

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Comportement des tuyaux souples enterrés

Behaviour of Buried Flexible Conduits

P. HABIB, ING. E.P., DR. SC., *Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique, Paris, France*

M. P. LUONG, ING. ENPC., DR. SC.AP., *Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique, Paris, France*

SOMMAIRE

Le comportement général d'un tuyau souple enterré pose un problème complexe difficile à élucider bien qu'il existe actuellement un très grand nombre d'ouvrages de ce type. L'étude détaillée des résultats expérimentaux et la recherche des différents aspects caractérisant la rupture du tuyau enterré dans un milieu résistant à la déformation montrent que le mécanisme de l'écrasement se manifeste par un phénomène de flambage. La théorie linéarisée des équations d'équilibre permet de dégager une interprétation simple et facilement applicable en pratique. Les différentes hypothèses et approximations exécutées ont été examinées et évaluées pour permettre une claire compréhension dans la comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

SUMMARY

The general behaviour of a buried flexible circular conduit presents a complex problem difficult to solve; however, many such structures are used today. A detailed study of the experimental results and the different aspects which characterize the collapse of a buried conduit in a medium resisting deformations shows that the mechanism of breakdown is caused by buckling. The calculations based on a linearized system of equations of equilibrium permit a simple interpretation of the experimental data and an easy application in practice. Calculations based on various assumptions and approximations were carried out and evaluated so as to make possible a clear comparison of the theoretical and experimental results.

LE BUT de la présente étude est d'examiner le comportement des tuyaux déformables placés dans un massif de terre et de proposer un mode de calcul de ces ouvrages. Nous citerons comme exemple de pratique courante les buses métalliques circulaires placées dans des remblais, mais les résultats indiqués ici peuvent être généralisés et adaptés à des structures différentes. Il paraît vraisemblable qu'ils peuvent même être appliqués à des ouvrages raides et apporter une contribution utile au calcul du revêtement des cavités souterraines soumis à des distributions de charges quelconques.

Lorsqu'un tuyau souple enterré est mené à la ruine par l'action des charges qui lui sont appliquées, les déformations à la rupture sont grandes. Il est courant d'observer des déformations diamétrales de l'ordre de 5 pour cent avant que des désordres sérieux n'apparaissent. Remarquons tout de suite que si les déplacements en clef sont grands, cela ne signifie pas que les glissements dans le sol le soient. C'est dire que la rupture peut se produire dans la paroi du tuyau avant qu'on ait épuisé la capacité de résistance du sol. Cette constatation contient l'essentiel de la présente communication: avant de proposer un mode de calcul, nous allons le justifier par des études sur modèles réduits.

ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT

Étant donné la complexité du problème, il paraissait tout à fait nécessaire de l'étudier d'abord sur des modèles réduits conservant dans la mesure du possible la similitude des caractéristiques mécaniques des matériaux en œuvre. Trois types de maquettes ont été utilisés: 1) Tubes de 1 à 5 cm de diamètre et de 28 cm de long placés au sein d'un massif de 40 cm de large et de 30 cm de haut à l'intérieur d'une cuve métallique. Un effet de paroi non négligeable pouvait se produire. Les mesures quantitatives (déformations, contraintes) étaient faites uniquement dans la partie centrale de la cuve, néanmoins il a paru utile de vérifier les résultats sur un modèle beaucoup plus grand. 2) Tubes de 10 cm de

diamètre et de 1 m de longueur dans un massif de sable de Seine. L'effet des frottements sur les parois n'est pas réduit, mais sa valeur relative est très sérieusement diminuée. Par contre un tel essai met en œuvre environ 1 tonne de matériau. 3) Tubes de 2 cm à 10 cm de diamètre dans un massif de sable à deux dimensions composé de rouleaux cylindriques selon la méthode de Schneebelli et Dantu. Cette fois, il n'y a plus d'effet de paroi, mais on ne dispose que d'un matériau unique pour le massif.

