



محاسبه نظری نیروی لحظه‌ای چین خوردگی در ستونهای مربعی تک سلولی تحت بار محوری

عباس نیک‌نژاد^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، حسن مسلمی نائینی^۳، امیرحسین بهروش^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، Ghlia530@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله، رابطه‌ای برای محاسبه نیروی لحظه‌ای چین خوردگی برای ستون تک سلولی مربعی زیر بار محوری ارائه می‌شود. اساس این رابطه، تعریف و تحلیل «سازوکار اساسی چین خوردگی» و محاسبه نیروی متوسط چین خوردگی است. برای این منظور مجموع نرخ انرژیهای تلف شده بر اثر خمش حول مفصل‌های افقی و مورب و نیز نرخ انرژی تلف شده بر اثر تغییر شکل‌های انبساطی، با نرخ کار خالص انجام شده توسط نیروی خارجی بر روی سازه برابر قرار داده می‌شود. رابطه به دست آمده می‌تواند نمودار نیروی لحظه‌ای چین خوردگی را بر حسب مسافت چین خوردگی و بر حسب زاویه چین خوردگی با دقت مناسبی پیش‌بینی کند و به جای مقدار میانگین نیروی چین خوردگی، مقدار نیرو را در هر لحظه تخمین می‌زند. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شده است.

کلیدواژگان: نیروی لحظه‌ای، چین خوردگی، ستون مربعی تک سلولی، هانی کمب.

Theoretical Calculation of the Instantaneous Folding Force in a Single-Cell Square Column under Axial Loading

A. Niknejad¹, G. H. Liaghat^{2*}, H. Moslemi Naeini³, A. H. Behraves⁴

1- Ph.D student, Mechanical Engineering Department, Engineering faculty, Tarbiat Modares University

2- Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering faculty, Tarbiat Modares University

3- Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering faculty, Tarbiat Modares University

4- Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering faculty, Tarbiat Modares University

*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

Abstract- In this paper, a theoretical formula is derived to predict the instantaneous folding force of a single-cell square column under axial loading. Calculation is based on analysis of "Basic Folding Mechanism" introduced by Wierzbicki and Abramowicz to calculate the instantaneous folding force. For this purpose, three mechanisms of energy dissipation were assumed. The formula obtained in this paper, can predict the instantaneous folding force variations versus folding distance and versus folding angle with good precision and can predict folding force in each time instance instead of the average value. The results of theoretical formula were compared with experimental data and good agreement was observed.

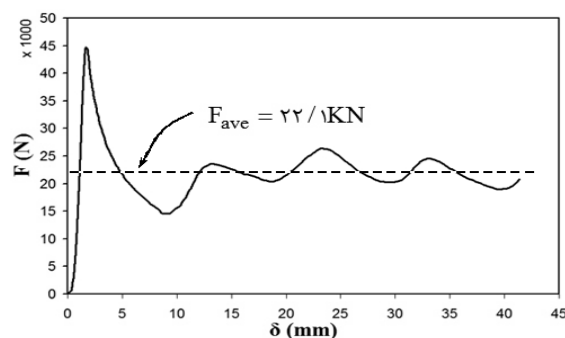
Keywords: Instantaneous Force, Folding, Honeycomb, Square Column.

۱- مقدمه

نیک‌نژاد و همکاران [۱۶] به کمک تحلیل‌های نظری، سینگلاریتی نیروی لحظه‌ای چین خوردگی را در آغاز تشکیل این پدیده در ستونهای چهارگوش بررسی کرده‌اند. چن و همکاران [۱۷] نیروی متوسط چین خوردگی ستونهای چند سلولی مربعی را به روش تحلیلی به دست آورده‌اند. زانگ و همکاران براساس نظریه المان سوپرفولدینگ، نیروی متوسط چین خوردگی ستونهای چند سلولی مربعی را به روش نظری محاسبه کرده‌اند [۱۸].

