

SDND105 – Choc d'un point matériel contre une paroi avec flambage plastique

Résumé :

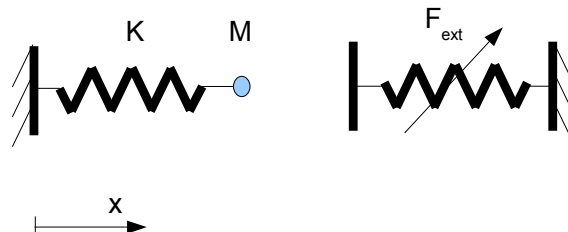
Ce test valide le comportement d'un obstacle de type choc avec flambage éventuel. La résolution a été réalisée avec l'opérateur `DYNA_VIBRA` en utilisant le mot clé `FLAMBAGE`.

On calcule l'instant de début de flambage (cet instant correspond au premier instant où la force de choc a dépassé le seuil de flambage), la déformation plastique cumulée et l'instant où l'on revient à la position initiale.

Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats analytiques.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



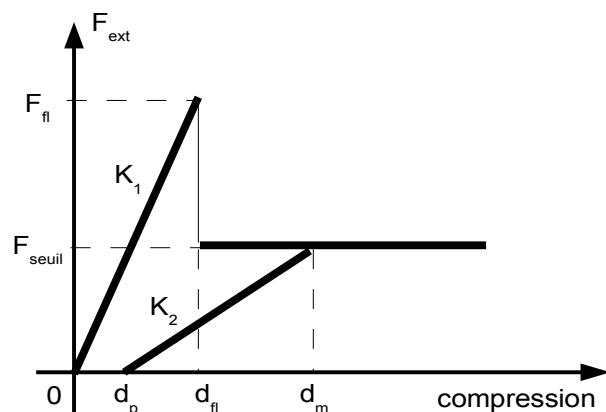
1.2 Propriétés du matériau

Pour les modélisations A et B

$$K = 10^{-7} \text{ N/m}$$

$$M = 1 \text{ kg}$$

La force de réaction F_{ext} dépend de la compression de la paroi qui suit la loi ci-dessous :



Avec :

$$K_1 = 1 \text{ N/m}$$

$$F_{fl} = 1 \text{ N}$$

$$F_{seuil} = 0.5 \text{ N}$$

$$K_2 = 0.5 \text{ N/m}$$

Pour la modélisation C

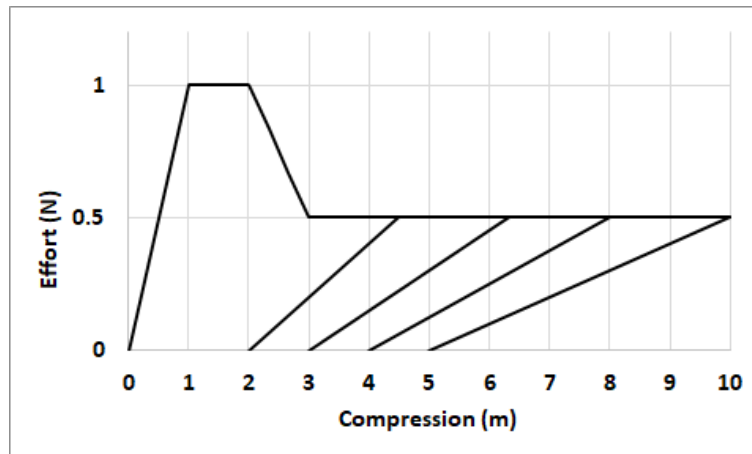
La relation force-compression est présentée dans la figure ci-dessous et dans le détail des paramètres.

Avec :

$$K_1 = 1 \text{ N/m}$$

$$F_{fl} = 1 \text{ N}$$

$$F_{seuil} = 0.5 \text{ N}$$



LARG_PLAT = 1 m
ENFO_FL = 1 m
DEPL_POST_FL = [2., 3., 4., 5.] m
RIGI_POST_FL = [0.2, 0.15, 0.125, 0.1] N/m

Pour la modélisation D

La relation force-compression correspond à celle utilisée dans la modélisation C, mais un amortissement est ajouté. Avant flambage cet amortissement vaut $AMOR_NOR$, puis il est divisé par deux pendant le flambage.

$AMOR_NOR = 10. N/m \cdot s^{-1}$
 $AMOR_NOR = 5. N/m \cdot s^{-1}$
 $DEPL_POST_FL = [5., 5., 5., 5.] N/m \cdot s^{-1}$

1.3 Conditions aux limites et chargements

On impose le déplacement de la masse mobile M suivant l'axe des x .

