

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.

Essais de cisaillement à grande échelle sur une route en béton précontraint

Testing the Shear Strength of a Prestressed Concrete Highway

par M. R. PELTIER, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris

Sommaire

La présente communication expose les résultats d'essais de cisaillement à grande échelle effectués sur la route expérimentale en béton précontraint de Fontenay-Trésigny. Il s'agissait en fait d'un cisaillement d'un sable fin très homogène constituant la fondation de la route. Les résultats concordent parfaitement avec les résultats de laboratoire à condition de prendre soin pour ces derniers de bien reproduire en laboratoire la cohésion capillaire qu'il y a sur la route. En outre les courbes efforts déformations obtenues sont très instructives pour l'étude des routes en béton précontraint.

1. La mise au point des chaussées en béton précontraint a nécessité la construction dans plusieurs pays de nombreuses routes expérimentales. En France, la dernière réalisation à ce sujet (1959 et 1960) est la déviation de Fontenay-Trésigny; elle comporte 2.380 mètres de chaussées en béton précontraint de divers types, soumises à un trafic réel intense, puisque situées sur la route Paris-Strasbourg (R.N. 4) qui supporte un trafic journalier moyen de plus de 6 000 véhicules dont 1 000 camions lourds.

Déjà les réalisations antérieures (notamment celles des aéroports d'Orly et d'Alger-Maison Blanche) avaient permis de faire largement progresser nos connaissances sur ce sujet. Mais un grand nombre de problèmes, particuliers aux routes (courbes, faible épaisseur du béton, etc.) restaient à élucider. C'est là l'objet de Fontenay-Trésigny dont la chaussée comporte un grand nombre d'appareils de mesure.

L'un des phénomènes étudiés est le glissement des dalles sur le sol; cette étude est très importante car elle peut avoir une influence prépondérante sur le choix des dispositifs de précontrainte et sur le coût de ces nouveaux types de chaussées, donc en définitive sur l'avenir des routes en béton précontraint.

Plusieurs essais de glissement de dalles ont été effectués à Fontenay-Trésigny. Seul l'un d'eux sera exposé ici; il a été choisi non seulement car il est le plus important, mais aussi parce qu'il constitue un pur phénomène de mécanique du sol, et qu'il représente probablement l'aspect le plus fréquent sous lequel il se présentera dans les routes en béton précontraint de l'avenir.

2. L'essai a été effectué sur un tronçon constitué par des dalles indépendantes de 70 mètres de longueur, 7,50 mètres de largeur et 15 centimètres d'épaisseur (Fig. 1). Dans ce tronçon la chaussée n'a pas de précontrainte transversale, et la précontrainte longitudinale lui est donnée par des ressorts pneumatiques disposés dans les joints séparant les dalles successives.

Ces ressorts pneumatiques sont constitués par des vessies en caoutchouc, gonflées à l'air comprimé, et placées dans une

Summary

The autor gives the results of full scale shear tests on the experimental length of the prestressed concrete highway from Fontenay to Trésigny. The problem concerned the shear strength of the homogeneous fine sand underlying the road slab. The test results were in perfect agreement with those obtained in the laboratory, much care having been taken to reproduce the in situ capillary cohesion of the sand in the laboratory. In addition, the load deformation curves obtained from the tests are of great value to designers of prestressed concrete highways.

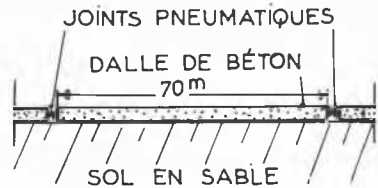


Fig. 1 Schéma de la dalle essayée.
Diagram of the experimental slab.

sorte de boîte métallique coulissante et extensible, constituée par deux fers profilés du type *U* s'emboîtant l'un dans l'autre. La Fig. 2 donne la coupe en travers de ce joint.

Ce type de joint constitue non seulement un ressort élastique qui maintient la précontrainte longitudinale dans la chaussée, quelles que soient les variations hygrothermiques, mais il constitue aussi un vérin dont on peut faire varier à volonté la poussée en faisant varier la pression de gonflement de l'air. C'est cette dernière propriété qui a été utilisée lors des essais de glissement.