Les résultats obtenus avec les différents modèles nous ont donné des interprétations semblables. Aussi les types de modèles ne seront pas distingués dans la suite de cette étude.

Des matériaux très différents furent utilisés pour constituer le massif (sable de Loire, de Seine, de Fontainebleau, de billes de verre, argile, limon, gel de silice, élastomère synthétique, rouleaux d'acier). Leurs caractéristiques mécaniques furent mesurées avec soin (γ_s , ϕ , c , E). Nous avons fait varier E et ϕ des sables en faisant varier γ_s . Nous avons fait varier E et c des argiles et limons en faisant varier la teneur en eau w . Enfin, nous avons donné une cohésion apparente artificielle à un milieu pulvérulent (billes de verre) en exerçant une pression hydrostatique sur l'ensemble du massif par une application directe du théorème des états correspondants (c variant de 0 à 450 grammes/cm.ca. pour $\phi = 23^\circ$).

La rigidité EI des tubes utilisés a varié de 0,023 kg-cm à 4,68 kg-cm par unité de longueur de l'anneau. Ils étaient constitués par des feuilles de natures diverses (caoutchouc naturel, synthétique, cuivre, plomb, laiton, acier, zinc) et d'épaisseurs variées. Au cours de certains de ces essais, la composante normale des contraintes exercées sur le tube a été mesurée, à l'aide de dynamomètres à friction, pour suivre l'évolution des charges au voisinage de la ruine du modèle.

Les conclusions suivantes ont pu être déduites des résultats de ces essais dont le nombre est voisin de la centaine:

1) La répartition des contraintes sur une inclusion déformable placée dans un massif et son évolution est extrêmement complexe. On ne peut envisager de résoudre

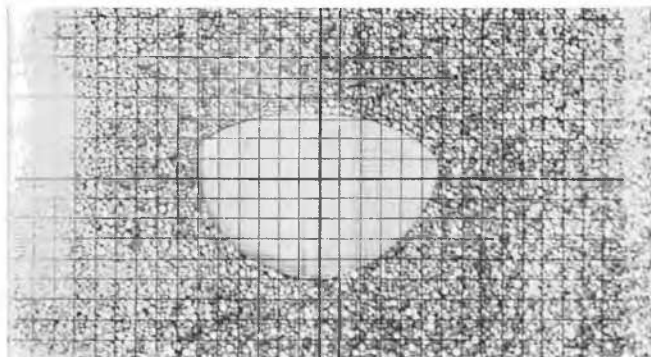


FIG. 1. Rupture du tuyau avec une forme elliptique.

analytiquement ce problème sans hypothèses simplificatrices. Nous verrons plus loin que les approximations faites donnent une solution très largement suffisante.

La fig. 1 indique les résultats obtenus lorsque la déformation qui précède la rupture de la buse lui donne une forme elliptique.

2) On n'arrive pas à mettre en évidence des lignes de glissement au sein du massif de terre même pour les grandes déformations diamétrales du tube.

3) Les formes de rupture du tube évoquent un phénomène de flambage. La rupture du tube correspond à l'apparition d'une ou de plusieurs cloques; lorsque la déformation est générale le nombre de ces cloques est toujours pair.

Ces résultats (figs. 2 et 3) sont en accord avec les observations qu'on peut faire sur les accidents survenus à des buses

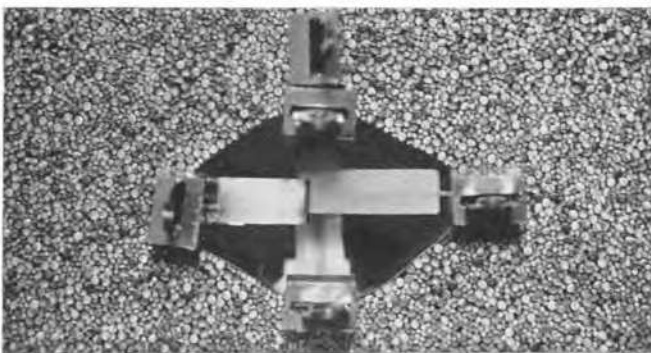


FIG. 2. Rupture avec 4 ondes. Mesure des contraintes par des dynamomètres à friction et évaluation des déformations diamétrales.



