

تحلیل فروریزش دینامیکی ستونهای جدارنازک با مقطع مربعی تحت ضربه محوری

سعید فعلی^۱ و افشین شکری^۲

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۷/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۲۰)

چکیده

در این مقاله، مدل‌های ارائه شده قبلی برای تحلیل فرایند فرو ریزش ستون‌ها با مقطع مربعی تحت بار ضربه ای اصلاح گردیده است. برای این منظور، اتلاف انرژی ناشی از کوتاه شدن اولیه دیوارهای مقطع و اثرات اینرسی لایه‌های چین خورده قبلی در نظر گرفته شده است. نیروی لهیدگی متوسط محاسبه شده با این روش همخوانی مناسبی با نتایج تجربی داشته و نسبت به مدل‌های تحلیلی قبلی نتایج بهتری را پیش‌بینی نموده است. بر اساس نتایج این مقاله مشخص شده که سرعت و جرم ضربه زننده که در مدل‌های تحلیلی قبلی برای محاسبه نیروی متوسط لهیدگی از آن صرفنظر شده، تأثیر بسزایی در نیروی فرو ریزش مقطع و میزان جذب انرژی آن دارد.

واژه‌های کلیدی: مقاطع مربعی، ضربه محوری، فروریزش، لهیدگی محوری

Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes under Axial Impact Loading

S. Feli and A. Shokri

Mech. Eng. Dep't., School of Eng. Razi Univ.

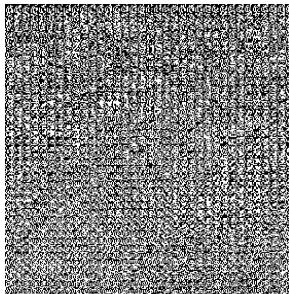
ABSTRACT

In this paper, previous analytical models for analyzing dynamical progressive buckling of square tubes under axial loading have been modified. In the improved model, the dissipated energy due to shortening of tube walls and the effects of inertia of previous folding layers are considered. The mean crushing force, which is predicted by the analytical model, has acceptable consistency with the results of experimental tests and in most cases their accuracy is higher. Based on the results of this paper, it is observed that the impact velocity and the mass of striker (neglected in previous analytical models) are important in mean crush force and in absorb energy of a square tube.

Keywords: Square Tubes, Axial Impact, Buckling, Axial Crushing

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): felisaeid@gmail.com

۲- کارشناس ارشد



É / À ï ɔ̄niv ÁÁ [n²] • | ï ZÁP!] Ȑ É . , ³ Z a
É Áy É • Â / Ä] » €/ Y € ß / Y € Â ÖÄ / Ä] ï { Â]
ÂÉ / þ ÉCÁ € ÅÉ N [x/ ÿ - Z] • Z ï ÉYz ÅE ï Å f þ
| ÿ Y { Z nÄj ÅM/ » È { È e Z - i - v e
Z ÉZ ÅE ï ÉÅMÉ • Â / Ä] » €/ Ä[!]] É . , ³ Z a
É ÁÄ . Z Ä » ÅÄ] ÅÉ Á € ÈZd Y | žm Z - »
{ • Å ¾/ » Å ÅZ ¾ Å ³/ » ÅÄ] €É Z Ä Å È þ | i ÅE .
• { YZ ÅÅ Z / þ • Å/ y/ þ | ï Å{ Y Š È Z » • M
. { Å È þ • È] Å Å } €/ Y €] É
É Z Å ÅZ È þ // [B] Å È // ° i] Å € È Å Å // » Y € Z
Z Å / ÅM ï { Å Å / Å / Å , v Å Y] • Z ï • Y | m C
É Z // Å Å » l Å Å / Å / // þ Å V Å Å { Z " f // þ Y
Ê ³ { • Å y / Å z ° » Å f g Z È i / Å è • È u Y Å ï
Å / Å Å Å Å Å i , Z Å Y , { Å W È X È Y a

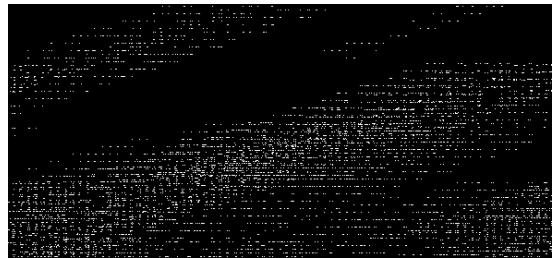
É ï Z ñ Á Ä Ý € Ä §
Ä \wedge Z d Z - W Š y € Ä Ë Á X ,
Š ï € - ,
¶ Ë É Z Z Å Š y € Ä Ë Á Y ,
Ê . Z ' q ,
 $\frac{1}{2}$ Z ß Å Å \square ,
Ê Ë Š Å e ,
Ä » |-4 »
• Ä p y Ä Ä È f | Ä È Z Z Ä Z ï Z p { }]
• / È / (Z . Z ^ + Ý € i ³ Ä / Y + E] v f »
Ä / È f € h j N Z % f Å i + Y 2 S M A Z -
~ » / / Z / / Z / + Y j / È / Z n Y 2 / M f / / f
Ä / Y , / 3 M E Y Y { € ³ Ä { Z ; f Ä K Z]
M Ø Z 1/4 i , a Z Å Å Å ³ Y E Ä Y Z Ä m , - ?
• { Ä È / Ä { Z È f f } Z M E i Ä] € “
Z È Ä È { Z • Ä § Y E { Ä .] € f f {{ } ° -
½ È Ÿ { Z È f f } Z - i Ä f f E ³ Ä -

