

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 7 (1964)

**Artikel:** Essais sur modèles géomécaniques du tunnel de l'autoroute de la Cisa

**Autor:** Fumagalli, E.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-7828>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Ib5

### Essais sur modèles géomécaniques du tunnel de l'autoroute de la Cisa

*Geomechanischer Modellversuch für den Tunnel der Cisa-Autobahn*

*Geomechanical Model Testing of the Tunnel of the Cisa Expressway*

E. FUMAGALLI

Prof. Dr. Ing., ISMES, Bergamo, Italia

#### Critères d'expérimentation

En considération de la variabilité et de l'indétermination des conditions de charge le long du tunnel, on a jugé utile de schématiser les conditions de charge sur le revêtement (fig. 1) d'une manière simple et significative. A cet effet on a supposé des contraintes uniformément réparties dans le massif rocheux et agissant dans une seule direction, localement perturbée par la présence du tunnel.

Afin d'examiner un nombre strictement suffisant de situations statiques et d'y comprendre tous les cas les plus probables et les plus importants susceptibles



Fig. 1.

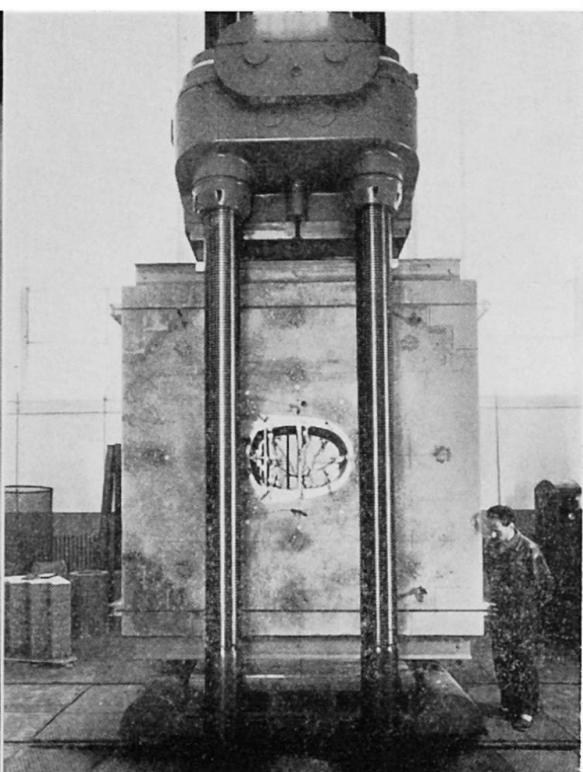


Fig. 2.

de se produire dans la réalité, on a étudié deux types de modèles: l'un représentait le percement en roche dans l'hypothèse (confirmée par la situation réelle) de la traversée d'un calcaire marneux homogène présentant les caractéristiques suivantes:

- module d'élasticité  $E \cong 80\,000 \text{ kg cm}^{-2}$ ,
- résistance à la compression  $R \cong 100 \text{ kg cm}^{-2}$ .

Nos connaissances brutes sur les poussées susceptibles de se transmettre à travers la roche dans toutes les directions nous ont conseillé d'appliquer au modèle des diagrammes de charge agissant dans les trois directions fondamentales: verticale, horizontale et à  $45^\circ$ . A cet effet, nous avons apprêté un bloc en mortier de pierre ponce et ciment (dimensions:  $2 \times 2 \times 0,75 \text{ m}$ ) reproduisant la roche de contour (fig. 2).

Un modèle à l'échelle de 1 : 20 du revêtement du tunnel réalisé en mortier de pierre ponce armé a été placé au centre du bloc.

Les caractéristiques mécaniques de déformabilité et de résistance des mortiers ont été réduites à l'échelle de 1 : 5 par rapport aux caractéristiques réelles.

Certaines modifications apportées au contour du bloc rocheux-modèle, ont permis de l'utiliser dans les essais du domaine élastique selon les trois directions de charge susdites. En adoptant enfin la direction de charge jugée la plus défavorable, c'est à dire à  $45^\circ$ , on a procédé aux essais finals à la rupture (fig. 3).