FIG. 3. Rupture par flambage d'ordre $n = 6$. Remarquer les 4 ondulations de la partie supérieure de la figure qui ont persisté après l'apparition de la grande cloque inférieure droite.

métalliques réelles. En général, pour des remblais normaux et des diamètres courants de quelques mètres, la rupture est du mode elliptique, exceptionnellement du mode à 4 ondes (1 onde sur les 4).

A la différence des essais sur modèles, la rupture se produit le plus généralement au-dessus du diamètre horizontal de la buse, encore que quelques cloquages sur un quart de cercle aient pu parfois être observés sur la partie inférieure. Cela provient de l'effet de la pesanteur dont l'influence est minime sur des modèles à l'échelle du 1/100.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Etude de la stabilité du revêtement

Calcul théorique. De la théorie linéarisée de la flexion des barres courbes dans le plan (Radenkovic, 1954) qui: (a) tient compte de l'influence de la déformation sur les conditions d'équilibre; (b) néglige les carrés des déplacements, les produits des déplacements et de leurs dérivées; (c) suppose que les forces extérieures sont radiales et que le milieu se caractérise par le coefficient de déformation $\beta =$ force par unité de longueur de l'anneau/déplacement radial, on peut déduire [Luong, 1964] la formule de flambage suivante:

$$p_{cr} = \frac{EI}{R^3} \left[(4n^2 - 1) + \frac{\beta R^4/EI}{4n^2 - 1} \right]. \quad (1)$$

Pour $\beta = 0$ la valeur minimum de Eq 1 est obtenue avec $n = 1$: $p_{cr} = p_0 = 3EI/R^3$ valeur bien connue. En général n , qui est à choisir, dépend de $\gamma = \beta R^4/EI$; par exemple, la valeur limite de γ entre $n = 1$ et $n = 2$ est donnée par: $3 + \gamma/3 = 15 + \gamma/15$, soit $\gamma = 45$. C'est à dire que $n = 1$ lorsque $\gamma < 45$, $n \geq 2$, $\gamma > 45$. La relation (1) a déjà été esquissée lors de l'étude d'un anneau élastique comprimé (Stewens, 1952).

Discussion des hypothèses admises. La formule précédente a été obtenue à partir d'un certain nombre d'hypothèses que nous allons rappeler et éventuellement discuter. 1) Le problème est plan. 2) L'effet du gradient de la pesanteur est faible. Ceci est vrai sur les modèles réduits, mais l'est sans doute moins dans la réalité. Il ne semble pas que les résultats qualitatifs en soient énormément affectés. 3) Le diamètre D est négligeable par rapport à la profondeur, pour que la surcharge soit effectivement uniforme. 4) Le terrain est supposé homogène et isotrope. En réalité, le sol naturel sur lequel est posé le remblai est le plus souvent d'une qualité différente du remblai lui-même, qui, de par sa construction par couches, n'est peut-être pas isotrope. 5) La distribution des contraintes sur le tuyau correspond à une pression uniforme. Il est vraisemblable que ceci n'est pas parfaitement exact. Cependant, si les contraintes ne sont pas normales, l'hypothèse qui consiste à l'admettre introduit une erreur qui est du côté de la sécurité. D'autre part, de nombreuses mesures effectuées sur des ouvrages existants montrent que le revêtement souple régularise par de petites déformations locales la distribution des contraintes autour de l'inclusion et confirment ainsi cette hypothèse. Le calcul, dans le cas d'une distribution non uniforme, est cependant possible. Les résultats obtenus (Luong, 1964) ne donnent pas alors un écart très important avec ceux de l'hypothèse de la pression uniforme. 6) La variable temps n'intervient pas. On trouvera plus loin comment on peut tenter de faire intervenir les déformations différées. 7) Le coefficient β est une constante.