1- Pugsley

1- Fugley
2- Alexander

2- Alexander
3- Abramowicz

5 Abramowicz
4- Wierzbicki



À • Ä½• Z ÍTÉ Äj ({ Y, ½ • ÉÄ f YY
· È— Z ÉÄ j MB • Ä½• Z ÍTÉ Äj (_ Y

- / þ Ä Þ / [~ / r Á f Æ / j Í Y É Z Å Á Æ Ë Y
• { Á É Á / t , m { Ä / | / , É f Æ / Å / X [] Z m
¾ / Æ [8-6] | / Z] / q Æ Z Æ - Q M þ Æ Z Á Ó Á .
ž / ~ - Z] Æ Æ Å , f / Æ Æ Á Æ | S [~ n É f Y Æ Z - »
Ê ³ | / Ä Z / o Ä N / Æ f Æ / Q Å Æ | s Ô Æ Y] € »
¾ i / Æ Z Å Å Æ Ø Æ C A Y Y - Æ Z Å Å Y Å Å Æ Á Y
Ä | Ä f S C E { Æ | Ä n { • Ä y Ä E C E , Ä { • Ä y
Š Å Z Ä 7 , u Ä] » Z z Å % Æ , Æ • Ä E M E S Y
Ä ^ / þ Z M / » Æ] Z Å • Y • Å S E / Å Z Å • Y u Å E {

• { Ä / Y È // É Z Á S Á • Ä / Y Á Z È A { • Ä y Z // e
Z Á S . M E È // y / / , { Ä Ä / \ A | Á Z O S È Z / M
• Z Á È { • Ä y Á // / / Y Á | / / , É Z È È € // , Y
Ä ^ f Z È , | K Ä y Á ¾ I À r Á / Á Á È » | A E .
· | { Ä ¼ {
È ³ { • Ä y Z j e Z Á Á y Ä [] È . I] • A E Á Á È Z Á
¹ Z / • Ä Á Á T { { Ä ¼ g È } Z F A E g { A f f
É Á € Á [Z j È S O Y Z / Z Á Á Y Z / f È Y Á È , | I A E .
I • Ä È ° È Y ¹ , I { Ä ¼ } M ° C E & ¹ C P f A f »
- / f Ä / e (Ä + Z n / A Ä È € ' È — Z f ^ , Y € I
• Ä / { d A t M A / , I È Z Y Á O Z / M È Z Á U
€ / I Ä p / p , I / Ä / n / , I È M | / F È Z S A E Z » • M
€ / b È / f È ³ | I / A E B M € { \$ — Z È Z Á Y
Ä { Z Z G A È S • A È X P A , M È S È Y C Z È e Y Z ^ ^ , Y
² , { Ä p M È Á A f M È J È M % , È • Ä È S Z È Y
Ä / [S Y ³ , Y , I È È È // ° I J A I È È A M { 5 - 6 } Y €] M
• € / I y Z I È Z / / I À r d / A È Z È , f , A È { € ³
- / f Ä p € / / U Y A / / È X È // , È Z È A E / / , A •
½ Y È A È , ¼ Y È d f Ä | A { Z È f È Z È Z m
½ A f Y Y { Ä S A { Z Y } Z p h Y È { , I • Ä Z | ,
A È / € È Y A È / A È È A È È Z " A / f Z Y , Y | m
. { Ä A È o È • A v »
É A • Z È A q (Ä È » Z z C E Z È f • €] È Y
€ • Z A V A A È Z È È È ' ¼ A È ° , € I I C A Z " f »
Ä f y Z | A M A { Y , C Z , P ° , { Ä % , È • M È Z a

Å • Ä½é • Z ḷ T E %o ġ E • ÉÁÅÉ' § Y
 Áš • Ä½é • f Z Z ġ € %o, E • ÉÁÅÉ' § Y
 . E — Z %o A, E Y ÉÁÅÉ' § Y
 ž ~ - Z ɿ Å Å %t, E • (Å Ä E E) , E Z p Å » {
 Á Å | µ | » E ° l e Z f Å Y E • Å v Z d v E] € »
 d t Å | O f S E e { Å | Å] € € m Å € Y € i Y

1- Hayduk

1- Mayda
2- Jones

3- Yang

1. e Å Ä M Á; € Æ {Éf Þz m ÁÄY, u•€ »
€ /]d Yt ÁE OE % Y Z ÁE x A Ä W • ¥ Y € V E Á Y
Z Ð ³ | / Ð Á Ä Y, u•€ ». [9-10] | Á Ê Z È " Z]
€] Ä € Z f s p ð } Ð l f f ð O, a ' € S Ä Ä m Á e
N o k h , ž / ~ t ~ } f ® l f f ð O a Ë z Á E Á € Z }
- È x Z v Š ¼ y ^ f È ³ | i Ð Á Ä , u•€ Ä M Á
t ~ // } // » Z l f // f ð O z a Z k e y É • €] / { € } / ³
, È / f € Ä E Y y • €] o Ä A } Y M { k h ² / 4 , ž ~ - »
• { U B ž ,) " Ä v " € Ä X ½ R ß Ä d f Ä | { € §
2m: μ { Z È / » (E f f ° / • { AD Á " / Z ß 4 E ° .
Ä | /, - € % f É Z Á f f Ä Y { • Y Z f f Ø H h)
d f Ä Y

d - € ø Ó { Z 1-1-2
 Ä / Ä v " • Z Ä E Y { • Ä y Ä E Ø A E Ø M Y
 Äd / f Ä | ¶ i ° Q E Ä M T • f " Ä Ä E { Ä Ä Y {
 [~ m { E ³ | i Ä E Ä Y , u E Ä v " • Z Ä E Ø E Ä
 • {, / - € Ä Z Y Ä / { n Y | Ä f f i p f • d Y { E f € i Y
 Ä / f / < Ä X | Y Z Ä E ³ { • Ä y Ä E Ø E E Ä Z]
 { Y o M m Y { Ä y Y f f Z h { Z E » € Ä n 1-2-0-1
 a] Z Ä » Ä } E E ³ { • Ä y Ä Ø R E E Ä Z Y €]

10. The following table shows the number of hours worked by 1000 employees of a company. The data is presented in a frequency distribution table.