1.4 Conditions initiales

Pour les modélisations A et B

À l'instant initial, la masse mobile est juste en contact contre la paroi (jeu initial nul) avec une vitesse initiale égale à $2 m/s$.

La paroi n'a pas encore subi de déformation plastique (paroi non flambée).

Pour les modélisations C et D

À l'instant initial, la masse mobile est juste en contact contre la paroi (jeu initial nul) avec une vitesse initiale égale à $2.828427125 m/s$.

À l'état initial, la paroi n'a pas encore subi de déformation plastique (paroi non flambée).

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Le problème consiste à analyser la réponse d'une masse mobile soumise à une vitesse initiale non nulle et venant choquer contre une paroi qui suit une loi de comportement de type flambage.

L'équation d'équilibre du système s'écrit :

$$M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + Kx = F_{ext} \quad (1)$$

La résolution de (1) se déroule en plusieurs phases : avant flambage de la paroi, chargement après flambage, déchargement après flambage et vol libre.

2.1.1 Première phase

Avant le flambage, la force de réaction vaut : $F_{ext} = -K_1 x$

La solution de l'équation (1) se met sous la forme suivante : $x(t) = A_1 \sin \omega_1 t + B_1 \cos \omega_1 t$

Avec : $\omega_1^2 = \frac{K + K_1}{M}$

En tenant compte des conditions initiales : $x(0) = 0$ et $\frac{\partial x}{\partial t}(0) = v_0$

On identifie : $A_1 = \frac{v_0}{\omega_1}$ et $B_1 = 0$

Soit : $x(t) = \frac{v_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t$

On atteint le seuil limite de flambage F_{fl} à l'instant t_{fl} , tel que : $x(t_{fl}) = d_{fl} = \frac{F_{fl}}{K_1}$.

D'où : $t_{fl} = \frac{1}{\omega_1} \text{Arc sin} \left(\frac{F_{fl} \omega_1}{K_1 v_0} \right)$

et $\frac{\partial x}{\partial t}(t_{fl}) = v_{fl}$

2.1.2 Deuxième phase

La phase suivante est la phase de chargement après flambage ; la force de réaction est constante tant que la vitesse reste positive. Cette force de réaction vaut : $F_{ext} = -F_{seuil}$ et la solution de

l'équation (1) s'écrit : $x(t) = A_2 \sin \omega_0 t + B_2 \cos \omega_0 t - \frac{F_{seuil}}{M \omega_0^2}$

Avec : $\omega_0^2 = \frac{K}{M}$

Comme $\omega_0^2 \ll 1$, on peut effectuer un développement limité des fonctions trigonométriques.

Soit : $x(t) = A_{21} t^2 + B_{21} t + C_{21}$.

En tenant compte des conditions initiales $x(t_{fl})=d_{fl}$ et $\frac{\partial x}{\partial t}(t_{fl})=v_{fl}$, on obtient :

$$A_{21} = \left(\frac{v_{fl} t_{fl}}{2} - \frac{d_{fl}}{2} - \frac{F_{seuil}^2}{4M} \right) \omega_0^2 - \frac{F_{seuil}}{2M}$$

$$B_{21} = v_{fl} + \frac{F_{seuil} t_{fl}}{M} + \left(d_{fl} t_{fl} - \frac{v_{fl} t_{fl}^2}{2} \right) \omega_0^2$$

$$C_{21} = d_{fl} - \frac{F_{seuil} t_{fl}^2}{2M} - v_{fl} t_{fl} - \frac{d_{fl} t_{fl}^2}{2} \omega_0^2$$

L'instant auquel la vitesse s'annule est : $t_m = -\frac{B_{21}}{2A_{21}}$

En négligeant les termes en ω_0^2 , on déduit : $t_m = t_{fl} + \frac{M v_{fl}}{F_{seuil}}$,

et le déplacement maximal vaut : $x(t_m) = d_m$

Cela permet d'obtenir la déformation plastique cumulée : $d_p = d_m - \frac{F_{seuil}}{K_2}$

2.1.3 Troisième phase

Cette phase correspond au déchargement, la force de réaction vaut : $F_{ext} = -K_2(x - d_p)$

La solution de l'équation (1) s'écrit : $x(t) = A_3 \sin \omega_2 t + B_3 \cos \omega_2 t + \frac{K_2 d_p}{K + K_2}$

Avec : $\omega_2^2 = \frac{K + K_2}{M}$

En tenant en compte des conditions initiales $x(t_m) = d_m$ et $\frac{\partial x}{\partial t}(t_m) = 0$,

on obtient : $A_3 = \left(d_m - \frac{K_2 d_p}{K + K_2} \right) \sin \omega_2 t_m$ et $B_3 = \left(d_m - \frac{K_2 d_p}{K + K_2} \right) \cos \omega_2 t_m$.