En admettant une exacte proportionnalité entre la charge et le déplacement, on peut écrire $p/\rho = \beta$; β a donc la même définition que le module de réaction. Nous ne discuterons pas ici le problème de la mesure de ce coefficient dont la

critique a été faite ailleurs (Koegler et Scheidig, 1938). La valeur de β dépend de la dimension de la surface chargée et cette dernière peut être grande dans certains cas réels. Les valeurs de β dont il sera fait mention plus loin seront



FIG. 4. Anneaux cloqués.

mesurées directement sur les modèles, soit par l'expansion régulière d'un cylindre déformable placé dans le milieu, soit par la mesure de p et ρ dans la déformation d'une buse (fig. 2). Les valeurs de n sont, soit associées aux mesures de β , soit observées directement sur les modèles. Il est bien clair dans l'esprit des auteurs que la détermination de β est la difficulté majeure dans l'emploi de la formule précédente.

Dans le cas théorique de la déformation d'une cavité cylindrique dans un corps élastique indéfini, soumise intérieurement à une pression σ , nous avons la relation:

$$\Delta R/R = [(1 + \nu)/E]\Delta\sigma \text{ soit } \beta = \Delta\sigma/\Delta R = E/(1 + \nu)R$$

β peut donc se déterminer par E , ν , et R . Cette évaluation demande quelques précautions vu la difficulté d'obtenir E et ν , mais c'est peut-être la méthode la plus adaptée aux applications pratiques.

Comparaison des résultats du calcul et de l'expérience

La comparaison des résultats du calcul et de l'expérience doit être faite de façon à vérifier l'existence d'une relation entre les différents paramètres: rayon du tuyau, module d'élasticité du sol, inertie des tôles, pression critique et à définir le mode de rupture, c'est à dire l'ordre n du flambage.

Définition de la rupture. La rupture, c'est l'apparition d'une cloque. Il est possible qu'une défaillance locale dans le tuyau ou dans le sol entraîne l'apparition d'un cloquage partiel qui permette encore une augmentation de la charge agissante. Toutefois, avec beaucoup de soin dans la mise en place, on obtient des résultats plus nets et réguliers présentant une série continue et symétrique de cloques, allée à une reproductibilité parfaite des formes de rupture (fig. 4). Dans une structure réelle, il est à peu près certain que l'apparition de la première cloque correspond à des déchirures du métal et on peut assimiler pression critique et rupture. Une analyse précise de la courbe efforts-déformations—aussi bien théorique qu'expérimentale—peut montrer

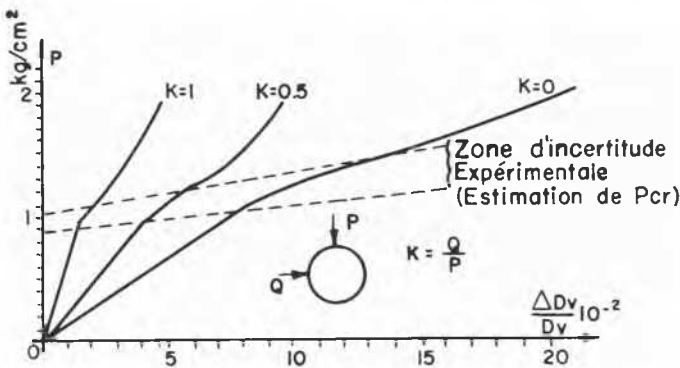


FIG. 5. Estimation expérimentale de la charge critique.