(·) Y ([])

Ê Ô ZÄ] ^{; / - } € ÉZ Å € ÉY €] € Ä . { Z »
¾ Ä Ä m Ä n e • Ä v d » E n E ^{3} { • Ä Ä y Ä Ö R E
Z /] Z V / € n Ä Ä • É Ä Ä V É Z Ä Ä € Ä ¼ Ä n »
: { Ä E » Ä f ~~€~~ c • Ä Ä h f Ä

$$4m^* \frac{d^2Y}{dt^2} = 4N_0 G g. \quad (3)$$

• È / °JEÁÄY, u €Z^‡ZN 2
• • È / °JEÁÄY, u €Z^‡ZN 2
Ä // f € Z^‡ZN 2 // (Ä Z / Ä / /) Ä ° DE/Z 2 " // •
5 ¶ ° / ¢] Z © » Á ß Ä ÄZ ÄZ Z © E Ä E »
Äd » Z z © u Ä Ä Ä Ä M Ä { Ä E Ä f S E E E E {
[10] | (È] E Ä h H \ l e Ä Ä N E Ä

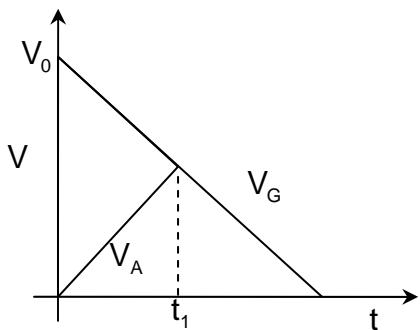
• ¶ aÄ ∞ Z $\frac{1}{4}$, E³ | bÄ | Ä ∞ A $\frac{1}{2}$ Z $\frac{1}{4}$ (4) ¶ °
 • ¶ aÄ ∞ A $\frac{1}{2}$ Z $\frac{1}{4}$, E³ | i AÄÄY, u € » aÄ ∞ A $\frac{1}{3}$
 . E³ | i AÄÄ, u € »

The image is a vertical rectangle with a dark gray to black gradient. It features a subtle, uniform halftone dot pattern across its entire surface. There is a very faint, diagonal gradient that runs from the top right towards the bottom left, creating a sense of depth or perspective. The overall texture is slightly grainy, typical of a scanned document or a film frame.

[19] μ Á Y

d Ÿ € Á Š Å Z Ä T / Ä } € Ÿ € †³ | ï ¶ A Ä , u »
Z t] t, Ä / œ v Z / e } È Š E Y , Ŝ Y E F Z Ä m
½ | / Ä Z / œ / œ Š / - / œ | Ÿ Ä E / k E Á Z € / * E | ° E
• Á € ® i f / † Ø Z a / Å³ Ø i M A J Ø Ä ¼ e Z y •
• { Ä { • Ä / t Z Å d u Z . / » A E / E € ¶³ (Ä]
Ä / n † t, d / È Ø Z v ¶ A Š Å Z € , Z ¶ °
¾ i † A • v » † Ä ^ † Z (V H P) c Z v ¶ A Š Å Z -
€ E • A Ä] - € 1 E F Z Ä A Ä | • Ä } € Ÿ € ¶ { Ä ¼

$$H' = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{4N_0} \frac{Gg}{m^*} \quad (10)$$



É• Z Z€] È€]] ÄÄÄY, u€Ä | [~ nÉf € ï Y
Ä / u €Ä] È€ Z v•µ Ä-S Ä/ZV/ // fÄ Td // f Y
•{ ®if / f GøÄ / ÉÄ/€[€ "Z ÄÄY €, I Z ÄÄ]
Ä , u€Ä] [~ nÉf €/€] pYÈ³ | Ä Z p Ä —
: | ÈÄ»d f {Ä(Èc) È³ | i ÄÄÄY

$$E_C = N_0 \cdot H \cdot \ddot{Y} \\ E_C = \frac{m^* V_0^2}{8M_R \cdot 2 \cdot \frac{Gg}{2N_0}} . \quad (11)$$

• { - / - ÉS³ | / Ä Z É ÅÄÑE] [- nÉ f (€1), X ~] Y •
É f €1 ï / MÄÉ YÄÅÅE »½ Z YÖÄ y “ ◎ E
¾ i / Å / ◎ E { È³ | / i pÄÄY , u €Ä» / [- m
Ä / E₂ÖM | ? cZ/¢” { Y | þ { eY | þ h lly Y { • Ä y
. { Ä [€ “

$$\ddot{Y} = \frac{d^2Y}{dt^2} = \frac{G}{m} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{2GM}{c^2r} \right) Y$$

$$\dot{\zeta}^G \frac{d^2 Y}{dt^2} - 4N_0. \quad (5)$$

$$\bullet \{ \tilde{A} | \tilde{A} \} \subset Y \in \{\tilde{A} \in \mathbb{C}^3 \mid Y \in \mathbb{C}^5 \text{ f\"ur } Y \in \mathbb{C}^3\}$$