L'air comprimé était fourni par des bouteilles d'air comprimé munies de mano-détendeurs. La pression de l'air dans les vessies était mesurée avec une bonne précision, à l'aide de manomètres spéciaux (manomètres à lame flexible). Avant d'être placés sur la chaussée ces joints avaient d'ailleurs été étalonnés en laboratoire, où l'on mesurait les variations de leur poussée, en fonction des variations de la pression de l'air comprimé, et ceci pour différentes ouvertures du joint. Cet étalonnage était indispensable car l'on ne connaissait pas à l'avance le comportement exact de l'enveloppe en caoutchouc de 1 centimètre d'épaisseur.

On a observé, au cours de cet étalonnage que la poussée du vérin était indépendante de l'ouverture du joint, et qu'elle avait pour valeur :

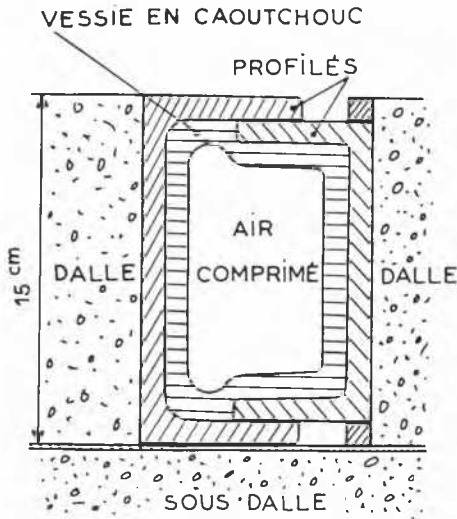


Fig. 2 Schéma du joint pneumatique utilisé.
Diagram of the pneumatic joint used for construction.

$$P = L \cdot h \cdot p. \text{ où :}$$

- P est la poussée (en kgs) ;
- p la pression de l'air comprimé dans la vessie (en kgs/cm²) ;
- L la largeur du joint ;
- h une hauteur efficace du joint.

On a trouvé : $h = 11,2$ cm.

Tout se passe donc, à très peu près, comme si le caoutchouc avait une épaisseur négligeable, ou, en d'autres termes, comme si le caoutchouc se comportait comme un liquide, ce qui est assez naturel étant donné son coefficient de Poisson très voisin de : 0,5.

Il y a lieu de signaler la bonne précision de ce vérin pneumatique (1 pour cent environ).

3. A Fontenay-Trésigny toutes les dalles reposent sur une couche de sable homogène de 60 cm d'épaisseur au minimum. Cette couche a pour but, d'une part de constituer une fondation constante et homogène sous la chaussée, d'autre part d'éviter la gélivité de la fondation, le sol naturel étant suspect à ce sujet. Cette fondation en sable procure d'ailleurs de grands avantages, et il est très probable que dans les chaussées en béton précontraint de l'avenir, les fondations seront toujours ainsi constituées par du sable.

Ce sable, entièrement siliceux, a la même origine géologique que le sable de Fontainebleau. Ses caractéristiques géotechniques sont les suivantes :

- passant au tamis de 500 microns : 100 pour cent
- passant au tamis de 200 microns : 60 à 75 pour cent
- passant au tamis de 80 microns : 10 à 15 pour cent
- indice de plasticité : nul
- équivalent de sable normal (au piston) : 16 à 24
- équivalent de sable visuel : 36 à 23

Ce sable fin se compacte aisément lorsque fortement imbibé d'eau. Mais en séchant, il devient pulvérulent et ne peut supporter la moindre circulation.

Le béton des dalles (dans cette partie de la route) a été coulé sur ce sable compacté et humide, avec interposition de papier

Kraft. On constate toutefois que les faces inférieures des dalles sont loin d'être parfaitement planes ; elles comportent de nombreuses irrégularités et aspérités qui pénètrent dans le sable, et s'y accrochent, si bien que la rupture par cisaillement ne se produit pas à l'interface sable béton, mais dans le sable lui-même. En fait, ces essais de glissement de dalle, ont donc été des essais de cisaillement de sable, réalisés avec un appareil géant, puisque la surface de chaque dalle dépassait 500 mètres carrés (525 mq exactement).

Il est alors intéressant de comparer les résultats obtenus dans ces essais sur route aux essais effectués en laboratoire avec le même matériau.

4. En laboratoire les essais ont été effectués à l'aide de la boîte de cisaillement classique, selon le processus normal d'essai.