با مرور برخی مقالات در زمینه چین خوردگی ستونها و هانی‌کمب‌ها مشخص می‌شود که نیروی متوسط چین خوردگی در ستونهای تک‌سلولی و چند سلولی‌ها به روشهای نظری محاسبه شده است. در این مقاله نیروی لحظه‌ای چین خوردگی در سازوکار اساسی چین خوردگی به روش نظری و سپس نیروی لحظه‌ای چین خوردگی برای ستون مربعی محاسبه می‌شود.

به بیانی دیگر در این مقاله به جای محاسبه مقدار متوسط نیروی چین خوردگی - که موضوع تحقیقات قبلی در این زمینه بوده - (و با خط چین در شکل (۱) نشان داده شده)، به محاسبه نیروی لحظه‌ای چین خوردگی ستون مربعی - که مدل کوچکی از هانی‌کمب با سلولهای مربعی است (و با خط ممتد در شکل (۱) نشان داده شده)، برحسب مسافت چین خوردگی، به روش نظری پرداخته می‌شود.



شکل ۱ نمودار نیروی لحظه‌ای چین خوردگی و نیروی متوسط چین خوردگی در ستون مربعی آلومینیمی.

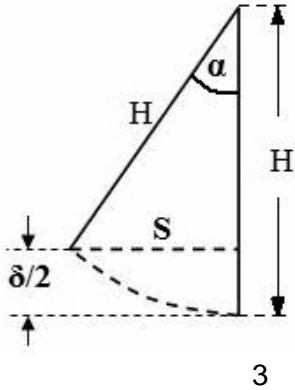
هانی‌کمب سازه‌ای جدار نازک است که به سبب بر خورداری از ویژگیهای منحصر به فردی مانند خاصیت جذب انرژی زیاد، در مقیاس وسیعی به عنوان جاذب انرژی و ضربه‌گیر در برابر بارهای خارجی استفاده می‌شود. ورقهای ساندویچی با هسته هانی‌کمب به دلیل سفتی و استحکام مخصوص بالا، در صنایع حمل و نقل و هوا و فضا به کار می‌رود. در میان خواص هانی‌کمب، چین خوردگی آن بر اثر بارگذاری محوری از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا بیشترین میزان جذب انرژی توسط هانی‌کمب از طریق این سازوکار صورت می‌گیرد.

در دهه‌های اخیر پژوهشگران به بررسی رفتار هانی‌کمب‌ها برای بارگذاریهای مختلف پرداخته‌اند. محاسبه نیروی متوسط چین خوردگی به روش تحلیلی برای «سازوکار اساسی چین خوردگی» در سال ۱۹۸۳ توسط ویرزیکی و آبراموویچ [۱] انجام شده. در همان سال ویرزیکی و هیدوک [۲] به بررسی مدهای چین خوردگی انبساطی در المان زاویه‌ای پرداخته‌اند و آبراموویچ [۳] محاسبه مسافت چین خوردگی مؤثر را در ستونهای جدار نازک انجام داد. سپس چین خوردگی دینامیکی ستونهای مربعی به روش تجربی توسط آبراموویچ و جونز [۴] مطالعه شد. در سال ۱۹۸۸ ویرزیکی و آبراموویچ [۵] چین خوردگی ستونهای مربعی را در حالتی که درون ستون از فوم پلی‌اورتان پر شده، به روش تجربی و نظری بررسی کردند. سپس ویرزیکی و آبراموویچ [۶] با معرفی المان گوشه با زاویه دلخواه، نیروی متوسط چین خوردگی را به روش تحلیلی برای ستونهایی با مقاطع مربعی و شش‌گوش به دست آوردند. لیاقت و همکاران صحت روابط به دست آمده را از طریق آزمونهای تجربی بررسی کرده [۷] تا [۹] و به بررسی عددی و نظری مساله پرداخته‌اند [۱۰] تا [۱۳]. اثر پرکننده‌های فلزی مانند فوم آلومینیم درون ستونهای مربعی و رفتار این ستونها در بارگذاری خمشی [۱۴] و نیز نحوه چین خوردگی [۱۵] توسط سانتوسا و ویرزیکی ب روشهای تجربی و عددی مطالعه شده است.