: Zeigt nicht $\tilde{A} \in \mathbb{C}^3$ f\"ur alle $Y \in \mathbb{C}^3$

$$V_G = \frac{dY}{dt} \Big|_G = \frac{4N_0}{G} t V_0, \quad (6)$$

. | \tilde{A} \in \mathbb{C}^3 | \tilde{A} \} \subset \{ dY \in \mathbb{C}^3 \mid M \in \mathbb{C}^3 -

$$V_G(t_1) \quad V_A(t_1) \quad \ddot{Y} \quad \frac{V_0}{\frac{4N_0}{G} \frac{N_0}{m^*} \frac{Gg}{4m}} \quad (7)$$

$$\ddot{Y} \frac{N_0}{m^*} \left(\frac{4N_0}{G} \frac{V_0}{m^*} \frac{Gg}{4m} \right) = \frac{V_0}{4M_R} \frac{1}{1} \frac{Gg}{N_0}, \quad (8)$$

$$M_R = \frac{0.5 \rho CHh}{G}, \quad (9)$$

$$\frac{\frac{V_p}{W_m}}{W_l} = 0 \quad \ddot{Y} \\ \frac{4 \mathcal{E}}{H^2} - 8 \frac{I_3}{b} - \frac{V_0^2 G (\mathcal{E} h)^2}{M_0 (G - 2 \mathcal{E} h H) \frac{G^2 g}{4N_0}} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{W_m}{W} = 0 \quad \ddot{\gamma} \quad \frac{1}{b} \quad 2\sqrt{\frac{|I_1|}{|I_3|}} \frac{1}{\sqrt{hH}}. \quad (16)$$

€ρ]-Ζάλ(15) Ä~]•Υ(16) Ä~]•Υ·Ε·ΥΖ·Θ]
:d‡Υ·Ε·Θ·Α(•Η·3) ΙΚΑ·0)» υ·Α·Η·Ä·Η·Ζ·ν·»

$$f(H) = \frac{A_1}{H^2} - \frac{A_2}{\sqrt{H}} - \frac{A_3}{A_4 H} - \frac{A_5}{H^2} = 0. \quad (17)$$

$A_2 = 16\sqrt{I_1 I_3/h}$, $A_1 = 4 \text{ C}$ $\frac{1}{2} M\AA^-$
 $|A| / E_{A_5} G = \frac{G^2 g}{4N_0} A_{A_4} 2 \text{ Cm}^2, A_3 = \frac{V_0^2 G / (Mh)^2}{M_0}$
 $\frac{1}{2} \{ Y \cdot Z \cdot A + X \cdot Z \cdot Y - Y \cdot Z \cdot f \} (M \cdot A \cdot a) \cdot Y \cdot$
 $P_m = -/ \cdot A \cdot B \cdot 3 \cdot | \cdot B \cdot A \cdot C \cdot 14 \cdot A \cdot \sim \cdot] \cdot b \cdot A \cdot C \cdot Z \cdot$
 $\cdot \{ \{ \cdot E \cdot A \cdot \sim \cdot Z \cdot V \cdot Z \cdot u \cdot E \cdot Y$

A • Ä ¼ • Z → f € 2%_ø, Æ • Á Å § 2Y3
 • {Ä Á • Ä ¼ • Z + T € %_ø Æ Á É Å ' μ Å Æ Y | »
 Z Å { • Ä ¼ Ä Ø Á + Y d + Ä Y | Á { % 2Z0Y |
 Ä Æ e • Å Y < • Y / - € p / - • {Ä / 4H Æ , • Z " e • Y
 , | / Å ¼ • Ä Å Z %_ø Æ Á € § Å Y Å • Ä %_ø Æ Á € §
 Á Æ / , y Å | / [~ / n e f € j Y { d + Ä | ¶ i ° O E e
 Z / Y / Y € j Å e Y N Á Å / f & € Å Æ m • Z -
 • Z 1/2 { Y Y € Á Z Z // d / / p m Y H Á S E, 2 E II
 É Y € p / | V E - + Ä + Z Å , y É f € z M Z Æ m • Z y
 : Z d + € p Y F E A É Å ' 3 Y

$$\frac{\frac{P_m}{M_0} - 24I_1 \frac{b}{h} - 4 \frac{C}{H} - \theta_3 \frac{H}{b}}{G \ell \theta h V_0^2} S \frac{H}{h} \frac{\$}{2\odot} = \frac{2M_0 - 24Ch - G \frac{G^2 g \$}{4N_0 \odot}}{}$$

ÉY € / Á] Ä / Æ | // € / (§8) Ä // ~Ä X / þ Z v »
Z / § d / þ X Z ß i Å %, Æ Á æ g á Z Å Z ¼ .
b ÁH d ^ γ A // ^ | « Á (§7 Ä T] É • Z H « N u | /
; ° Æ Y {

$$\frac{\frac{V_m}{M}}{M} = 0 \quad \ddot{Y}$$

$$\frac{4S}{H^2} - 6\frac{I_3}{b} - \frac{S}{h} \frac{V_0^2 G (\Delta h)^2}{M_0 (G - 2\Delta h H) \frac{G^2 g}{4N_0}} = 0, \quad (19)$$

Ê³ | ï Äf z ÉZÅ' • ÝÈ , Éf € ï ã 3
Ä / ÉZÅÝ È ^ | É€ 4, Ä³ | ï Äz ÉZÅÄ' . Y
[~ / m f € Ä ÝÈ V‰ È Y Ä Z Å Ä‰ , È • Á € §
• { È / , Ä | / [~ / m f € / q Ý § Z Å Ä‰ È M |
[~ / m Y , / Y » / Ä / [€ “‰ , È • Ä Ä Z Å Y | Y e
• m Á • Ä % è Ä Á Ä Z Å • Z Ä Y Ý € Z È , È f € ï Y
: Zd Ý €] (Y1€ Ä1-2) c Ó { Z »

$$E_1 = M_0 \frac{a}{\pi} 16 I_1 H \frac{b}{h} - 2 \mathcal{L} - 4 I_3 \frac{H^2}{b} \quad (12)$$

$$\frac{G \mu Ch V_0^2}{4 \cdot 2 \mu Ch G \frac{G^2 g \S}{4N_0} \circ} = E_{II} M_0 \frac{a}{\pi} \frac{H^2}{h} ZC H^0 \frac{\pi}{\frac{1}{4}} S \quad (13)$$