La force de réaction s'annule lorsque le déplacement du point matériel atteint la valeur de la déformation plastique cumulée d_p .

Comme $K \ll K_2$, on fait l'approximation suivante : $\frac{K_2 d_p}{K + K_2} \approx d_p$.

Ainsi, l'instant t_d qui correspond à l'annulation de la force de réaction est tel que :

$$x(t_d) = d_p = A_3 \sin \omega_2 t_d + B_3 \cos \omega_2 t_d + d_p$$

Soit : $\sin \omega_2 t_m \sin \omega_2 t_d + \cos \omega_2 t_m \cos \omega_2 t_d = \cos \omega_2 (t_d - t_m) = 0$.

D'où : $t_d = t_m + \frac{\pi}{2\omega_2}$.

2.1.4 Quatrième phase

La phase suivante correspond à la phase de vol libre $F_{ext} = 0$.

La solution de l'équation (1) s'écrit : $x(t) = A_4 \sin \omega_0 t + B_4 \cos \omega_0 t$

Les conditions initiales sont :

$$x(t_d) = d_p \text{ et } \frac{\partial x}{\partial t}(t_d) = v_d = \omega_2 \left(x_m - \frac{K_2 d_p}{K + K_2} \right) \sin \omega_2 (t_m - t_d)$$

Ce qui donne :

$$A_4 = d_p \sin \omega_0 t_d + \frac{v_d}{\omega_0} \cos \omega_0 t_d$$

$$B_4 = d_p \cos \omega_0 t_d - \frac{v_d}{\omega_0} \sin \omega_0 t_d$$

Comme $\omega_0^2 \ll 1$, en effectuant un développement limité des fonctions trigonométriques jusqu'à l'ordre 2, la solution se met sous la forme suivante :

$$x(t) = A_{41} t^2 + B_{41} t + C_{41}$$

Avec :

$$A_{41} = \frac{\omega_0^2}{2} \left[v_d t_d - d_p \left(1 - \frac{\omega_0^2 t_d^2}{2} \right) \right]$$

$$B_{41} = d_p t_d \omega_0^2 + v_d \left(1 - \frac{\omega_0^2 t_d^2}{2} \right)$$

$$C_{41} = d_p \left(1 - \frac{\omega_0^2 t_d^2}{2} \right) - v_d t_d$$

En négligeant les termes en ω_0^2 , on obtient :

$$x(t) = v_d t + d_p - v_d t_d.$$

Et on déduit l'instant t_0 de passage à la position initiale ($x = 0$).

$$\text{Soit : } t_0 = t_d - \frac{d_p}{v_d}.$$

2.1.5 Solution de référence de la modélisation C

Les conditions initiales choisies permettent d'avoir une énergie cinétique de $4 J$, qui doit conduire à une compression totale de $6.5 m$ et une compression résiduelle de $3.1 m$.

2.2 Grandeurs et résultats de référence

Pour les modélisations A et B

On se propose de tester les grandeurs suivantes :

t_{fl} : instant de début de flambage ;

d_p : déformation plastique cumulée ;

t_0 : instant de repassage à la position initiale (après flambage et décharge).

Compte tenu des valeurs numériques des données d'entrée, on obtient :

$$t_{fl} = \frac{\pi}{6} \text{ (exprimé en secondes)}$$

$$d_p = 3 \text{ (exprimée en mètres)}$$

$$t_0 = \frac{\pi}{6} + 2\sqrt{3} + \frac{\pi+6}{\sqrt{2}} \text{ (exprimé en secondes)}$$

Pour la modélisation C

Compression maximale $\max(d) = 6.5$ (exprimée en mètres)

Compression résiduelle $d_p = 3.1$ (exprimée en mètres)

Vitesse de rebond après le choc $V_{rebond} = -1.303840481$ (exprimée en mètres par seconde)

Pour la modélisation D

La non régression est testée sans valeur de référence analytique.

2.3 Incertitudes sur la solution

La solution de référence est analytique (au second ordre près).

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

On modélise le système avec un point matériel et un obstacle de type `PLAN_Y`.

On évalue les grandeurs obtenues suite au flambage dû au choc en utilisant le mot clé `FLAMBAGE` de l'opérateur `DYNA_VIBRA`.

