

Considérations sur l'interaction sol-structure dans le domaine des tranchées couvertes

Sylvain Plumey, Aurelio Muttoni, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Introduction

Pour la plupart des structures du génie civil, le comportement du sol et le comportement de la structure peuvent être investigués de manière dissociée, ce qui en facilite grandement l'analyse, tout en permettant généralement d'atteindre les buts visés. Dans certains cas cependant, l'interaction sol-structure est beaucoup plus importante et peut influencer de manière significative la conception et le dimensionnement de la structure. Une bonne maîtrise du comportement combiné de la structure et du sol améliore alors sensiblement la conception de la structure. Une mauvaise interprétation de cette interaction peut par contre mener à des solutions structurales inadaptées. Les tranchées couvertes ou tunnels exécutés à ciel ouvert entrent dans cette catégorie.

L'objectif de cette communication est de mettre en évidence l'existence de différents régimes de comportement pour ce type d'ouvrages et de discuter leurs effets sur la conception de la structure.

Dans le cas des tranchées couvertes, le sol et la structure participent simultanément à la reprise des charges appliquées et forment du point de vue structural un système hyperstatique. A la ruine, la contribution du sol se traduit habituellement par la création d'arcs de décharge qui soulagent la structure. La figure 1 présente les mécanismes de rupture principaux envisageables pour les tranchées couvertes de type cadre et voûte ainsi que les arcs de décharge associés.

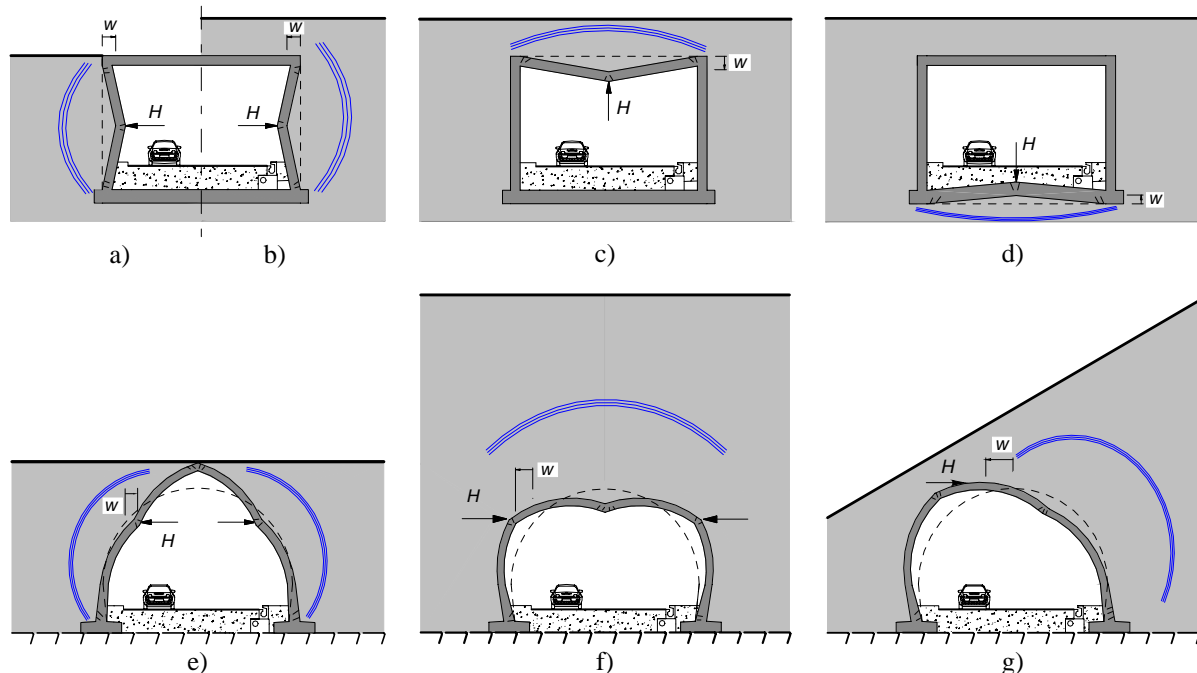


Figure 1 : Mécanismes de rupture principaux pour les tranchées couvertes de type cadre et voûte avec les arcs de décharges (en bleu), le déplacement caractéristique w et la poussée généralisée H associés.