Ã | Å Z(12) / Ø Ó { Z(12)13) c Ó { Z Ä »Æ Z } »
c Ó { ZÄ / Ä | Ä Ä } € € Ád Ý E Y Ä R Å È »
. d f Ä | Ä S Z " Y % , Ä E S € Y

S Ž z ŽE3 Ž | ° • Ž • A½-Z ½ ÁZ%o Ë Á É Á Ž ' - A3
Ä Ž Ž • A Ž A E q Ä Ž E { • Ä M Ä Ä Ö R Ë Ä f Y
[~ / M E Y Ä Ä Z / Ä P k e 3 d // d Y Ä % o Ë Á € §
1 Z / E m Y Z / Z Ä d / f 4 K , € Y k M E , T f € ; Y
S Ä / d / f p Y 2 H Z M] % E Á É Á Ž ' - Ä E Á Ä |
É Á Z Z / A Ž € .] Z Ä Ä Ž E { | A E - t Ä E Á i g
, Ä | 1 Z / E m Y Z / Z Ä , y É f € z M / { Y Y € «
1 : Z d f € ! E v € ! A E . Ä E Á € ! ,

$$\frac{P_m}{M_0} = \frac{32l_1 b}{h} \frac{4S_C}{H} \frac{g_3 H\$}{b C} \frac{G \ell \theta h V_0^2}{2M_0 2 \mu Ch} \frac{G^2 g \$}{4N_0 C} \quad (14)$$

Ä /éY Å|]À É]¶ Å AÉ Á» ÉÉ Z(14) Ä ~]•Y •
¾ ÉÄ /d ^ ^ (18) Ä / ~ þY / § ZZÅM • ÆÁM
: Y + Å ¶ « YÉÉZ - »

d ^ ^ E^3 | i A Z . ° v E f Y E p M a { A P 4 ° } • {
 Ä { Z Z f (Ä Y D A) E { Ä Z A d E f a g h c Y € Ä l } p e
 (18) (14) -] Y o Ä { Z Z f t A Y E E Ä E X P A , v Y
 Ä | o f E^3 | i A E f z E Z A Ä E Y Y (26) Ä (22)
 • Y | S E Y Z Ä S f Z z O B » | ° • Y { Ä V A t ; Y
 { Ä l j c Z j Z S A Z Z Ä € f O E b } | i A Z . ° v d f Y
 E Y Z A Ä v A o Ä y [e] » Ä E | i € " Ä Ä m • {

[5] C/h 3218 Z% ÄÉÝŠĘĘ ZIĘĘM) μ Á | m

Specimen Number	L(mm)	M(kg)	V ₀ (m/s)
I1	1332	736	6/35
I2	1325	736	8/638
I3	1329	736	7/89
I4	132	736	6/442
I5	133	736	8/963
I6	133	566	10/421
I37	1001	636	8/728
I38	1002	736	4/427
I40	100	736	6/42
I43	100	736	6/487
I44	100	436	9/298
I45	1002	536	8/706
I46	100	386	10/387
C=37/07 mm , h=1/152mm			

[5] C/h 3025 Z^{1/2} Å É Y Š E Z I E • 20 μ Å | m

Specimen Number	L(mm)	M(kg)	V ₀ (m/s)
1	1333	736	6364
2	1332	736	10698
13	222	736	6248
21	244	736	7749
28	2672	736	9136
31	2891	736	8488
32	289	736	6142
33	289	736	7711
35	2891	736	1023
36	2891	736	10255

Ä / ~ Å Š ß Ç Ø Æ Ù Z • Ä { Z Z N] Æ Ç Ä]
É Z // Å • Å Æ ³ Y // É Æ I . » Æ Z // Å • Å Æ f Å Ç 29) i
: | Æ Ç Å ^ Å Ç C • Å Ä % o , È • Å Ç Ç §

$$P_m^d = \frac{a}{\left(\frac{V}{0.33} \right)^{\frac{1}{p}}}, \quad (30)$$

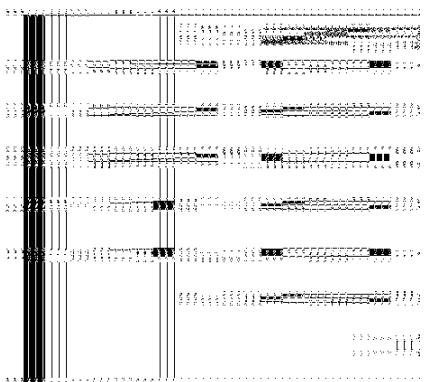
$$\begin{array}{cccccc} \cdots & \llcorner & \circlearrowleft & \text{CD} & 1 & \gg \cdots \\ \lrcorner & & & & \frac{1}{4} & \\ \text{a} & & & \sqrt{\frac{1}{0}} & & \end{array}$$