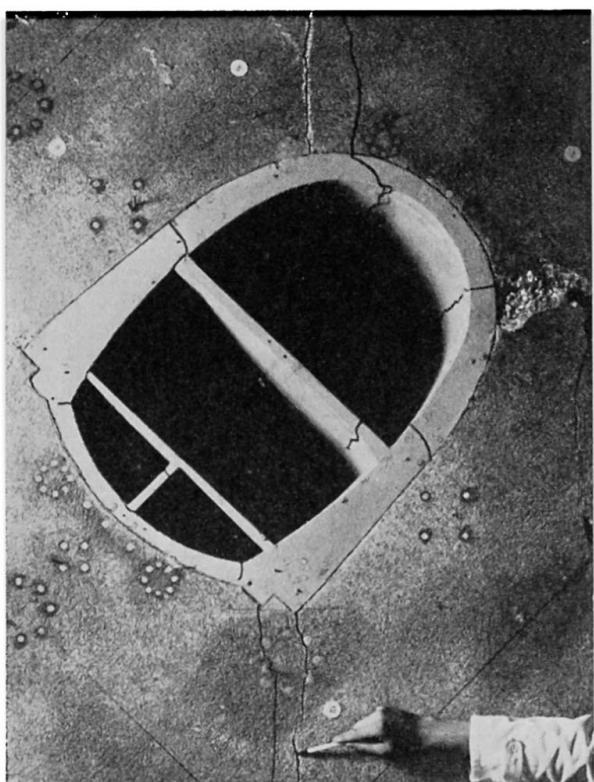


Fig. 3.



Fig. 4.

Afin de s'assurer du comportement statique du revêtement correspondant au percement en terrain argilo-marneux, on a préparé, pour un deuxième modèle, un caisson en béton armé, destiné à contenir les poussées latérales du terrain incohérent modelé (fig. 4).

Deux fenêtres ont été ouvertes le long de l'axe central horizontal du caisson, pour introduire le modèle du tunnel, toujours à l'échelle de 1 : 20. Dans ce deuxième modèle les caractéristiques des matériaux employés étaient égales à celles du prototype. Les essais ont été limités au diagramme de charge verticale, seule hypothèse de charge à envisager en présence de terrain incohérent.

Pour reproduire le diagramme de charge on a employé des vérins hydrauliques qui transmettaient la charge au modèle par l'intermédiaire de dalles de répartition en béton armé.

Les réactions aux charges étaient contenues dans le châssis d'une presse de 2000 tonnes.

### Observations tirées des résultats

Si l'on examine les résultats obtenus par l'emploi du modèle (fig. 5, 6, 7 et 8) en roche, on remarque ce qui suit:

- Les contraintes dans le rocher se produisent autour du revêtement d'une manière tout à fait régulière; en particulier l'action de poussée verticale détermine, dans le plan de symétrie près du revêtement, des déformations plastiques horizontales qui font déjà soupçonner la possibilité de microfissures lors de l'application d'une charge de  $10 \text{ kg cm}^{-2}$ . Cela correspond à la théorie; mais il y a lieu de signaler que les tractions ne se transmettent pas au revêtement, qui demeure soumis à la seule compression par fonctionnement indépendant.
- Les contraintes dans le revêtement dues au diagramme vertical de charge sont assez limitées malgré la présence dans le revêtement de moments de flexion d'une certaine importance.  
En effet ce n'est que dans la voûte inférieure que les tractions sont sensibles. A ce sujet, nous remarquerons que la voûte, la dalle de chaussée inférieure et le mur médian de soutènement constituent un ensemble statique rappelant le fonctionnement d'une ferme renversée.
- La situation de charge la plus défavorable est obtenue par un diagramme à  $45^\circ$ .

La charge dissymétrique donne des moments de flexion remarquables dans les deux tiers de la voûte supérieure.

C'est exactement dans cette voûte que se sont produites les premières ruptures pendant les essais à outrance à une intensité de charge répartie de  $40 \text{ kg cm}^{-2}$ .