Approche adoptée

La démarche choisie pour déterminer la contribution relative du sol et de la structure consiste à évaluer leur comportement séparément, de manière similaire à la méthode convergence-confinement développée dès les années 1970 pour le prédimensionnement des soutènements des tunnels excavés [1-3].

Les mécanismes de rupture de la figure 1 peuvent être décrits par un déplacement caractéristique w et par des forces H , appelées poussées généralisées, qui résument en une valeur unique la résistance de la structure selon le mode de rupture admis.

Le comportement du sol est d'abord étudié en remplaçant la structure par une structure auxiliaire instable correspondant au mécanisme admis mais stabilisée par la poussée généralisée H . A l'aide d'un logiciel adapté (par exemple Z-soil, [4]), il est alors possible de déterminer la courbe caractéristique du sol qui décrit la relation entre la poussée généralisée H et le déplacement caractéristique w .

Le comportement de la structure est ensuite évalué en appliquant progressivement la poussée généralisée à la structure. On obtient ainsi la courbe caractéristique de la structure qui exprime sa réponse sous l'action du sol, représentée par la poussée généralisée.

La position d'équilibre du système complet peut finalement être déterminée graphiquement sur la base d'un critère de compatibilité cinématique. L'équilibre du système correspond au point d'intersection entre les courbes caractéristiques du sol et de la structure.

Cette approche est utilisée ci-dessous pour étudier deux exemples représentatifs des régimes de comportement rencontrés en pratique.

Exemple 1 : paroi latérale d'un cadre (stade de construction)

On considère tout d'abord le cas d'une tranchée couverte de type cadre en stade de construction alors que le remblai atteint le sommet des parois latérales. La situation, le mécanisme de rupture et les valeurs caractéristiques sont représentés à la figure 1a.

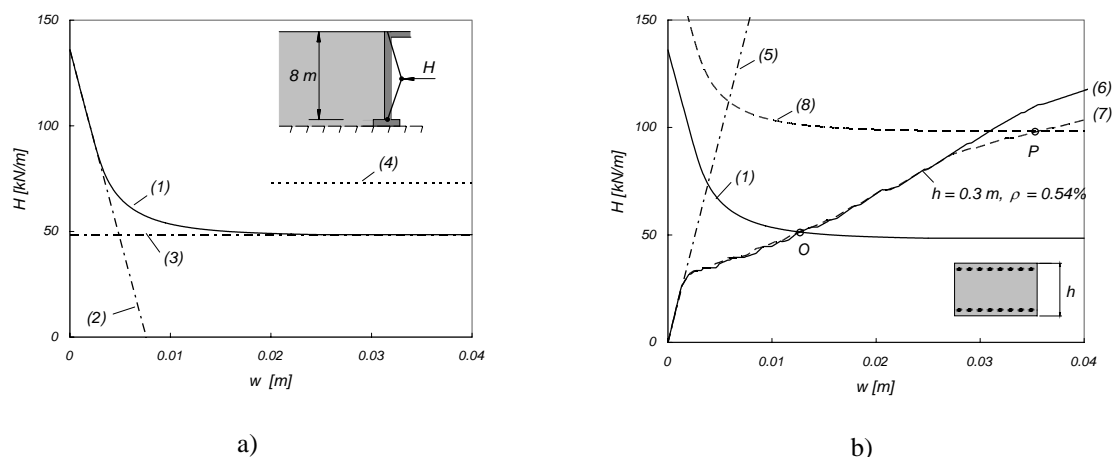


Figure 2 : Courbes caractéristiques a) du sol et b) de la structure

La figure 2a montre la courbe caractéristique du sol (1) calculée selon l'approche décrite ci-dessus. Cette courbe comporte deux phases distinctes correspondant respectivement aux régimes élastique (2) et plastique du sol (3), modélisé par un critère de rupture de type Mohr-Coulomb. A noter que le plateau plastique correspond à une poussée généralisée plus faible que celle obtenue sous l'hypothèse d'une répartition linéaire des poussées actives calculées selon Rankine (4) et souvent admise aujourd'hui [5-6]. Cet effet traduit la création d'arcs de décharge dans le sol qui soulagent la structure (voir figure 1a).