$$P_m^d \leftarrow \frac{0.44}{CD} \cdot p, \quad (31)$$

$$P_m^d = \frac{0.39 V}{G_D} P_m, \quad (32)$$

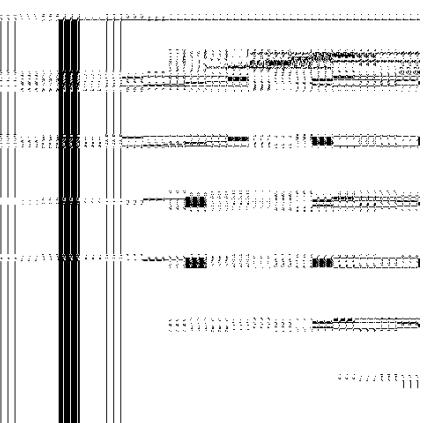
$$\begin{matrix} \text{“} & \text{©} & \text{CD} & \text{”} \\ \text{—} & & & \frac{1}{4} \\ \text{a} & \varepsilon & \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}} & 0 \end{matrix} \quad (33)$$

$$P_m^d \leftarrow \frac{0.25}{CD} P_m.$$



Ä d l ^ E 3 | i A Z ° v c Y € + M a (A) k l e

Y È ³ | / ï AE ° v fd Y È / È Æ AA 9 A | <
È ³ | ï AE È YY È] Ä d C Y € Ä p e ^ ?
Ž z OE . / » Ä E / » Z OE / i f z È È 1 2 ½ » Z - f »
¹ Z ° v d Y È Š È Y Z È AA v A Ø È € Ä d f Y
Ä / ¾ Y È / Y È È S È Y ° / § Ø » Z È ³ | ï AE .
Š È Y Z È AA f Y A] € g v Ä J { Ä } f Z u
w € f AA f g e Ø Z È v Ä d Ä d € “ Ä y d È] € f
{ Ä / y È € Š b / Ø » Ä Z H Ø Ä Z È e Ø Z Ä € -
½ È ³ | / ï AE ° v f Y A] € “ Ø Z È A Ø Z • Ä y €]
È Z AE f Y A € f Z È Z V E i f Z € M A E] € f OE i]
È ³ | / ï AE ° v f, Ä / Y A] € “ Ø Z È A Ø Z • Ä y €]
È / f € C A È Y A A Z • Ø Z • Ä M Z È È S È Y , § Y
Ä | { ~ n È f Ä È ³ Y i 1 Z ° v € f M A | Ä] € “
• Y A / n È A , » i È V e A E . j Ø Ä d f M Z m f Ä e



, i, f \rightarrow Z Å É Y ∞ || i A Z ° v. Ø P Y ∞ <
½ • Z ∞ || A Å É Y ∞ € Y ∞ € Å l d e ;

[6] C/h 7.00 Z₁₂¹² Å É Y Š E ŋ Z I ŋ E • 23) μ Å | m

Specimen Number	L(mm)	M(kg)	V ₀ (m/s)
A7	237	1675	6/11
A8	233	1675	4/99
A10	236	1675	6/84
A15	239	1675	6/29

C=8/75 mm , h=1/25mm

[6] C/h 22.25 Z½ Å É Y Š E Z I Ÿ E • M) u Á | m

Specimen Number	L(mm)	M(kg)	V ₀ (m/s)
E1	1781	77,25	8/14
E2	178	135,5	6/11
E3	221	135,5	9/62
E4	222	135,5	4/99
E5	268	77,25	10/09
E6	2677	135,5	6/84

C=365 mm, h=1/64mm

C/h 13 Zœh 9 { Á | uÊ³ | AE ; fz É Z Å Ä ' . Y
• { È³ | i AE ° v É z Å Ä v , A€ } E { Z ö } (È)
Z n] È z h i AE fz É Z Å Ä Y c Y € i p y e €]
É Å € q AÉ Z Å • { ¶ i . ¶ i V Ä Å } { AE }
È³ | i AE Ä ' € Y³ E B Å • { AE — Z È A l AE .
Ä { M } Z h i A Ä Y € E È x • Ä ½ • Z - f »
AÉ f € Ø y e M € Ä - | A { È } ¶ . (€ i i È q
. | (Z Ä f (Y d) » Á Z - »
É € i] M E Ä T Å È / Ä n B f ¶ ° • Y { Ä Y / 4 {
• { Ä / È /] Z / s - Z » Z Å E { Y Ä } Å Ä | i C E È | { Y
• { i / { È } i Y Ä { { Z { f Ä } f € - n E Z Å ^ i ≠
10 { Á | b u Š d / Ä • Y Ä » È Ä Z Å E Z Å ^ {
Ä / Z Å E Z Å ^ { t ° Y Ä — Z % , E Y Ä € § Y
%, E • Ä Å // 18 { Y A | b u Š g e Ä • Y Å » / Z Å “
• È € Š è / B ³ | i AE ° v f Z { Ä Y { Z n E • Z - f »
Ä € n A } Z h ³ | i AE ° v Š E Y Y | Å S Å Z { C Å y
. { { È³ } / 2 È f € - n Y Š I È Y , § Y

- {É ° i » Z Å Ä E » | i É A Ä l ð f X z O E » • Y | Š. È Y Z Ä S ð f X z O E » | ° o Y / 4 i À r ¼ Å
€ / A f ® Ë € " ¾ i Ä | Ä Ä J € " i W Ä ad ß } € f • È € f O E p | y l i A E : v f f Z Y | è n A f h g h
È / € @ È " ¾ , Ä Ä È ³ | i É A · Y Y Ä Y È A Y (Ä) z Z i Ä | z Ä Z / È Y € // S A Y È Y . Y Ä È ½ Z { O Ä y
É • Y ~ ¾ Ä Z | f È Y / A ¾ Ä M Ä " Ä k Ä K
| / , f z È Z / Ä Ä È ³ Y / È Z / Ä Ä È (È) o Z f f Y € f O E / M] € € "] o Y (€)] Ä Ä f » F z m | ^ i Z f a
€ / È • Z / M] Ä È » | È z Z o Y È A % , È • Á € § . { Ä È »
• { Ä | / Ä ^ / f È v | » i È A . € " l ð e È f Y Y o Z] - / f Ä È Á € Y ; € + M (10-13) È Z | Å • {
• Y - f ^ / È | m | Ä 5-6] { Ä m È A , » , È Z | Å » c Y € / Z | È f z - » Z o Y | è n Z / Å È Y È ³ | i A E .
| A (È) Ä | Ä Ä J € € Ä d Y € f È / È Z Z / Å | / Ä { \$ È Z A V Ä , » € Y € f

