SSLP105 - Excavation d'un tunnel circulaire dans un massif élastique linéaire

Résumé :

Ce test constitue un exemple de mise en œuvre d'une méthodologie globale pour la simulation bidimensionnelle du creusement et du soutènement d'une galerie circulaire dans un massif souterrain avec *Code_Aster*.

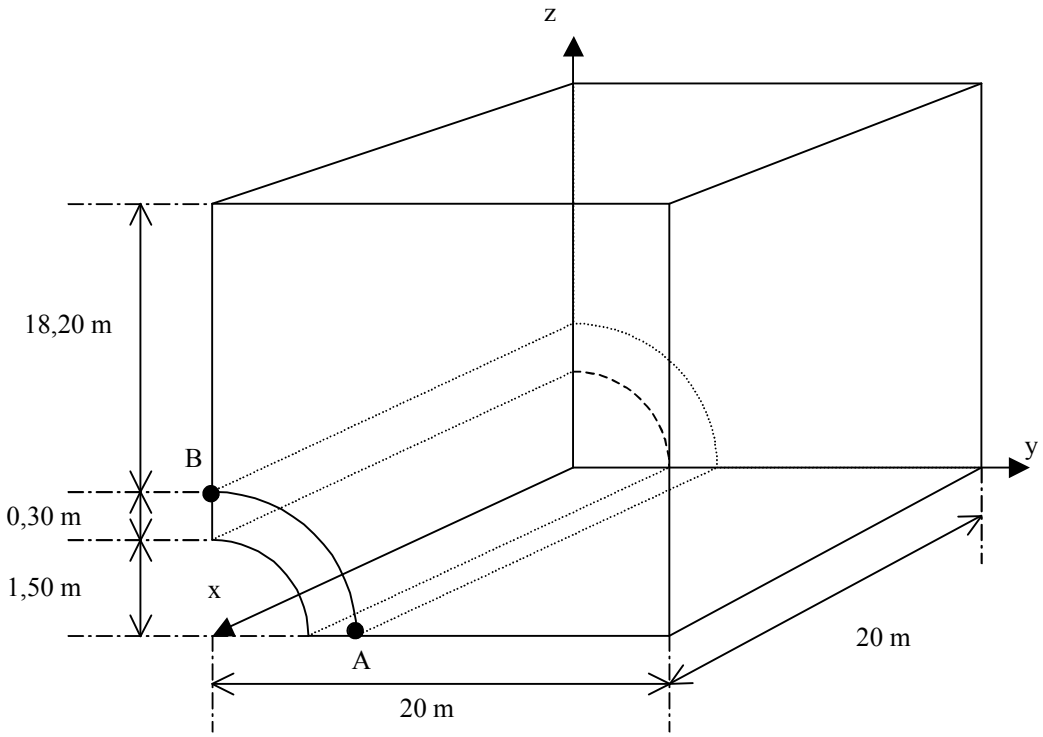
Pour valider la démarche sur la base d'une solution analytique simple, on est amené à faire des hypothèses restrictives sur la géométrie du problème, le comportement des matériaux (élastique linéaire) et le champ de contrainte initial (isotrope). La solution de référence est donnée par la méthode dite « convergence-confinement », classique pour ce type de modélisation 2D. Pour plus de détail sur les méthodologies employées on se référera à la documentation [U2.04.06].

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Il s'agit d'un tunnel de section circulaire, revêtu par un anneau de béton, que l'on excave dans un massif de sol. Les deux matériaux sont supposés élastiques linéaires.



1.2 Propriétés du matériau

Les matériaux sont élastiques linéaires.

1.2.1 Sol

$E_s = 4\,GPa$
$\nu_s = 0,3$

1.2.2 Béton

$E_b = 20\,GPa$
$\nu_b = 0,2$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.3 Conditions initiales, conditions aux limites et chargements

Les contraintes dans le massif sont supposées initialement isotropes $(\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=\sigma_0)$. La méthode utilisée pour simuler l'excavation et la pose du soutènement est la méthode dite « convergence-confinement » présentée par exemple dans [bib1] et [bib2].

Le principe de base repose sur une diminution des réactions nodales engendrées au bord de la future galerie par l'état de contraintes initial. Cette opération est désignée par l'appellation « déconfinement ». Lorsque le déconfinement a atteint la valeur qui correspond aux conditions de chantier que l'on souhaite modéliser, on procède à la simulation de la pose du soutènement en béton au bord de la galerie.

