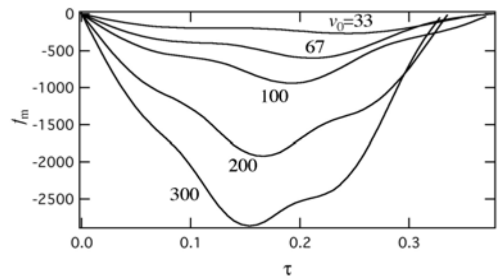


図 6　物体に作用する衝撃力の時系列波形

初速の増大ともに増大していることがわかる．

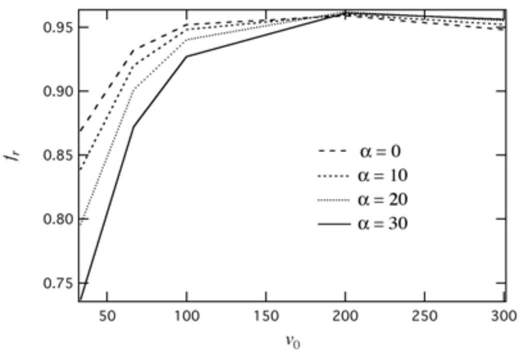
アーチによる衝撃緩和の効果を調べるために，衝突物体が初速 v_0 で剛壁に衝突した場合に，物体に作用する力の最大値 $f^R{}_{\max}$ を基準として，衝突物体に働く力の最大値 $f_{\max}$ を評価することにする． $f^R{}_{\max}$ は次式で示される．

$$f^R{}_{\max} = -\sqrt{k_2\beta_2}v_0 \tag{13}$$

次式で示される，アーチに衝突した場合と剛壁に衝突した場合での，最大衝撃力の比 f_r を用い，衝撃緩和の効果を表す．

$$f_r = f_{\max} / f^R{}_{\max} \tag{14}$$

図 7 は，軸方向弾性拘束のばね定数を $k_1 = 1$ に固定し，曲率 α を変化させた際の，初速 v_0 と衝撃力比 f_r の関係を示している．衝突物体の初速が小さいほど，衝撃力比は小さいことがわかる．これは，アーチのたわみが比較的小さい漸軟型復元力特性の領域にあるため，衝撃力が緩和できているためである．一方，初速が大きくなると，衝撃力比は増大し，



0. 95 付近に，ほぼ収束することがわかる．また，曲率 α が大きいほど，漸軟型復元力特性を示すたわみの領域が広いため，小さい衝撃

図 7　衝撃力比と初期速度の関係

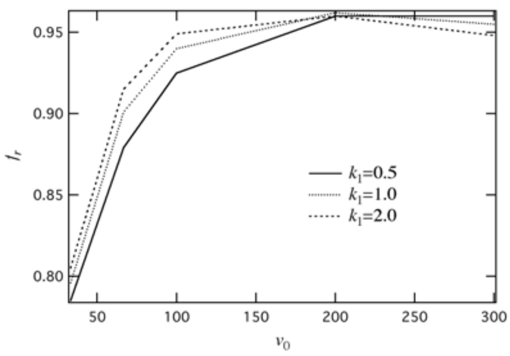


図 8　衝撃力比と初期速度の関係

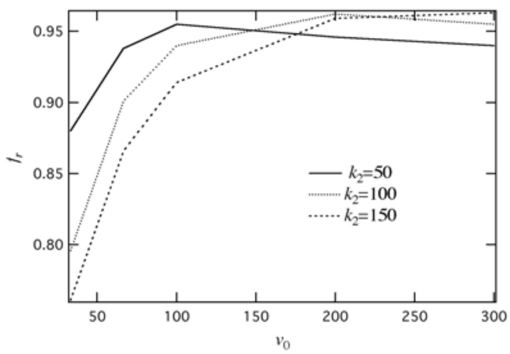


図 9　衝撃力比と初期速度の関係

力比の値を示している．その効果は，初速が大きくなっても持続されている．

図 8 は，アーチの曲率を $\alpha = 20$ で一定とし，軸方向弾性拘束のばね定数 k_1 を変化させた際の，初速 v_0 と衝撃力比 f_r の関係を示している．軸方向のばね定数 k_1 が小さいほど，衝撃力比は小さい値を示し，その衝撃緩和の効果は高い初速度まで持続する．これは，軸方向のばね定数 k_1 が小さいほど，アーチの漸軟型復元力特性の効果が小さくなり，アーチが大たわみに至っても，比較的小さな剛性を有するためである．

図 9 は，アーチの曲率を $\alpha = 20$，軸方向弾性拘束のばね定数を $k_1 = 1$ に固定し，衝突物体のばね定数 k_2 を変化させて，初速 v_0 と衝撃力比 f_r の関係を調べた結果である．初速度が小さい範囲では，衝突物体のばね定数が大きいほど，衝撃力比が小さいことがわかる．これは，衝突物体のばね定数が小さい場合，アーチに発生するたわみが小さいことによる．一方，初速が大きくなると，アーチの大たわみ領域まで達するため，物体のばね定数が小さい方が，衝撃力比は小さくなる．

以上のように，非線形復元力特性を有する曲率構造に物体が衝突した際の，衝撃力に与

える曲率や弾性の影響を詳細に明らかにすることができた．これらの知見を活かし，ボンネットの設計が進展することを期待するものである．

５．主な発表論文等

６．研究組織

(1)研究代表者

丸山　真一（MARUYAMA　SHINICHI）
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：６０３４４９２５