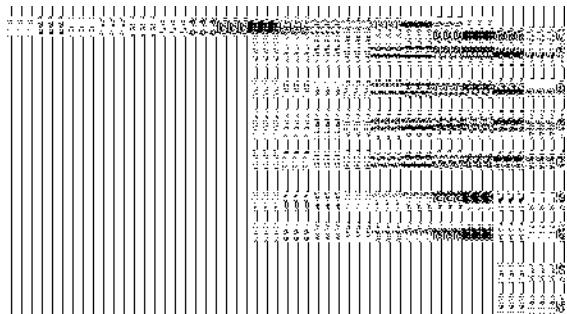
c Y € Älpha^ E^ 3 | ï RéA € Y & (A24) E^
[6] ž m € V] €lRÉEzfñ 7.00 É YaY € :

[6] Ž ŘEČKU 2225 É YDĚJU +

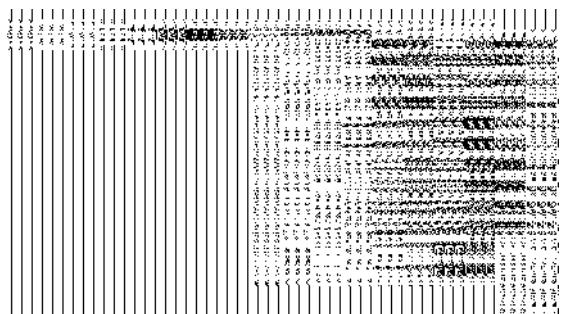
- // † Äf³ » // ĚÁ//14- 17 É Z¶/Å • {
μ // » Ě/Z·Å/T! // , f Ä»ZÅh É Y È P i/ÅZ È {

• Y | Š Ě Y Z Ä S ß ř ſ Ž z O E » ¶ ° • ¾ / A r ¼ Å
 • Ě € f O E P | y l A E : v f ſ Z ř Y | ř n Å f ſ h
 Ä | ŕ A Z { / Œ / Œ Y € // Š Ÿ Y E N , Ÿ A E } ½ Z { C Ä Y
 Ä / T / ŕ E } ({ } Z / Ž n - t } ſ ½ | € e •)] } Z m
 Y € f O E / Ä M] € € "] Y (€ E) A Ä E f € - c n ¶ | ^ ŕ Z f a
 § . { Ä E »
 - / ſ Ä E A € Y € | M a (10-13) E Z A Å • {
 c Y € / Z k ř e f z » Z ř Y | ř n Z / Å Ä E T Y E } | i A E .
 E /] € E E Z Z A Ä | / A { Š E Z Ä V Ä Ä J € Y € ſ
 . d ſ Ä E E Ä € E Z G ř m Y € A m Ä »

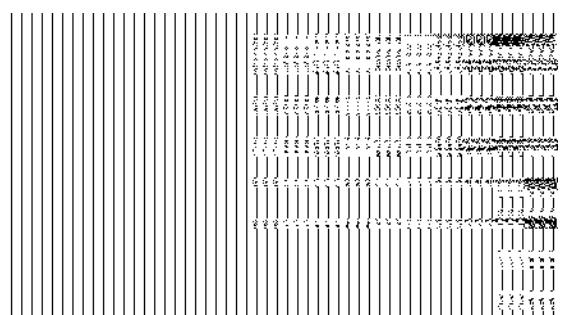
[5] ž m € 1 € 1 € 3 € 1 3025 É Y € 1 € 1



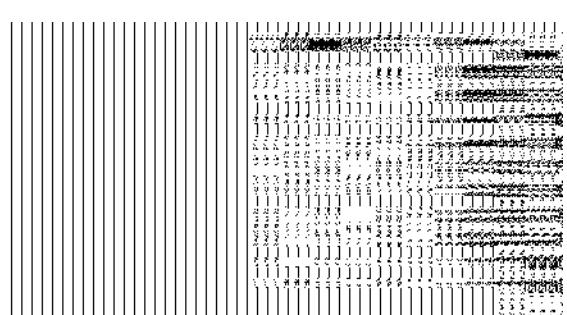
c/h 3218 É Y-ÄE» | ÍÉÁ ÄIÆ(14)¶°



c/h 3025 É Y-ÄE» | ÍÉÁ ÄIÆ(15)¶°



c/h 7.00 É Y-ÄE» | ÍÉÁ ÄIÆ(16)¶°



c/h 2225 É Y-ÄE» | ÍÉÁ ÄIÆ(17)¶°

Ê /] € Ë ZZ f d Ä | v M { Ä Ä | s Ô EY, i , v e
¶ / , v p // s Ä / A r Ä G Ä ž / / m Y { Ä / m Ä »
Z Ä i Ä Z Ä z O E f Ä | Ä ^ E [Ä - z - Ä p Ä Ä » Y €] M
. | (Ä] » 4 μ Ä | Ä p Z ~ »

É Z Y Ä , v e Ä Ä p / Z m Z Y f Z Ä V A M (»