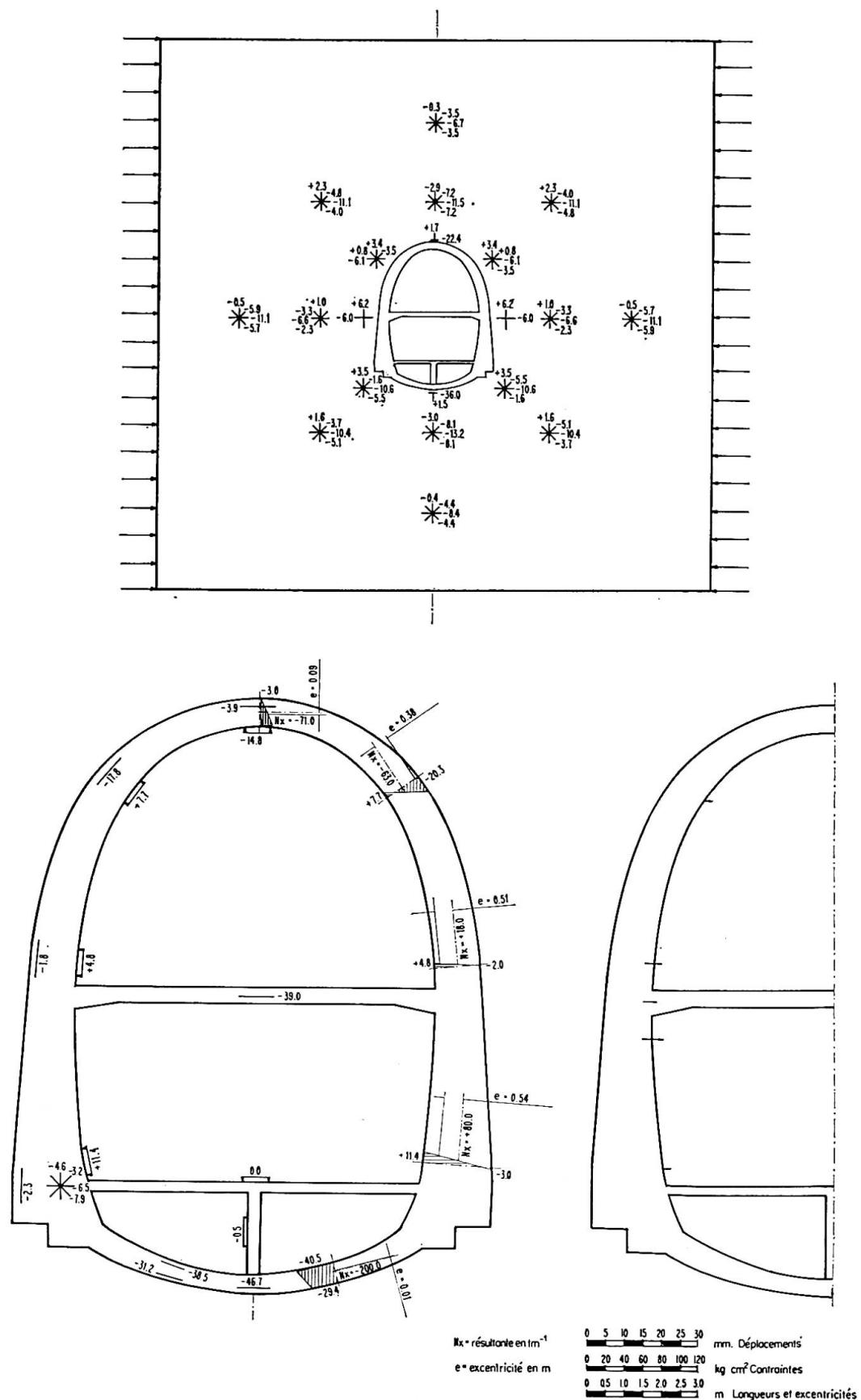


Fig. 5.