.(! \$% &"# Q P < 2H .%) 3 J,
K%) \$=J I 1 D L 15 1R !#
F % 1 15

⊗ 2H Sin D

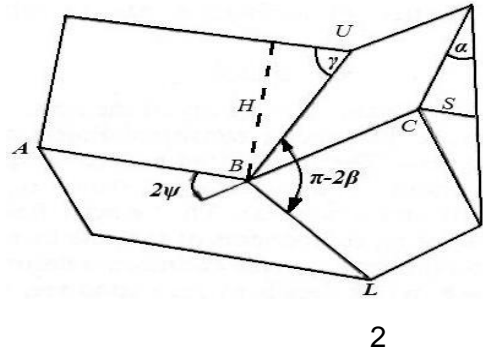
86



3

[1] -2

'() * +, - '() * /, « \$% &"#
. '() 1 " 0 ,



2

-1-2

-2-2
K \$% &"# (! G % '()) *+, -
% [2] % 1 1= > 1= > S ' B
F % 1 E1

$\int_{int} S M^{DE} N^{DE} ds L M_o \dots$ (4)

M^{DE} KM!, H T=N^{DE} 15 " % 1
. UD - &_{DE} ! - &_{DE} KM!, H3>
W,) '() *+, KL 15 P P V=
(X , Y5 1 # Y5 <D +)
*+, % P V= (! 1 K%) '(
'() *+, <D ; +) W,) '()
, (! 1 H3Z PBM&)

[2] % I X@_ 15 P P V= 1
F%) 3EB 15 K I I % I J '(

\$% &"# [2]
:) 1 9 % 1 '% * /8763) 4 5
\$% &"# ; . J 90° L 0 \$% &"#
A # . 1 ? @ L 1 1= > <1
L . \$% &"# " B % .)
F2] (! (E 1 L I_o CDB

$tg J \frac{tg I_o}{Sin D}, tg E \frac{tg \dots}{Sin I_o}$ (1)

1 1 9 H \$% &"# G D G <
1 9 L 1 9 " 1+ E G KM H ' % % I J
(H% I J \$% &"# ! >
F%) 1 E 1 863) 4 5

$(2H \sim 1 Cos L$ (2)

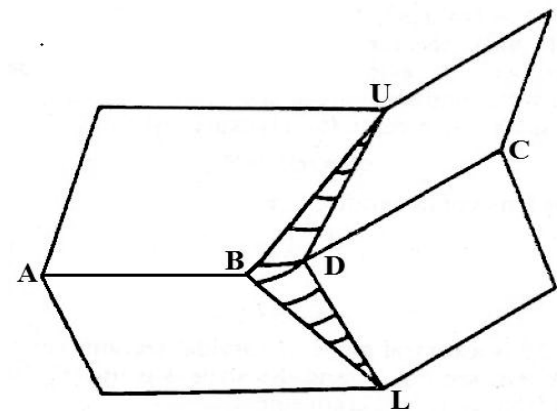
J O I = J O P < KH
3 " # A I % 1 \$% &"#

$\epsilon_1 = \frac{4N_0 b H S}{-2 \sigma_0 t g \theta} \cos D$ u
 $\sin \theta = \sin \frac{-2 \sigma_0 u l}{S}$ u (5) E
 $\cos \theta = 1 - \cos \frac{-2 \sigma_0 l}{S}$ u
 $\epsilon_2 = 2M_0 C \cdot 2M_0 C \cdot D$ (6)
 $\epsilon_3 = 2M_0 L \cdot 4M_0 \frac{H^2 - 1}{b} \frac{\cos D}{\sin J}$ (7)

$\epsilon_1 = \frac{4N_0 b H S}{-2 \sigma_0 t g \theta} \cos D$ u
 $\sin \theta = \sin \frac{-2 \sigma_0 u l}{S}$ u (5) E
 $\cos \theta = 1 - \cos \frac{-2 \sigma_0 l}{S}$ u
 b
 $\epsilon_2 = 2M_0 C \cdot 2M_0 C \cdot D$ (6)
 $\epsilon_3 = 2M_0 L \cdot 4M_0 \frac{H^2 - 1}{b} \frac{\cos D}{\sin J}$ (7)