¾ i ' z Ä Ä } f Ä E » | i Ä Ä € i j E Ä E Ä] A X e

• { Ä E] € Z A Ä E Z I E Z M l ^ ^ Z ~ % 7 5 { Ä | u

Ä / d ^ ^ E / , v p / b Z f Ä g A E P - 4 { Ä | u

• { Z / y o Y t / p o Y Ä m [Ä , j Ä p E / Ä Ä u / p M

Ä / B E p 4 ¶ ° • { { Ä m Ä Z Ä Ä Ä Y o Ä ^ f Z v »

Ä / n Y f - d / f % E o E 1 6 ¶ ° • { E Z Ä Ä Ä Y Ä €]

Ä • Y Ä Y Ä Ä Z Ä d A E g Y | S Ä Z Ä { Ä E »

É Z / T y Z / E m ^ E p h | { Z Ä n l f { Ä C / h)

3 - 1 μ Ä n Ä Ä f • Z Ä i Ä r d f Ä f S Z Ä E ^ ^ z

Ä c / h 3218 • { { } Z / n p Ä / Ä / d / f Z Y O E / »

μ Ä / S Ä Y Z / S M t C Y h 7 • € f O E / h] 3028

Ê , t € Ä E Y Z Ä Ä E » f O E i Ä , t € m } Z m

€ f O E i Ä . F A O E Y Ä E n / € N f Z Ä Ä E f / Ä Y / m

Ä | / Ä ^ / f % v / f E S - Ä f Ä Ä Ä Ä E Y / Ä E { Ä »

É • Ä c X e / f Z A V o Z E U Z / Ä Ä | € f O E h] A X e

É Z Ä Ä Ä E Y | } Z / p m Ä S Ä Y Z / S Z Ä E S Ä Z -

¾ / E Ä / ° Ä Ä Y m Z Ä (e Ä E » f O Ä k] • Ä y q

Ê / , Ä k • Ä / y / f Z Ä Ä E Ä f € o A Y E E M , V e u | »

Ä | / Ä / f S E C E { Ä E | p n | ° Q E Z A K E Z Ä Ä E O A •

. d / f Ä | / K E Z Ä Ä Y Ä Z M f S E C E { Y d / f Y

É Ä E , Ä « • Ä y / f Z Ä Ä E Ä f € A I E Z Ä E Ä K E

• { Ä / / Ä Ä » / Z Y P E | p n | ° Q E Z A K E Z Ä Ä E O

€ / f Ä Ä | / E € C A S E E Y , E k , v E Z A E . | »

Ä | / K E Z / Ä g A Z P E | p n , V e u | » { ½ M f § € ³

. d / f Y

μ | / / Ä / / E E m / , l p v / d E Z 1 6 ¶ / / • {

Ä / / (Ä] E] € l r E E Z f O E l] • Ä p n E Ä Ä » Y €] M

€ ' E Z Ä Ä Ä Ä f / z / Z p n Ä / { Ä Z k Ä M , Y

€ E { Ä / z / m E Ä | / Ä / W E Y Z M Z E P Y Y

d i / " Ä / E (Ä] € Ä l E E € Ä Y E Z Y I Ä Ä Ä E i }

. | (Ä] Z ~ E Y • Y

5. Abramowicz, W. and Jones, N., "Dynamic Axial Crushing of Square Tubes", J. Impact Eng., Vol. 2, No. 2, pp. 179–208, 1984.

6. Abramowicz, W. and Jones, N., "Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes", Int. J. Impact Eng., Vol. 4, No. 4, pp.243–270, 1986.

7. Abramowicz, W. and Wierzbicki, T., "Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns", J. Appl. Mech., Vol. 56, No. 1, pp. 113–20, 1989.

8. Yang, C.C., "Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes", The 2ndConf. on Theoretical and Appl. Mech., Tainan, Taiwan, R.O.C, 2003.

9. Tam, L.L. , "Calladine C.R., Inertia and Strain-rate Effects in a Simple Plate-Structure Under Impact Loading", Int. J. Impact Eng., Vol. 11, No. 3, pp. 349-377, 1991.

10. Su, X.Y., Yu, T.X., and Reid, S.R., "Inertia-Sensitive Impact Energy-Absorbing Structures part I: Effects of Inertia and Elasticity", Int. J. Impact Eng., Vol. 16, No. 4, pp .651-672, 1995.

11. Su, X.Y., Yu, T.X., and Reid, S.R., "Inertia-Sensitive Impact Energy-Absorbing Structures Part II: Effect of StrainRate", Int. J. Impact Eng., Vol. 16, No. 4 , pp. 673-689, 1995.

ž — Z Ä Y » i » Z V A B Ä / š i Z / % É € .12
 Ä // % Z y / È Y h € / Z d / / v È / / € Z / / Y | / / m
 , ® / i j Z Á € .3 , È È f M S A O E | c Y È f Z A c • Z - Ä | Å Z Ä O E / s O / p Y / b È Z È f d • € Z € Y
 .1388 , Ä Z O E è Z Ä Z E O E è Y Å / i F A M È M È F Ä 1 G / / A n Y € Ä t Ä l È f f € 3

1. Jones, N., "Structural Impact", Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989.
 2. Alghamdi, A.A.A., "Collapsible Impact Energy Absorbers: an Overview", Thin-walled Structures, Vol. 39, No. 2, pp. 189–213, 2001.
 3. Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", J. Appl. Mech. Vol. 50, No. 4, pp. 727–34, 1983.
 4. Hayduk, R. and Wierzbicki, T., "Extensional Collapse Modes of Structural Members", Computers & Structures, Vol. 18, No. 3, pp. 447–458, 1984.