

SSNP143 – Validation du clavage pour la loi de joint de plot des barrages

Résumé :

Le clavage se présente comme une injection du béton sous pression entre les plots d'un barrage. C'est une étape intermédiaire de la construction d'un barrage-voûte, il sert à renforcer son étanchéité après la phase de construction de plots verticaux. Ce test permet de valider la procédure de clavage entre les deux plots réguliers encastrés au sol et soumis à la force gravitationnelle. La procédure est définie via un mot-clef `PRES_CLAVAGE` dans `DEFI_MATERIAU` pour la matériau `JOINT_MECA_RUPT`. La loi porte le même nom. On teste le comportement des joints bidimensionnels et tridimensionnels, correspondants aux modélisations : `PLAN_JOINT` et `3D_JOINT`.

Modélisation A : Clavage 2D entre deux rectangles

Modélisation B : Clavage 3D entre deux cubes

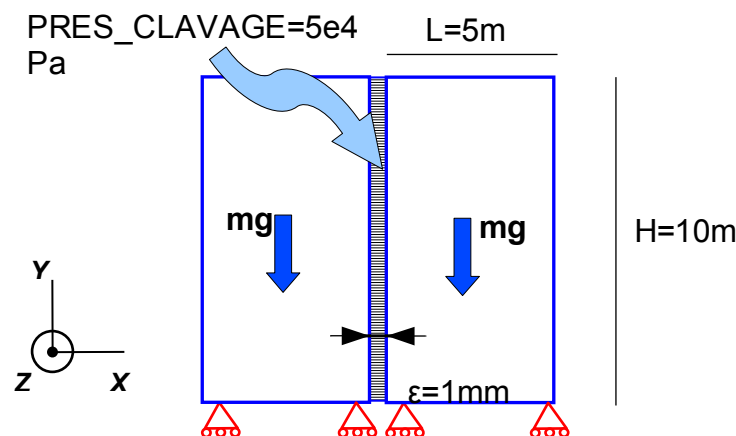
On compare le profil d'épaisseur des joints après le clavage avec les résultats fournis par un autre code de calcul (`SOURCE_EXTERNE` `GEFDYN`), utilisé par le Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH). Par ailleurs on fait des tests de `NON_REGRESSION` des valeurs de l'épaisseur du joint, ainsi que des efforts normaux correspondants.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie et chargement

On considère deux plots de barrage, représentés par des cubes réguliers de longueur $L=5\text{m}$, hauteur $H=10\text{m}$ et profondeur $P=1\text{m}$. La distance entre les plots est supposée non nulle pour simplifier la génération du maillage des joints ($\varepsilon=1\text{mm}$). Les parties inférieures des plots sont encastrées. Les plots sont soumis à leurs poids gravitationnels. Le chargement se déroule en deux étapes :

- Les plots s'équilibrent sous le chargement gravitationnel. Le joint s'ouvre dans la partie supérieure à cause de la compression des parties inférieures de plots.
- La procédure de clavage est activée : « le béton est injecté » entre les plots à $\text{PRES_CLAVAGE}=510^4\text{Pa}$. Le profil de l'épaisseur de joint est alors modifié de sorte à obtenir la pression de clavage sur les lèvres de la fissure. C'est ce profil qui est stocké ensuite par une des variables internes pour « mémoriser » la quantité de béton injecté.



Dessin 1: Schéma des plots de barrage, conditions aux limites et chargement

2 Solution de référence

Nous prenons comme référence la solution donnée par le code de calcul *GEFDYN*, utilisé par le centre d'ingénierie hydraulique (CIH). Cette procédure a été validée sur de nombreux ouvrages industriels. L'ouverture du joint après le clavage est testée.

3 Paramètres du matériau

Les valeurs des paramètres mécaniques des plots (module de Young, coefficient de Poisson, densité volumique) sont choisies de la façon suivante :

$$E = 3.10^2 Pa \quad \nu = 0,25 \quad \rho_b = 2400 kg/m^3$$

Pour le joint, on prend la raideur normale égale à la raideur tangentielle. Il n'y a pas de résistance à la traction. Le couplage entre l'ouverture normale et la raideur tangentielle est choisi de sorte à avoir la pente tangentielle nulle dès que le joint atteint le seuil d'endommagement normal complet. La pente d'adoucissement en rupture est cinq fois plus raide que la pente de chargement normale (voir document R7.01.25). On clave après le chargement mécanique gravitationnel à une pression de clavage non nulle :

$$K_N = K_T = 10^{12} Pa/m \quad \sigma_{max} = 0 Pa$$
$$\alpha = 1 \quad \text{pena_rupt} = 0.2 \quad \text{pres_clav} = 4.10^4 Pa$$

(NB : valeurs « tests » fournis par le CIH qui ne correspondent à aucun matériau en particulier)

4 Modélisation A

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation `PLAN_JOINT`. Les éléments sont de type `TRIA3` pour les plots et `QUAD4` pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est `JOINT_MECA_RUPT`, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.

4.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage linéaire de deux plots et de la fissure.

Éléments volumiques (plots) : 548 `TRIA3`

Éléments de joint : 20 `QUAD4`

4.3 Grandeurs testées et résultats

4.3.1 Comparaison source externe

Le premier test est effectué sur les valeurs de profil de l'épaisseur de joint après le clavage en le comparant avec les résultats de `GEFDYN`. On note δ_n (V7) l'ouverture normale de joint après le clavage :

Grandeur testée	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
δ_n à la hauteur : 2 m	6.0216D-07	6.38D-7	5.6 %
δ_n à la hauteur : 5 m	2.0034D-06	2.14D-6	6.4%
δ_n à la hauteur : 8 m	3.623D-06	3.88D-6	6.6%

4.3.2 Tests de non régression

Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n (V7), ainsi que les contraintes normales σ_n sont testées à différentes hauteurs.