$\epsilon_2 = 2M_0 C \cdot 2M_0 C \cdot D$ (6)
 $\epsilon_3 = 2M_0 L \cdot 4M_0 \frac{H^2 - 1}{b} \frac{\cos D}{\sin J}$ (7)

$\epsilon_2 = 2M_0 C \cdot 2M_0 C \cdot D$ (6)
 $\epsilon_3 = 2M_0 L \cdot 4M_0 \frac{H^2 - 1}{b} \frac{\cos D}{\sin J}$ (7)



$\epsilon_3 = 2M_0 L \cdot 4M_0 \frac{H^2 - 1}{b} \frac{\cos D}{\sin J}$ (7)

4

$\epsilon_{int} = \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3$ (8)
 $\epsilon_{ext} = P \cdot B \cdot 2H \sin \theta u \cdot u$ (9)

$\epsilon_{int} = \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3$ (8)
 $\epsilon_{ext} = P \cdot B \cdot 2H \sin \theta u \cdot u$ (9)

$$\frac{P}{M_0} A_1 \frac{b}{h} A_2 \frac{C}{H} A_3 \frac{H}{b} \quad (15)$$

JM

$$\frac{E_{ext}}{E_{int}} \quad (10)$$

$$A_1 \frac{8 \epsilon}{S 2l_0} \frac{Cotg L}{tg l_0} - \sin l_0 \sim \sin \frac{S 2l_0}{S} \sim E \cos l_0 \cdot 1 \cos \frac{S 2l_0}{S} \sim E \quad (16)$$

$$A_2 \frac{1}{\sin D} \frac{Cotg D}{tg l_0} \frac{2}{\sin J}$$

$$O'' M'' \quad \%C \%< \\ O''! \# \%RCD \quad P\% \$ \#\# Q\#M \\ = B\# S T \# [3] \quad \% \& \\ /'' A_3 \# A_2 \cdot A_1 U L$$

$$+ > . V\%C9 \quad 9 \\ 8 W \quad ' \quad \%< \quad \% \& \\ \$ A \# . \quad \% \& \quad XD \# \% +4 - \\ / \quad +, -$$

$$\frac{W}{W} 0, \frac{W}{W} 0 \quad 237$$

$$+\%P \quad @ T \# \# @ \# ?!'' .237 \quad \# \\ Z T ! I \# J \quad T M G > \quad Y \\ \setminus Z 9) W U \% \quad b \# H \quad V 231 \\ ! < Y \% \wedge \# _ " G \& \ ` V \# \quad \% \& \\ / M'' \quad \$ B , \quad ! I \# / \quad C'' D$$

$$b \sqrt[3]{A_2 A_3 / A_1^2} \sqrt[3]{C h^2} \\ H \sqrt[3]{A_2^2 / A_1 A_3} \sqrt[3]{C^2 h} \quad (18)$$

$$\$ \quad 231 @ V 231 Ba V J \quad 4 \\ / \quad +, -$$

$$\frac{P}{M_0} \sqrt[3]{A_1 A_2 A_3} \sqrt[3]{C/h} \quad u \quad (19)$$

$$'' \quad \% \& '' \quad \# \$ '' ! '' \\ / \quad +, - \quad \$ \quad . \quad (\quad) (\quad * \quad)$$

$$P 2H \sin D \quad E_1 \quad E_2 \quad E_3 \quad (11)$$

$$\# \# . \quad 4 231 \quad 271 \# 231 251 0 \quad \& \\ \$ \quad . \quad ; \% < = 2H \& \sin L \quad 8 9 \\ / \quad +, -$$

$$P 2M_0 \frac{H}{b} \frac{cotg D}{tg l_0} \frac{1}{\sin H} \frac{M_0}{\sin C} \frac{2N_0 b S}{J^2} \frac{cotg D}{tg D_0} \quad u \quad S \quad (12) \\ \sin \quad \sin \quad - \frac{2 \epsilon_0 u l}{S} \quad | \quad \cos \quad \cdot 1 - \cos \quad - \frac{2 \epsilon_0 u l}{S} \quad S \quad E'$$