On vérifie également les différentes méthodes de résolution (`EULER`, `ADAPT_ORDRE2` et `DEVOGE`). Avec le schéma en temps adaptatif `ADAPT_ORDRE2` on définit (en secondes) :

- le pas de temps initial : `PAS` = 0.0002,
- la valeur maximale du pas de temps : `PAS_MAXI` = 0.001,
- la valeur minimale du pas de temps : `PAS_MINI` = 2.E-8.

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 2

Nombre de maille : 1 `SEG2`

3.3 Grandeurs testées et résultats

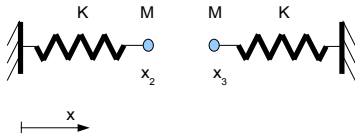
On teste les valeurs des grandeurs liées au flambage de la paroi.

Identification	Référence	Type de référence	Précision
t_f	$\frac{\pi}{6} s$	'ANALYTIQUE'	0.1 %
d_p	3 m	'ANALYTIQUE'	0.1 %
$x(t_0) = x\left(\frac{\pi}{6} + 2\sqrt{3} + \frac{\pi+6}{\sqrt{2}}\right)$	0 m	'ANALYTIQUE'	3.E-3 m

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Pour cette modélisation, on considère deux points matériels mobiles selon le schéma suivant :



Le système est parfaitement symétrique. On obtient la même formulation que la modélisation A si on choisit des rigidités normales de choc égales à la moitié des rigidités choisies pour la modélisation A.

En effet, si on note : $x_2 = -x_3 = x$

La force de réaction F_{ext} se met sous la forme suivante :

Pendant la première phase : $F_{ext} = -K_1(x_2 - x_3) = -2K_1x$

Pendant la deuxième phase : $F_{ext} = -F_{seuil}$

Pendant la troisième phase : $F_{ext} = -K_2(x_2 - x_3 - 2d_p) = -2K_2(x - d_p)$

Pendant la quatrième phase : $F_{ext} = 0$

On modélise le problème avec un obstacle de type BI_PLAN_Y.

À l'instant initial, les deux points matériels sont en contact avec une vitesse initiale égale à 2 m/s .

On évalue les grandeurs obtenues suite au flambage dû au choc en utilisant le mot clé FLAMBAGE de l'opérateur DYNA_VIBRA, avec les schémas en temps EULER et ADAPT_ORDRE2.

Avec le schéma en temps adaptatif ADAPT_ORDRE2, on définit (en secondes) :

- le pas de temps initial : PAS = 0.001,
- la valeur maximale du pas de temps : PAS_MAXI = 0.005.

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles : 2 SEG2

4.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs des grandeurs liées au comportement de flambage pendant le choc.

Identification	Référence	Type de référence	Précision
t_{fl}	$\frac{\pi}{6}\text{ s}$	'ANALYTIQUE'	0.01 %
d_p	3 m	'ANALYTIQUE'	0.01 %
$x(t_0) = x\left(\frac{\pi}{6} + 2\sqrt{3} + \frac{\pi+6}{\sqrt{2}}\right)$	0 m	'ANALYTIQUE'	1.E-4 m

5 Modélisations C et D

5.1 Caractéristiques des modélisations

Dans ces modélisations on réutilise la modélisation A pour tester une forme plus complexe de la loi de flambage. La modélisation C est sans amortissement de choc, alors que pour la modélisation D un amortissement est ajouté.

On modélise le système avec un point matériel et un obstacle de type `PLAN_Y`.

On évalue les grandeurs obtenues suite au flambage dû au choc en utilisant le mot clé `FLAMBAGE` de l'opérateur `DYNA_VIBRA`.

On vérifie également les différentes méthodes de résolution (`EULER`, `ADAPT_ORDRE2` et `DEVOGE`). Avec le schéma en temps adaptatif `ADAPT_ORDRE2` on définit (en secondes) :

- le pas de temps initial : `PAS = 0.0002`,
- la valeur maximale du pas de temps : `PAS_MAXI = 0.001`,
- la valeur minimale du pas de temps : `PAS_MINI = 2.E-8`.

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 2

Nombre de maille : 1 `SEG2`

5.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs des grandeurs liées au flambage de la paroi.

Modélisation C :

Identification	Référence	Type de référence	Précision
$\max(d)$	6.5 m	'ANALYTIQUE'	0.01 %
d_p	3.1 m	'ANALYTIQUE'	0.01 %
V_{rebond}	-1.303840481 m/s	'ANALYTIQUE'	0.01 %

Modélisation D :

Identification	Précision
d_p	Non régression
V_{rebond}	Non régression

6 Synthèse des résultats

Les écarts entre les solutions obtenues avec Aster et les solutions analytiques sont très faibles.