Un premier essai a été effectué après un compactage modéré conduisant à une densité sèche de : 1,30, voisine de celle réalisée effectivement sur chantier. (La teneur en eau était de : 2,4 pour cent). Les quatre points expérimentaux obtenus étaient bien alignés et correspondaient aux caractéristiques :

$$\varphi = 23^\circ \qquad c = 25 \text{ gr/cm}^2$$

D'autres essais ont été effectués avec des compacités supérieures :

- en compactant ce sable sous une pression statique de 100 kg/cm², on obtient une densité sèche de : 1,55, un angle de frottement interne : $\varphi = 35^\circ$ et une cohésion $c = 85 \text{ gr/cm}^2$;
- d'autre part en effectuant une mise en place hydraulique du sable, on obtient une densité sèche de 1,58, un angle de frottement interne : $\varphi = 39^\circ$ et une cohésion $c = 0$.

Ces essais montrent que les caractéristiques géotechniques de ce sable dépendent dans une large mesure de sa compacité et des moyens de mise en œuvre.

5. Sur le chantier, les essais ont notamment consisté à dégonfler les deux joints adjacents à une dalle, et à regonfler progressivement l'un des joints jusqu'à obtenir le glissement. Ensuite, le premier joint était dégonflé, et le second progressivement regonflé jusqu'à obtenir le glissement de la dalle dans l'autre sens. On a pu ainsi effectuer plusieurs cycles.

Seul est indiqué ci-après le diagramme obtenu après plusieurs manœuvres.

Pratiquement, on a opéré par paliers successifs obtenus en gonflant de 5 en 5 kg/cm² la pression d'air du vérin pneumatique de poussée. Chaque palier durait le temps nécessaire à la stabilisation des déformations, car un certain fluage a été observé, pour les fortes poussées.

Les mesures de déformation ont consisté à mesurer au pied à coulisse, les variations d'ouverture des joints. Cette mesure relative était très précise (au centième de mm), alors que des mesures de déplacements absolus, par rapport à des repères fixes éloignés, ont été trop imprécises, pour pouvoir être prises en compte.

Seul le joint dégonflé a donné des indications correctes de déplacement, car on peut admettre que la dalle voisine, non sollicitée était immobile. Par contre le joint actif déplaçait les deux dalles adjacentes ; comme la symétrie n'a pu être assurée (seconde dalle différente de la première), les mesures faites à ce joint actif n'ont pas d'intérêt.

Les déplacements observés, à l'extrémité libre de la dalle sont donnés sur la Fig 3. ci-jointe.

On notera que le fluage apparaît pour : $p = 20 \text{ kg/cm}^2$ (premier palier horizontal de la courbe), mais la déformation tend alors vers une limite. Par contre le fluage pour la pression $p = 25 \text{ kg/cm}^2$ ne semblait pas tendre vers une limite ; il correspondait donc à la rupture par glissement.

6. Au moment de ce glissement limite, la poussée du joint pneumatique, était d'après l'étalement indiqué au § 2 ci-dessus :

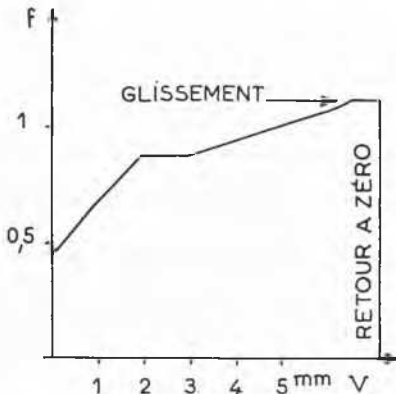


Fig. 3 Déplacements (v) observés en bout de dalle en fonction

des efforts exercés : $f = \frac{T}{N}$

Displacement (v) obtained on the edge of a slab as a

function of the load : $f = \frac{T}{N}$

$P = 750 \times 11,2 \times 25 = 210\,000$ kg

Alors que le poids de la dalle était :

$Q = 70 \times 7,50 \times 0,15 \times 2\,400 = 189\,000$ kg

Il en résulte donc, dans cet essai de cisaillement géant, un angle de frottement interne apparent, tel que :

$$\tan \varphi = \frac{P}{N} = 1,111 \quad \text{d'où : } \varphi = 48^\circ$$

En fait il y a lieu de tenir compte de la cohésion.

Si l'on adopte les valeurs mesurées en laboratoire :

$$c = 25 \text{ gr/cm}^2 \quad \varphi = 23^\circ$$

et en tenant compte de la section de la dalle (5 250 000 cm²) et de son poids, la poussée horizontale pour obtenir le glissement de la dalle doit être :

$$P = c \cdot S + Q \cdot \tan \varphi = 0,025 \times 5\,250\,000 + 189\,000 \times 0,424$$

soit : $P = 131\,000 + 80\,000 = 211\,000$ kg.

Alors que la valeur observée sur route a été de : 210 000 kg.