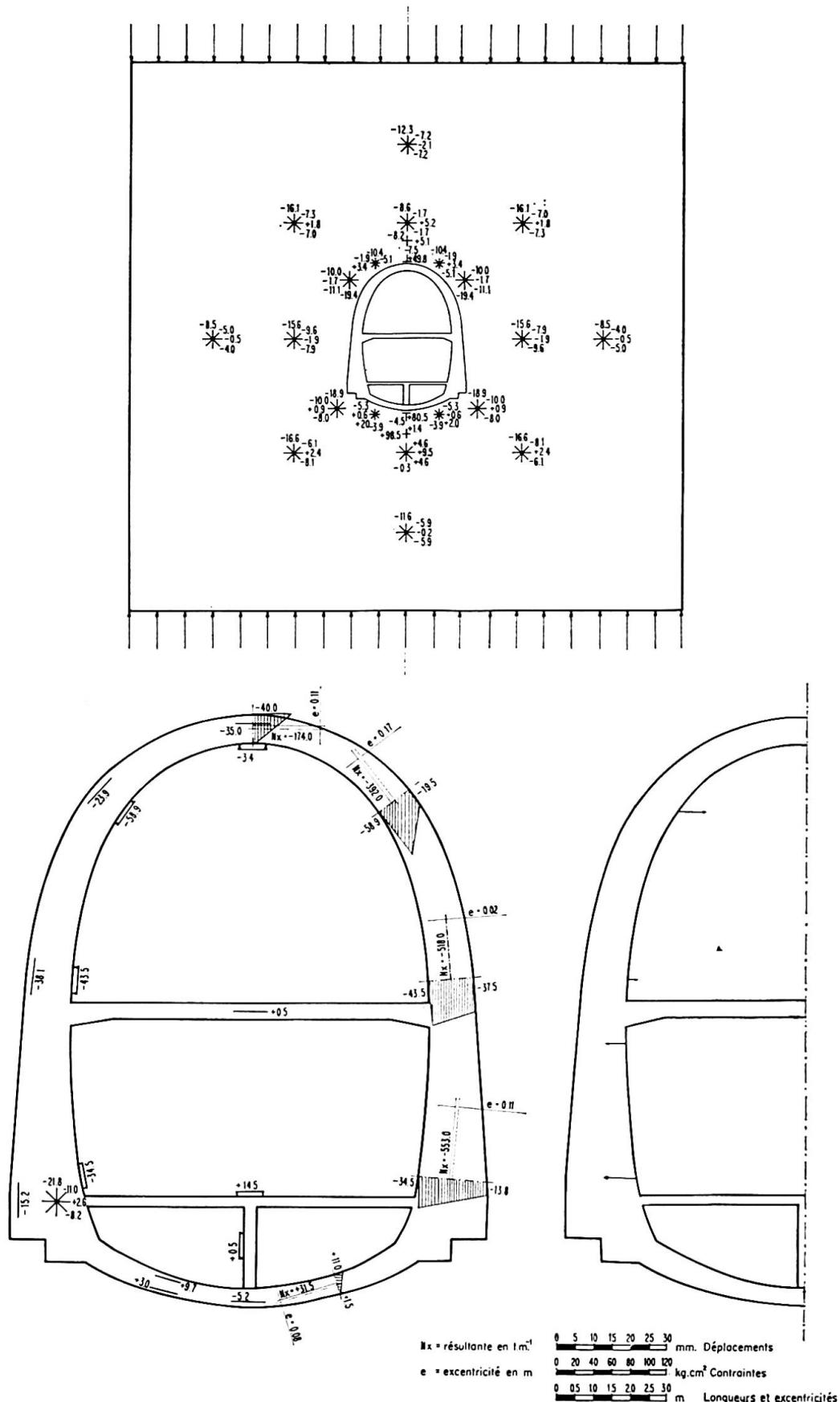


Fig. 6.