Les conditions aux limites et le chargement sont résumés dans le tableau suivant. Les phases correspondent à celles du schéma ci-dessus, les bords sont composés avec les nœuds identifiés sur le schéma du paragraphe [§3.1] et entre parenthèses le nom des groupes de maille ou de nœud du fichier .comm).

Bords	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
N0N1 (no_bas1)	$DY=0$	$DY=0$	-	-
N1N2 (bas_bet)	$DY=0$	$DY=0$	-	$DY=0$
N2N3 (no_bas2)	$DY=0$	$DY=0$	$DY=0$	$DY=0$
N3N4 (no_droit)	$DX=0$	$DX=0$	$DX=0$	$DX=0$
N4N5 (ma_haut)	$\sigma_{yy}=-5\,MPa$	$\sigma_{yy}=-5\,MPa$	$\sigma_{yy}=-5\,MPa$	$\sigma_{yy}=-5\,MPa$
N5N6 (no_left2)	$DX=0$	$DX=0$	$DX=0$	$DX=0$
N6N7 (no_left_bet)	$DX=0$	$DX=0$	-	$DX=0$
N7N0 (no_left1)	$DX=0$	$DX=0$	-	-
N6N2 (bord)	-	-	Réactions nodales correspondant au déconfinement	-
N7N1	-	-	-	Libre

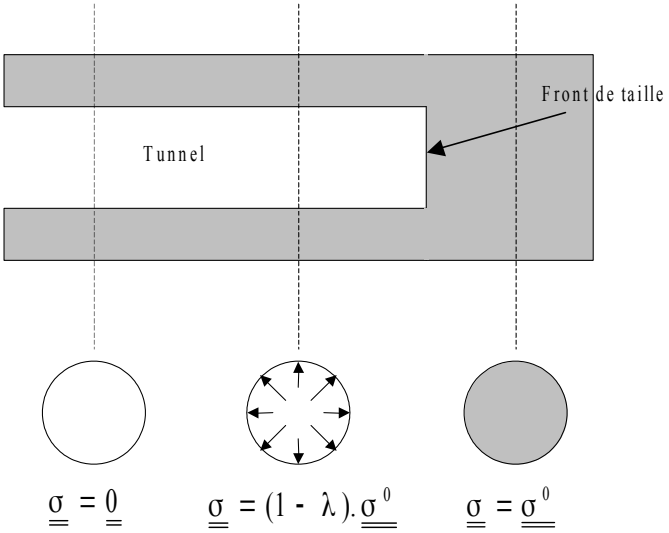
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

2.1.1 Comportement du massif

Soit λ le taux de déconfinement, qui représente la position relative de la section de tunnel considérée par rapport au front de taille. Dans la méthode « convergence - confinement », on remplace le futur terrain excavé par un tenseur des contrainte équivalent, dont on fait baisser l'intensité via λ pour simuler le creusement et l'éloignement du front de taille.



La solution du problème est donc similaire à celle du tube infiniment épais chargé par une pression interne d'intensité $(1-\lambda)\sigma_0$ et par une pression externe d'intensité σ_0 (voir [bib3] pour le détail des calculs).

Les contraintes radiale, orthoradiale ainsi que le déplacement radial à la paroi du tunnel en milieu élastique soumis à un taux de déconfinement λ sont les suivantes

$$\begin{cases} \sigma_R = \left(1 - \dfrac{\lambda \cdot R^2}{r^2}\right)\sigma^0 \\ \sigma_\theta = \left(1 + \dfrac{\lambda \cdot R^2}{r^2}\right)\sigma^0 \\ U_R = \lambda \dfrac{R^2}{r} \cdot \dfrac{\sigma^0}{2G} \end{cases}$$

G est le module de cisaillement donné par la relation suivante : $G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.1.2 Comportement du soutènement

Le soutènement va s'opposer au mouvement de convergence naturel du tunnel et ainsi appliquer un confinement artificiel à la roche.