La figure 2b présente la courbe caractéristique de la paroi (6), calculée en considérant la fissuration du béton et la plastification de l'armature, ainsi que la position d'équilibre du système à l'état limite de service (O). La même démarche peut être appliquée avec des propriétés de dimensionnement pour la structure (7) et pour le sol (8). On obtient ainsi la position d'équilibre à l'état limite ultime (P).

On constate que pour un tel cas le régime plastique du sol est activé pour de très petites déformations compatibles avec la structure. Il est donc possible de dimensionner la structure par une analyse classique en considérant le sol comme une charge appliquée. La valeur de cette charge, indépendante

du comportement de la structure, est définie par le plateau plastique. Le dimensionnement de la paroi se fait par le choix de l'épaisseur et du taux d'armature nécessaires pour remplir les exigences d'aptitude au service et de sécurité structurale.

Exemple 2 : voûte sous chargement symétrique (stade définitif)

On considère maintenant le cas d'une voûte supportant une couverture de terre importante. La situation, le mécanisme de rupture et les valeurs caractéristiques sont représentés à la figure 1f.

La courbe caractéristique du sol donnée à la figure 3a (1) montre que dans un tel cas la phase quasi-élastique (2) est beaucoup plus importante que dans la situation précédente. Des déplacements considérables sont en effet nécessaires pour activer toute la résistance offerte par le sol (3). La figure 3b présente la courbe caractéristique d'une structure (4) avec ses différentes phases de comportement (A : fissuration, B, C et D : formation des rotules plastiques selon la figure 3c). L'équilibre est atteint dans ce cas alors que le sol est encore en stade élastique (O).

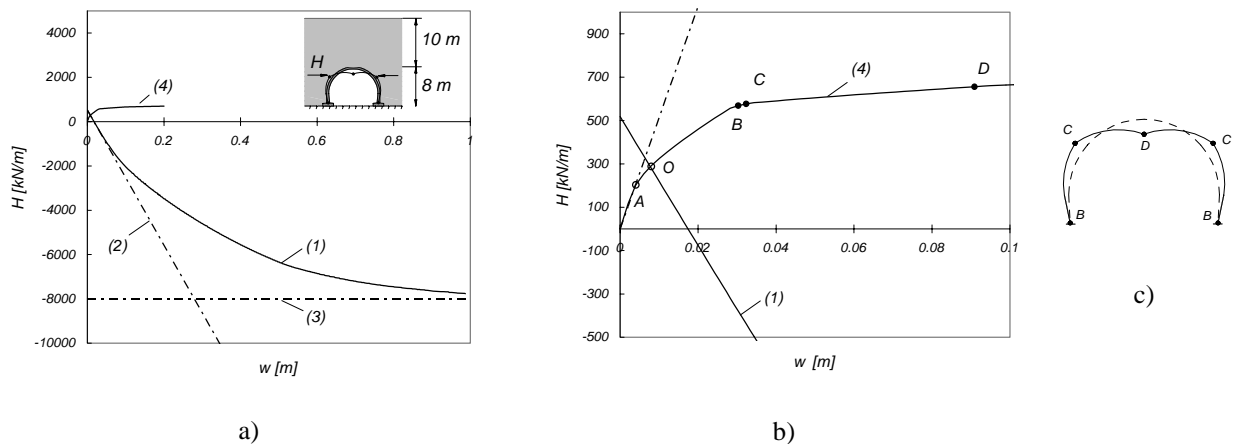


Figure 3 : Courbes caractéristiques a) du sol et b) de la structure et c) position des rotules plastiques

Dans un tel cas, la conception de la structure répond à des règles très différentes de celles de l'exemple 1. La figure 4 confronte différentes conceptions possibles. Les courbes 2, 3 et 4 représentent l'influence de la rigidité de la structure par le biais d'épaisseurs différentes alors que les courbes 4 et 5 indiquent l'influence de l'armature.