$$> ? @ \quad A \quad B C'' D E'' \quad . 9 \$ \\ F = \quad \% \quad + \quad G \% !'' H I > J > \quad J < \\ / \quad +, - \quad \$ \quad . (\% ! <$$

$$M_0 \frac{h^2}{4} \quad h \sim \frac{h}{4} \quad N_0 \frac{h}{4} \quad N_0 \frac{4M_0}{h} \quad (13)$$

$$'' \quad \# \$ '' \quad ' '' \quad 4 \# ' K L h \\ : \quad ! '' J M \quad \% \&$$

$$P 2M_0 \frac{H}{b} \frac{Cotg D}{tg l_0} \frac{1}{\sin H} \frac{M_0}{\sin C} \frac{C}{H} J^u \quad D \quad u \\ \frac{8M_0 b S}{-2 \epsilon_0 h l} \frac{Cotg D}{tg l_0} \quad | \quad u \quad u \\ \sin \quad \sin \quad - \frac{2 \epsilon_0 u l}{S} \quad | \quad u \quad E \\ \cos \quad \cdot 1 - \cos \quad - \frac{2 \epsilon_0 u l}{S} \quad | \quad E$$

$$! \quad \$ B , \quad J \quad 231$$

...

$$L < M \quad (\wedge) \% \quad E_3 = G \quad E_2 \quad K O : \quad (15) \quad (18)$$

$$' \quad ' \quad G \quad * \quad 2 \quad P < \quad JK \quad * \quad ' \quad ; WR'' \quad ' \quad * \quad +, \quad \% \quad !'' \quad \# \quad \$$$

$$" \quad \textcircled{B} > = \quad E \quad E, @ \quad * : \quad 2 \quad 2 \quad (19) \quad . \quad / 0. \quad - \& \quad - \&$$

$$\textcircled{B} > P + ' \quad JK \quad ' \quad G \quad \& \quad U \quad " \quad P \quad ; Z \quad ; \$ < (19) \quad +, \& \quad \& \quad 7 : \quad \textcircled{B} \& 4$$

$$6 = PK \quad E_2 \quad A \quad 3 \& \quad \& \quad > \quad A \quad \textcircled{B} > ? @ \quad \$ \quad * : \quad ' \quad \& \quad > 6 = "$$

$$[= " \quad S \quad W @ \& : \# \quad \$ \quad (X) \quad ! P \quad A \quad ; * \quad +, \& \quad CD \quad * :$$

$$P \quad 2H \quad \sim \sin \quad D \& \sim \textcircled{B} \quad 8 \textcircled{B} \quad 4 \textcircled{B} \quad (21)$$

$$\& : \quad U \quad " \quad P \quad \% \quad 3 > ' \quad @ \quad K O : \quad E_3 = ? @ \quad A \quad CD \quad F \& \quad \textcircled{B} \quad E_3 = ? @$$

$$6 \mid_0 \quad 45^\circ \quad ! P \quad 2 \mid_0 \quad 90^\circ \quad E_3 = ? @ \quad A \quad CD \quad (E_1) \quad 0 + G \quad D, = \quad H @ :$$

$$. \quad ! \quad (X) \quad (\wedge) \quad (\wedge) \quad (5) : \quad E_3 \quad E_2 \quad E_1 \quad CD \quad (E_2) \quad 2 \quad I \quad JK \quad ' \quad " \quad L < M : =$$

$$\& : \quad \mid_0 \quad 45^\circ \quad \# \quad G \quad " \quad N \quad " \quad ' \quad " \quad L < M : = \quad E_3 = ? @ \quad A$$

$$U \quad " \quad P \quad G \quad " \quad * \quad \& \quad @ \quad \& \quad \textcircled{B} \quad F \& 3, \& F' \quad (E_3)$$

$$6 = " ; \$ < \quad = \quad E_3 = ? @ \quad A \quad CD \quad (E_1) \quad 0 + G \quad D, = \quad H @ : \quad E_1$$

$$\frac{P}{M_0} \quad A_1 \frac{b}{h} \quad A_2 \frac{C}{H} \quad A_3 \frac{H}{b} \quad (22)$$