Soit K_s la raideur du soutènement, elle est donnée par la relation suivante si on considère que le soutènement est assimilable à un tube mince (ν_b est le coefficient de Poisson du béton) :

$$K_s = \frac{E_b \cdot e}{(1-\nu_b^2)\cdot R}$$

Si $k_s = \frac{K_s}{2\cdot G}$ représente la rigidité relative du béton par rapport au massif et λ_d le taux de déconfinement à la mise en place du soutènement, alors les contraintes radiales et orthoradiales ainsi que le déplacement radial en paroi sont donnés par [bib1] :

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{k_s}{1+k_s}\left(1-\lambda_d\right)\sigma_0 \\ \sigma_\theta = \frac{k_s}{1+k_s}\left(1+\lambda_d\right)\sigma_0 \\ U_R = \frac{1+\lambda_d \cdot k_s}{1+k_s}\cdot\frac{\sigma_0}{2G}\cdot R \end{cases}$$

2.2 Grandeurs et résultats de référence

On teste les grandeurs suivantes au niveau de la paroi aux points A et B de la figure du paragraphe 1.1, à l'instant où le déconfinement est total :

1) contrainte radiale : σ_{yy} en A ou σ_{zz} en B ;
2) contrainte orthoradiale : σ_{zz} en A ou σ_{yy} en B ;
3) déplacement radial : u_y en A ou u_z en B .

2.3 Incertitudes sur la solution

Aucune. Résultat analytique exact.

2.4 Références bibliographiques

[1] Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, M. Panet, Presses de l'ENPC 1995

[2] Comment simuler le creusement d'un tunnel avec *Code_Aster* ? Principe de la méthode, mise en oeuvre et validation, A. Courtois, R. Saidani, P. Sémété, note EDF HT-25/02/045/A - 2002

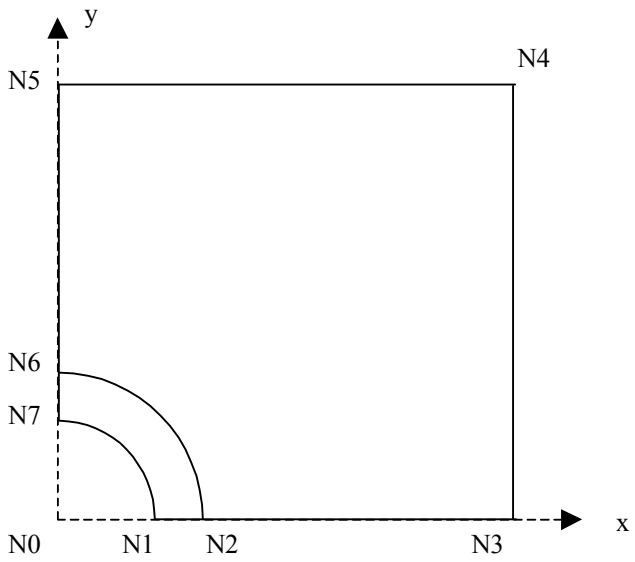
[3] Mécanique des milieux continus, tome 2, J. Salençon, Ed. Ellipses - 1988

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D en déformations planes. Cette modélisation correspond à la méthodologie 3 de la documentation [U2.04.06] : excavation avec soutènement avec initialisation des contraintes par appel à CREA_CHAMP et déconfinement suivant une méthode d'enchainement de modèles.



3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8477
Nombre de mailles : 3304 de type QUAD8

3.3 Déroulement du calcul

L'objectif de ce cas test est de tester une méthode. Le tableau suivant présente les principales étapes qui structurent le fichier de commandes.

Commandes	Commentaires
CREA_CHAMP	Initialisation des contraintes géostatiques (ici isotrope $5\,MPa$ en compression)
STAT_NON_LINE	Blocage des nœuds de la galerie pour calcul des réactions nodales à injecter pour simuler le déconfinement
CREA_CHAMP	Récupération des réactions nodales
STAT_NON_LINE	Ré-injection des réactions nodales
STAT_NON_LINE	Calcul intermédiaire pour passer d'un modèle sans maille représentant les voussoirs béton à un modèle avec mailles les représentant (voir [bib2])
STAT_NON_LINE	Déconfinement progressif du massif

3.4 Grandeurs testées et résultats

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Après la pose du revêtement (instant final), on teste les composantes σ_{xx} et σ_{yy} aux nœuds $N2$ et $N6$ ainsi que le déplacement radial en ces points (DX pour $N2$, DY pour $N6$).