Grandeur testée	Code_Aster
δ_n à la hauteur : 2 m	6.02163D-07
δ_n à la hauteur : 4.5 m	1.74369D-06
δ_n à la hauteur : 8.5 m	3.89115D-06
σ_n à la hauteur : 2 m	-4.99999D+04
σ_n à la hauteur : 4.5 m	-4.99997D+04
σ_n à la hauteur : 8.5 m	-4.99992D+04

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation

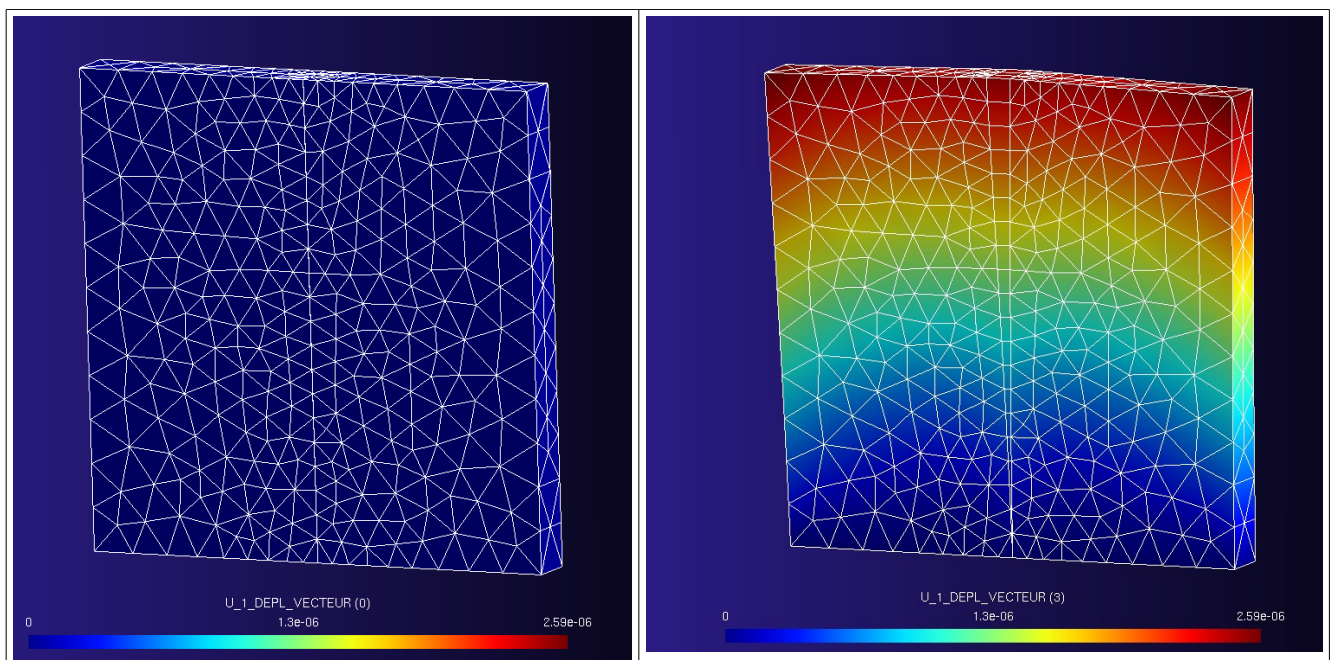
La simulation est effectuée avec la modélisation 3D_JOINT. Les éléments sont de type TETRA4 pour les plots et PENTA6 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments volumiques sont élastiques.

5.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage non structuré linéaire par extrusion du maillage 2D (figure ci-dessous).

Éléments volumiques (plots) : 2761 TETRA4

Éléments joint : 92 PENTA6



Dessin 2: Maillage 3D, à gauche l'état initial, à droite l'état après le clavage

5.3 Grandeurs testées et résultats

5.3.1 Comparaison source externe

Le premier test est effectué sur les valeurs de profil de l'épaisseur de joint après le clavage en le comparant avec les résultats de GEFDYN. Les maillages de GEFDYN et de Code_Aster ne sont pas les mêmes ce qui explique la précision de comparaison assez élevée. On note δ_n (V7) l'ouverture normale de joint après le clavage :

Grandeur testée	Code_Aster	GEFDYN	erreur relative
δ_n à la hauteur : 2 m	6.1702D-07	6.38D-7	3.3%
δ_n à la hauteur : 5 m	2.0520D-06	2.14D-6	4.1%
δ_n à la hauteur : 8 m	3.7610D-06	3.88D-6	3.1%

5.3.2 Tests de non régression

Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n (V7), ainsi que les contraintes normales σ_n sont testées à différentes hauteurs.

Grandeur testée	Code_Aster
δ_n à la hauteur : 2 m	6.17022D-07
δ_n à la hauteur : 4.5 m	1.80120D-06
δ_n à la hauteur : 8.5 m	4.03898D-06
σ_n à la hauteur : 2 m	-4.99999D+04
σ_n à la hauteur : 4.5 m	-4.99997D+04
σ_n à la hauteur : 8.5 m	-4.99993D+04

6 Synthèse des résultats

La procédure de clavage implémentée dans *Code_Aster* via la loi `JOINT_MECA_RUPT` et le mot clé `PRES_CLAVAGE` coïncide avec les résultats du code *GEFDYN*.

Le clavage nécessite généralement un nombre d'itérations de Newton assez important, mais comme celui-ci n'est réalisé qu'une seule fois cela ne pose pas de problème pour son utilisation dans un contexte industriel.