64 *

$$A_1 \quad 32\sqrt{2} \cot g D \quad \sin \frac{E}{2} - \cos \frac{E}{2} \quad 1 \quad E \quad -4$$

$$A_2 \quad \frac{8}{\sin D} \quad (23)$$

$$A_3 \quad \frac{8 \cot g D}{\sin J}$$

$$P \quad Q \quad (1^\wedge) ; \quad 3 < Q \& = L \quad Z \quad > * \quad ' \quad V \quad * \quad ' : , \quad * \quad L 3'' \quad U \quad " \quad 7 \quad J'' \quad P$$

$$\& \quad * \quad 3 \quad \& 4 \quad 2 \quad (19) \quad _ \quad U \quad " \quad L \quad W \quad @ : @'' \quad P \quad \& \quad \textcircled{B} \quad U \quad " \quad ' \quad L$$

$$\& \quad A_3 \quad A_2 \quad A_1 \quad * \quad 2 \quad 4 \# \quad R @ \quad D > @ \quad 2 < 3 \& (11) \quad . \quad / 0 \quad U \quad " \quad P \quad \& \quad > \quad (X) ; , = \quad * \quad \ll \quad * : \quad \gg \quad D$$

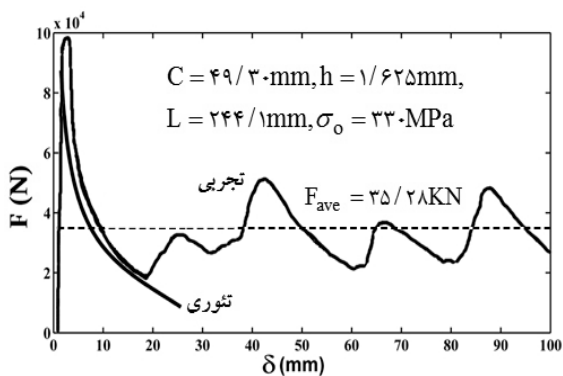
$$6 = " \quad G \quad " \quad V \& \quad Y \quad \& \quad N \quad Y ; \$ < \quad > * \quad 7 \quad " \quad 7 \quad Y \quad ' \quad L \quad 0 \quad 2 < \quad \& \quad 6 \quad * \quad ! \& \quad 3 = \quad K \quad U''$$

$$A_1 A_2 A_3 \quad \frac{2048\sqrt{2} \cot g^2 D}{\sin D \sin J} \quad \sim \sin \frac{E}{2} \quad \cos \frac{E}{2} \quad 1 \quad (24)$$

$$P \quad 2H \quad \sim \sin \quad D \& \sim \textcircled{B} \quad 4 \textcircled{B} \quad 4 \textcircled{B} \quad (20)$$

$$6 = " ? @ (3 T @$$

@ % LM 244mm J!K ?!) 5 % !;
 P C 49/30mm +/ M J! K NO h 1/625mm
 QLP % 3A1G< H !! # <# 9 %
 -! % R H L; [4] <, ; S#% R H
 9 ?!) 5 % !; 5;% E* G <P,
 U#V) !H% R P%*% # !KI
 # X !" 8# ; V W%
 R S#V) Y B@ (\$% ;
 G % G <P, %J^ P Z\
 Y H Z\ 9 % !" ^' G@ (\$%
 R P %S % S#V) R 5
 L 244mm 6 O LP% 5 % !; 9!H %
 ! I 32_1 0 C 49/30mm h 1/625mm
 V !; # !" !,
 P 3A1G< H 3c1 !")'% &'(
 R P %< H# !! '# \$% 9 R H R
 \$% \$% # R % 0 !H%
 5@ !" *%* * P
)'% &'(a # -! % a
 9* % * S b ^ *% @ !"