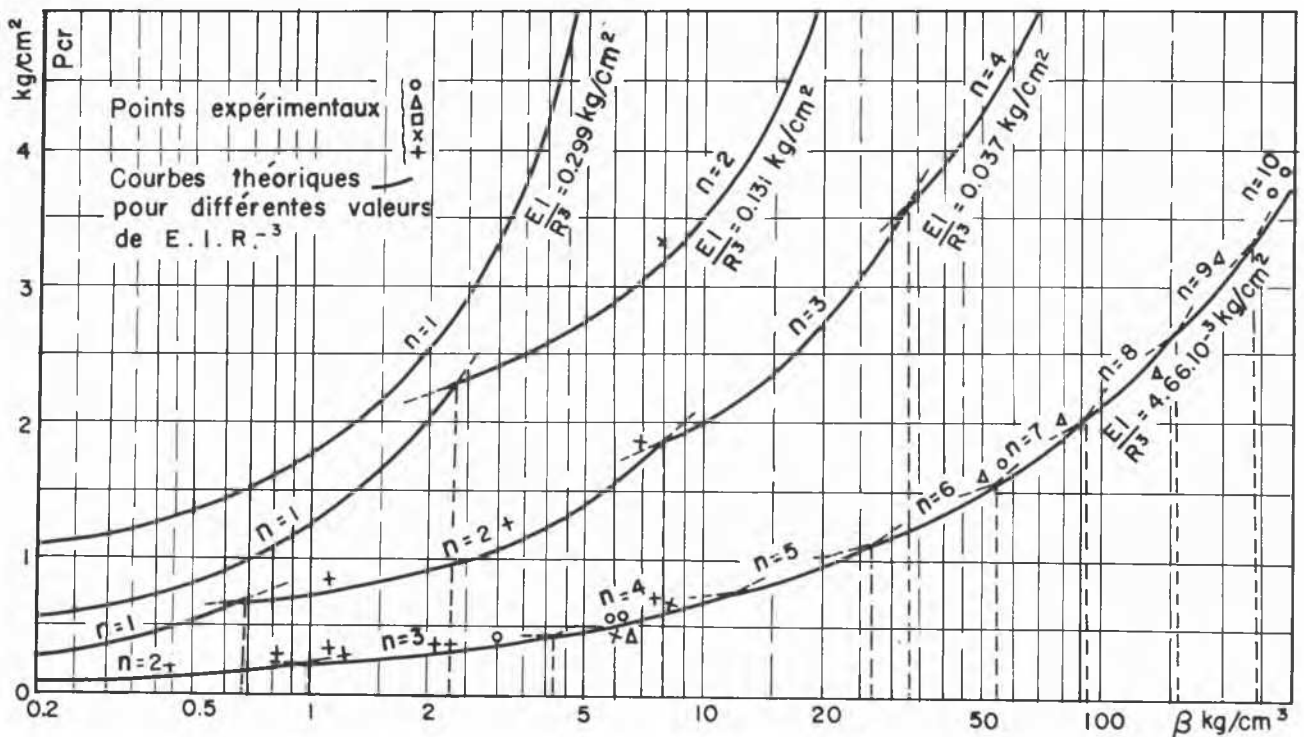


FIG. 6. Courbe théorique $p_{cr} = f(\beta)$ et points expérimentaux.

que le tuyau ne s'effondre pas toujours pour des pressions supérieures à la pression critique et que celle-ci apparait comme un seuil au-delà duquel les déformations s'accroissent (fig. 5).

Remarquons l'absence de la grande déformabilité du tuyau dans la liste des hypothèses donnée plus haut: avec la définition précédente de la rupture, on ne voit pas pourquoi ne pas appliquer le même calcul aux tuyaux rigides comme des buses en béton armé. Nous n'avons pas encore eu l'occasion de vérifier cette proposition sur des accidents réels survenus à des ouvrages rigides.