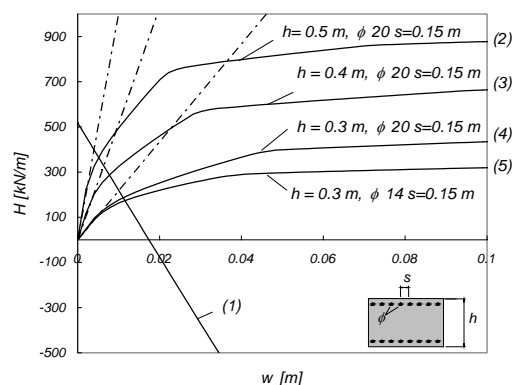


Figure 4 : Influence du comportement de la structure sur les sollicitations à l'équilibre

On constate qu'une augmentation de l'épaisseur de la voûte n'est pas nécessairement bénéfique à la structure. Elle conduit en effet à une augmentation importante des sollicitations (courbes 2, 3 et 4). La marge de sécurité n'est donc pas forcément augmentée. Une voûte souple constitue en fait une alternative mieux adaptée au comportement et plus économique qu'une voûte rigide.

Cette situation, qui peut paraître surprenante, s'apparente à celle rencontrée lors du dimensionnement des piles d'un pont fixe. Dans ce cas, le dimensionnement est habituellement dicté par le

comportement des piles à l'état de service sous déformations imposées. Celui-ci est influencé principalement par la rigidité des piles et non par leur résistance. Des tendances similaires sont observées dans le cas traité puisque la modification de l'armature dans la voûte ne modifie que peu l'état d'équilibre (courbes 4 et 5).

Le dimensionnement de ce type de structures est donc gouverné par un critère d'aptitude au service et il convient de choisir l'épaisseur de la voûte en fonction du comportement du sol dans sa phase élastique. La rigidité du sol ou plutôt sa rigidité relative par rapport à celle de la structure s'avère déterminante.

Contrairement à l'exemple 1, l'interaction sol-structure joue donc un rôle prépondérant et une analyse couplée est nécessaire.

A noter que la sécurité structurale est normalement assurée si les effets du 2^{ème} ordre ne deviennent pas prépondérants et pour autant que la structure offre une ductilité suffisante pour développer toute sa résistance à la ruine.

Conclusions

L'interaction sol-structure dans le domaine des tranchées couvertes peut être abordée selon une approche découplée qui consiste à déterminer les courbes caractéristiques du sol et de la structure puis à chercher graphiquement l'équilibre du système par un critère de compatibilité cinématique.

Cette approche permet d'expliquer les phénomènes et d'évaluer l'influence des divers paramètres. Deux régimes de comportement peuvent être mis en évidence en fonction des déformations nécessaires pour activer l'état plastique dans le massif :

- 1) si des faibles déformations suffisent à activer l'état plastique, le sol peut être considéré comme une charge appliquée et la structure peut être dimensionnée selon une démarche classique,
- 2) si des grandes déformations sont nécessaires pour activer l'état plastique, le comportement du système s'apparente à un cas de déformations imposées. L'interaction sol-structure doit alors être considérée en détails.

La conception de ce type de structures passe en premier lieu par l'identification du régime déterminant valable pour le cas considéré, puis par le choix d'une solution structurale adaptée.

Références

- [1] AFTES. Stabilité des tunnels par la méthode convergence-confinement. *Tunnels et Ouvrages souterrains* 32, 1979
- [2] AFTES. Recommandations pour l'emploi de la méthode convergence-confinement. *Tunnels et Ouvrages souterrains* 59, 1983, pp. 218-238
- [3] Panet M. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1995
- [4] Zace Service SA. Z-soil.PC user manual, 2003
- [5] Vollenweider U, Pralong J. Calcul et dimensionnement des tunnels exécutés à ciel ouvert. Office fédéral des routes, 1998
- [6] Craig R.F. Soil Mechanics. Van Nostrand Reinhold Compagny Ltd, 1974, pp. 119-129 et 131-132

Remerciements

Le projet de recherche actuellement en cours à l'EPFL (IS-BETON, LMS, LMR, LSC) est supporté par l'Office Fédérale des Routes (ASTRA / OFROU).