5

[4] !"

)' % # L # \$% &' (!"
 + !, # # * (!"
 324 0 L . # -! % , .!%
 S# L # 5 , 6 !7
 5 % !; < *# =!, 31 0
 9# % L . # 0 |_ 45^R

$$\frac{1}{\sin J} \sqrt{1 - \sin^2 D} \quad (25)$$

L # > , .!% , 31
 9# % L

$$\sin \frac{D}{2} = \frac{\sqrt{2} \sin^2 E \sin D}{2\sqrt{2} \sin^2 D} \quad (26)^D$$

$$\cos \frac{D}{2} = \frac{\sqrt{2} \sin E \sin D}{2\sqrt{2} \sin^2 D} \quad (27)^D$$

320 32B 32A6? 5% @ # *
 # # ED0 324 5%
 9# % 5 % !; !"

$$\frac{P}{M_0} = 3\sqrt{A_1 A_2 A_3} \sqrt[3]{C/h} \quad (28)$$

F

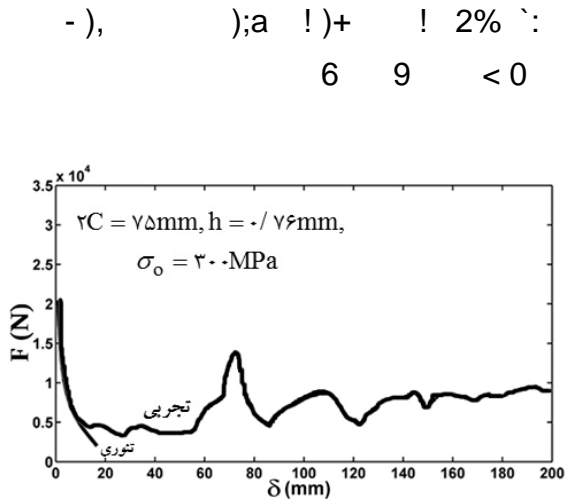
$$A_1 A_2 A_3 = \frac{2048 \sqrt{2} \cot^2 \theta \sqrt{1 - \sin^2 D}}{\sin D} \quad (29)$$

$$\sqrt{\frac{\sqrt{2} \sin^2 \theta \sin D}{2\sqrt{2} \sin^2 D}} \sqrt{\frac{\sqrt{2} \sin^2 \theta \sin D}{2\sqrt{2} \sin^2 D}} = 1$$

-5

!! 3A1G<H

!")' % &'(!"



6

[19] # \$ " !

-6

9 2, # " ;< ! < 0
)* % L ! (\$%& 9- ; ! Q
9, :,; b! (# "
;< ! 0 -),
7 8 :,)+ ' ! (# "
;< ! _ ; ! .
")* % \$%& # "
R :,; c 2 6 . 7 8 " %)+
M 2, ! 7 (- ! c 2 B@A Q
I, L ! [f] L K ! e! -I, . d Q
! % 0 d M [X] 9 / !
;< ! :,; -), .
! 0 (# "
! R 3 a (! # "
c 2 ") 0 # ")* % \$%&
6 1

\$% & ' ! (# " !
) , " %)+ # ")* %
& / ! \$ % 0 (. !-
6 # 1 2 3 4 2 5
(7 8 ! 0 9 2 / .
9 ;< 9- = 2 1 0): %
C * B@A :,; .) % > <
9 2, 9! D 9 3 4 E F . ! (,
> !! G %: > H > I 0*
J K ! 9 H L K * G (62% /"
> ! (, 9 M - . NO2" R F
6% \$, ! ' 0 Q R :,; C *
T 1 R :,; (2 9 / G ' S &
! 1 / B P > M ! < 0
Q 9 2, # " ;< !
+ !) 5 W ! zc 75mm V4 W ' G
, / (6 9 h 0 / 76mm
! I, .), 1 / B P >
U Z / 6, M [X] 9 /
9 2, # " ;< !
) , B@A (.), R S 5
. 1 2 B P > / % 0 6 -
! 0 < 0 -),
Q 9 2, < ! 1 T (\ ;
^ / 6 . 7 8 < : + > +)+
! Q 9 2, # " ;< ! _ ;
B (9 2, # ")* % _ ; L
B P > / 6 . 7 8 " %)+
Z (%)+ / ! . 9