Mode de flambage. Dans la formule donnant la pression critique, le paramètre n définit l'ordre de flambage. Il doit être choisi de façon à donner à p_{cr} une valeur minimale.

$$\text{soit } dp_{cr}/dn = 0 \quad \text{d'où } n_0 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \sqrt{\frac{\beta R^4}{EI}}}$$

Expérimentalement, n définit la longueur de l'arc correspondant à une cloque; mais lorsque la rupture n'est pas complète, il n'est pas toujours aisé d'évaluer où commence et où finit l'onde de flambage. Nous avons représenté la corrélation entre les résultats théoriques et expérimentaux sur la fig. 6 qui représente la pression critique en fonction de β pour des valeurs de EI/R^3 constant. L'accord entre les valeurs observées et le calcul est excellent.

GÉNÉRALISATION

Influence du temps

Pour décrire le comportement rhéologique du sol, nous avons pris comme modèle mécanique le corps de Kelvin, de façon à introduire les phénomènes viscoélastiques dans le mécanisme de ruine des tuyaux enterrés.

Les résultats qualitatifs obtenus sont intéressants pour surveiller le comportement et étudier le mécanisme de ruine de l'ouvrage. Cependant, ils sont difficilement exploitables quantitativement à cause de la difficulté à déterminer, *a priori*, les coefficients rhéologiques du sol.

Extension du calcul au cas du tuyau soumis à une répartition quelconque de forces extérieures

Les conditions de pose en tranchées étroites ou larges influencent énormément la distribution des efforts autour du tuyau.

En outre, lorsque la paroi présente une assez forte rigidité à la flexion, la déformation de l'ouvrage est très limitée. La mobilisation de la butée du sol est alors insuffisante pour uniformiser la répartition des contraintes autour du tuyau comme dans le cas des tuyaux souples flexibles.

Un calcul direct, basé sur le même principe, c'est à dire tenant compte de l'influence de la déformation sur les condi-

tions d'équilibre linéarisées et du module de réaction du massif, et appliqué à une répartition donnée des charges, pourra alors donner une solution numérique du problème (Luong, 1964).

Applications pratiques

La formule donnant la pression critique doit être appliquée avec un certain discernement. Prenons par exemple un cylindre à section elliptique; le rayon de courbure minimal R est le plus dangereux. Mais, s'il est situé en clef et si le flambage est du type $n = 2$, la rupture se présentera symétriquement et le calcul avec R donnera une valeur pessimiste.

Mais cette formule est extrêmement utile. Elle montre par exemple que la pratique de l'étaiyage des buses—qui consiste à les soutenir au moment de la construction par des étais diamétraux, verticaux—a une efficacité aléatoire: l'amélioration peut être sensible dans certains cas, mais il peut s'en trouver d'autres où la stabilité est à peine supérieure pour un flambage d'ordre 2. On remplace l'effondrement de la clef par une ou deux ruptures latérales avec une pression critique très voisine.

On peut trouver de nombreuses autres applications du mécanisme de rupture proposé.

CONCLUSION

Les essais effectués, le calcul proposé et l'observation sur le terrain permettent de comprendre le comportement des revêtements des cavités souterraines cylindriques. Le principe essentiel de la ruine est le flambage de la coque cylindrique. La formule que nous proposons a l'avantage de mettre clairement en évidence l'influence réelle des différents facteurs. En effet dans la relation:

$$p_{cr} = \frac{EI}{R^3} (4n^2 - 1) + \frac{R\beta}{4n^2 - 1}$$

Le premier terme correspond au travail de la conduite seule et le deuxième à la participation du remblai à la stabilité de l'ouvrage.

RÉFÉRENCES

- KOEGLER et SCHEIDIG (1938). *Baugrunde und Bauwerk*. Ernst Berlin.
- LUONG, M. P. (1964). Stabilité des tuyaux souples enterrés. Thèse, Faculté des Sciences de Paris.
- RADENKOVIC, D. (1954). Bending of a curved bar in its own plane. *Quarterly Jour. Mechanical Applied Mathematics*, Vol. 7, Part 4.
- STEWENS, G. W. H. (1952). The stability of a compressed elastic ring and of a flexible heavy structure spread by a system of elastic rings. *Quarterly Jour. Mechanical Applied Mathematics* (Oxford), Vol. 5, Part 2.