Cette excellente concordance des essais en laboratoire et des essais sur route, n'a été obtenue que parce que le matériau essayé en laboratoire était placé dans les mêmes conditions que le matériau du chantier. On doit en effet noter l'influence considérable de la cohésion sur le chantier, par suite de la grande surface des dalles essayées, et de leur faible poids unitaire (0,036 kg/cm²). Les mesures, en chantier et en laboratoire se font donc, dans des domaines très différents de la courbe intrinsèque. La concordance, qui cependant a été obtenue dans les résultats, constitue donc une bonne confirmation de la théorie.

A noter également que le sable a été essayé à une faible teneur en eau, qui correspond à sa teneur en eau normale sous la chaussée. S'il avait été essayé sec, ou saturé d'eau, toute cohésion capillaire aurait été détruite, et les résultats observés auraient été très différents de la réalité sur la chaussée.

7. La courbe de la Fig. 3 est une courbe globale, qui résulte de l'intégration à toute la surface de la dalle de la loi élémentaire du glissement. Cela n'aurait pas d'inconvénient si la dalle de béton était indéformable, c'est-à-dire si tous ses points étaient animés du même mouvement. En fait, sur 70 mètres

de longueur la compressibilité du béton n'est pas négligeable. Dans les essais précités la déformation du béton n'intervient toutefois qu'à titre de terme correctif.

En admettant que la loi élémentaire du glissement (courbe effort déformation) soit indépendante en chaque point de ce qui se passe dans les points voisins, un calcul mathématique permet de remonter de la courbe globale à la loi élémentaire. Le résultat de ce calcul est donné sur la Fig. 4, qui représente donc la loi élémentaire du glissement.

Cette loi est représentée, en fait, par deux courbes, la courbe supérieure représente la loi du glissement sans fluage ; c'est celle que l'on obtiendrait en opérant à grande vitesse. La courbe inférieure représente la loi du glissement avec fluage ; c'est celle que l'on obtiendrait en opérant à vitesse très lente.

Dans la pratique, la courbe réelle sera intermédiaire entre ces deux courbes limites.

Il y a lieu de remarquer la forme des courbes obtenues qui diffère notablement de celle obtenue en laboratoire dans les appareils de cisaillement à vitesse constante. On peut ainsi distinguer trois zones dans ces courbes :

— Dans la première qui va de $f = 0$ à $f = 0,45$ il n'y a pas de déformation ($v = 0$). Tout se passe comme si les dalles restaient collées rigidement au sol.

— Dans la seconde zone qui va de : $f = 0,45$ à $f = 1,11$, il y a déformation, mais tout se passe comme si le sol se fissurait verticalement, et comme si les lamelles de sol ainsi produites fléchissaient sous l'effort de cisaillement des dalles, tout en restant collées par leur partie supérieure à ces dernières.

— Enfin dans la troisième zone, il y a véritablement glissement. Tout se passe comme si les dalles se décollaient du sol et glissaient sur les lamelles précitées.

L'existence d'un seuil de rigidité (ici : $f = 0,45$) a une grande importance pour le choix des dispositifs de précontrainte. Il a d'ailleurs un effet heureux dans les courbes, car il permet d'y absorber la poussée centrifuge sans déformation, en évitant la construction d'ouvrages de butée.

On notera enfin que l'essai ainsi exposé, a été fait après plusieurs manœuvres ou cycles de déplacement. Ce n'était donc pas la première rupture. Lorsque l'on fait l'essai de glissement pour la première fois les courbes obtenues n'ont pas l'allure de celles de la Fig. 4, mais elles comportent un maximum, tout comme les courbes obtenues en laboratoire dans l'essai de cisaillement. Ce maximum peut atteindre des valeurs de $f = 1,40$ à $f = 1,50$ avec le sable ci-dessus.

C'est toutefois l'essai, après plusieurs cycles qui a le plus d'importance dans le cas des routes en béton précontraint.

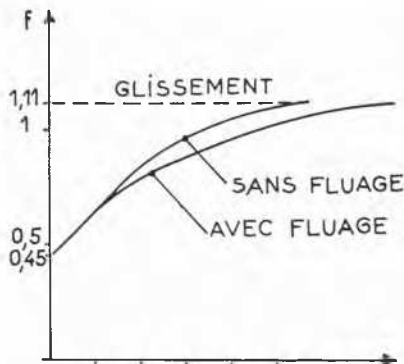


Fig. 4 Loi élémentaire : efforts x déplacements
Elementary law : load x displacement.