MN , :E O L 2 + 9 2H C=K -7
 ' G Q E P
 U 2'), R ,& R S , TC : HC(+
 O) W V &N#' 67LS-DYNA EF&
 .=<8; U " + #6 2 ,
 (XY O + & , [=]
 2(CO « (12' (" - *+)4% - O
 U " + #6 2 , O) W + V &N#'
 .=<8<364
 " # D % } [=]
 ¶ , -&! /& , &O TC H (D * +
 + #6 2 , O) W + V &N#'(O
 .=<8<364 U "
 56 & 0» 9 2H C [=]
 O «) ,& Z (, , 12' ()
 > =<8=U " + #6 2 , V &N#'
 .B87B8@

[14] Santosa S., Wierzbicki T.; "Effect of Ultralight Metal Filler on the Bending Collapse Behavior of Thin-Walled Prismatic Columns", International Journal of Mechanical Sciences; Vol. 41, 1999, pp 995-1019.
 [15] Santosa S., Wierzbicki T., Hanssen A. G., Langseth M.; "Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections", International Journal of Impact Engineering; Vol. 24, 2000, pp 509-534.
 [16] Niknejad A., Liaghat G. H., Behraves H., Moslemi Naeini H.; "Theoretical investigation of the instantaneous folding force during the first fold creation in a square column", International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering; Bangkok, Thailand, 2008.
 [17] Chen W., Wierzbicki T.; "Relative Merits of Single-Cell, Multi-Cell and Foam-Filled Thin-Walled Structures in Energy

[1] Wierzbicki T., Abramowicz W.; "On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures", Journal of Applied Mechanics; Vol. 50, 1983, pp 727-734.
 [2] Hayduk R. J., Wierzbicki T.; "Extensional Collapse Modes of Structural Members", Computers and Structures; Vol. 18, 1984, pp 447-458.
 [3] Abramowicz W.; "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-Walled Metal Columns", International Journal of Impact Engineering; Vol.1, No.3, 1983, pp 309-317.
 [4] Abramowicz W., Jones N.; "Dynamic Axial Crushing of Square Tubes", International Journal of Impact Engineering; Vol. 2, No. 2, 1984, pp 179-208.
 [5] Abramowicz W., Wierzbicki T.; "Axial Crushing of Foam-Filled Columns", International Journal of Mechanical Sciences; Vol. 30, No. 3/4, 1988, pp 263-271.
 [6] Abramowicz W., Wierzbicki T.; "Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns", Journal of Applied Mechanics; Vol. 56, 1989, pp 113-120.
 [7] Liaghat G. H., Alavinia A.; "A Comment on the Axial Crush of Metallic Honeycombs by Wu and Jiang", International Journal of Impact Engineering; Vol. 28, 2003, pp 1143-1146.

. . . [8]
 (! " # \$% &
 «) * + () , -&! /& , &O 12'
 =<8=; < : 2 % 5(67 9 + & &) &3
 .B8?@ >
 . . . [9]
 1 2' ((:C + D % &/
 : "3) &3 « " - *+)4% (, - E F
 > =<8l = : 2 %<? H D &6- : G3 #F
 .=J;A;B>

[19] Reid S. R., Reddy T. Y., Gray M. D.;
“Static and Dynamic Axial Crushing of
Foam-Filled Sheet Metal Tubes”,
International Journal of Mechanical
Sciences; Vol. 28, No.5, 1986, pp 295-322.

Absorption”, Thin-Walled Structures;
Vol. 39, 2001, pp 287-306.
[18] Zhang Xiong, Cheng G., Zhang Hui;
“Theoretical Prediction and Numerical
Simulation of Multi-Cell Square Thin-
Walled Structures”, Thin-Walled
Structures; Vol. 44, 2006, pp 1185-1191.