	Référence	*Aster*	Différence (%)
Nœud $N2$			
σ_{xx}	-1,52821.10^{6}	-1,53154.10^{6}	0,218
σ_{yy}	-8,47179.10^{6}	-8.52772.10^{6}	0,660
DX	-1,6925.10^{-3}	-1,6684.10^{-3}	-1,422
Nœud $N6$			
σ_{xx}	-8,47179.10^{6}	-8,41147.10^{6}	-0,712
σ_{yy}	-1,52821.10^{6}	-1,52943.10^{6}	0,080
DY	-1,6925.10^{-3}	-1.7184.10^{-3}	1,529

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D en déformations planes. Cette modélisation correspond à la méthodologie 2 de la documentation U2.04.06 : excavation avec soutènement avec initialisation des contraintes par appel à CREA_CHAMP et déconfinement utilisant un seul modèle et un matériaux « souple » pour la zone excavée.

Le maillage est le même que pour la modélisation A.

4.2 Déroulement du calcul

L'objectif de ce cas test est de tester une méthode. Le tableau suivant présente les principales étapes qui structurent le fichier de commandes.

Commandes	Commentaires
CREA_CHAMP	Initialisation des contraintes géostatiques (ici isotrope $5\,MPa$ en compression)
STAT_NON_LINE	Blocage des nœuds de la galerie pour calcul des réactions nodales à injecter pour simuler le déconfinement
CREA_CHAMP	Récupération des réactions nodales
STAT_NON_LINE	Ré-injection des réactions nodales
STAT_NON_LINE	Déconfinement progressif du massif

4.3 Grandeurs testées et résultats

Après la pose du revêtement (instant final), on teste les composantes σ_{xx} et σ_{yy} aux nœuds $N2$ et $N6$ ainsi que le déplacement radial en ces points (DX pour $N2$, DY pour $N6$).

	Référence	*Aster*	Différence (%)
Nœud $N2$			
σ_{xx}	-1,52821.10^{6}	-1,53619.10^{6}	0,52
σ_{yy}	-8,47179.10^{6}	-8.53167.10^{6}	0,71
DX	-1,6925.10^{-3}	-1,6687.10^{-3}	-1,41
Nœud $N6$			
σ_{xx}	-8,47179.10^{6}	-8,41158.10^{6}	-0,71
σ_{yy}	-1,52821.10^{6}	-1,52967.10^{6}	0,1
DY	-1,6925.10^{-3}	-1.7180.10^{-3}	1,51

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D en déformations planes. Cette modélisation correspond au cas 1 de la documentation [U2.04.06] : excavation sans soutènement avec initialisation des contraintes par appel à CREA_CHAMP et déconfinement utilisant un seul modèle et un matériau « souple » pour la zone excavée. Cette modélisation donnera donc des résultats différents puisqu'il n'y a pas de soutènements. La solution analytique est ici fournie par l'équation (1).

Le maillage est le même que pour la modélisation A.

5.2 Déroulement du calcul

L'objectif de ce cas test est de tester une méthode. Le tableau suivant présente les principales étapes qui structurent le fichier de commandes.

Commandes	Commentaires
STAT_NON_LINE	Initialisation des contraintes géostatiques
CREA_CHAMP	Récupération des contraintes initialisée
STAT_NON_LINE	Blocage des nœuds de la galerie pour calcul des réactions nodales à injecter pour simuler le déconfinement
CREA_CHAMP	Récupération des réactions nodales
STAT_NON_LINE	Ré-injection des réactions nodales

5.3 Grandeurs testées et résultats

Après la pose du revêtement (instant final), on teste les composantes σ_{xx} et σ_{yy} aux nœuds $N2$ et $N6$ ainsi que le déplacement radial en ces points (DX pour $N2$, DY pour $N6$).

	Référence	*Aster*	Différence (%)
Nœud $N2$			
σ_{yy}	-10.10^{6}	-1,013.10^{6}	1,13
DX	-2,4000.10^{-3}	-2,4375.10^{-3}	1,54
Nœud $N6$			
σ_{xx}	-10.10^{6}	-9,89.10^{6}	1,13
DY	-2,478.10^{-3}	-2,4375.10^{-3}	1,66

6 Synthèse des résultats

Les valeurs obtenues avec *Code_Aster* sont en accord avec les valeurs de la solution analytique de référence.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)