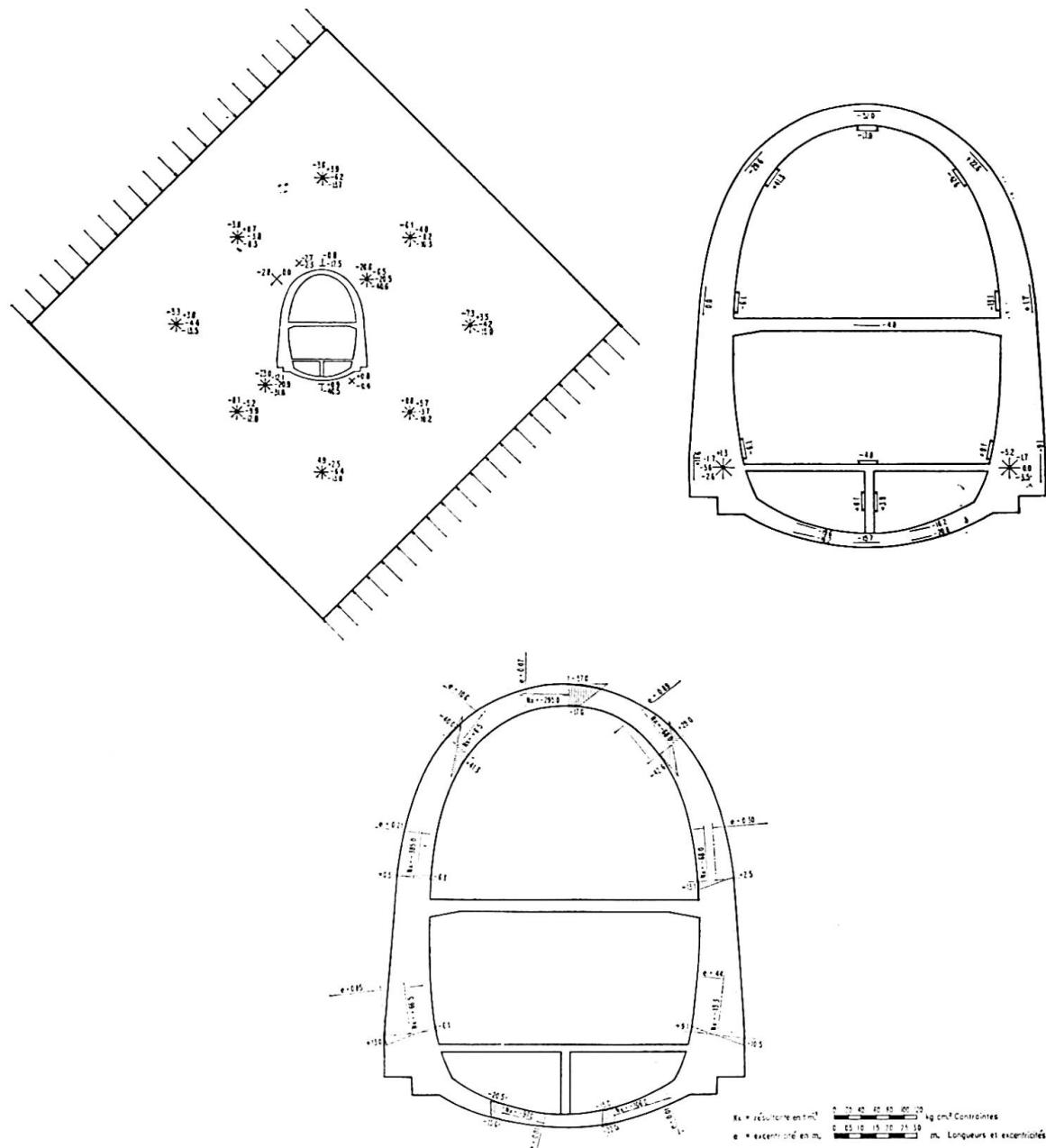


Fig. 7.

- La poussée horizontale n'est pas aussi défavorable. Le fonctionnement à bouton de la dalle de chaussée supérieure de l'autoroute s'avère à ce sujet d'une certaine efficacité.
- La poussée du terrain marneux sur le revêtement, détermine dans ce dernier des contraintes intermédiaires entre celles obtenues de la poussée verticale en roche et celles qui correspondent à une poussée de type hydrostatique. Une zone de faiblesse se manifeste dans la voûte inférieure. En se déformant, elle transmet par l'intermédiaire du mur médian à la dalle de chaussée inférieure une charge centrale qui crée une vaste zone microfissurée sur la face supérieure de cette dalle (fig. 8).

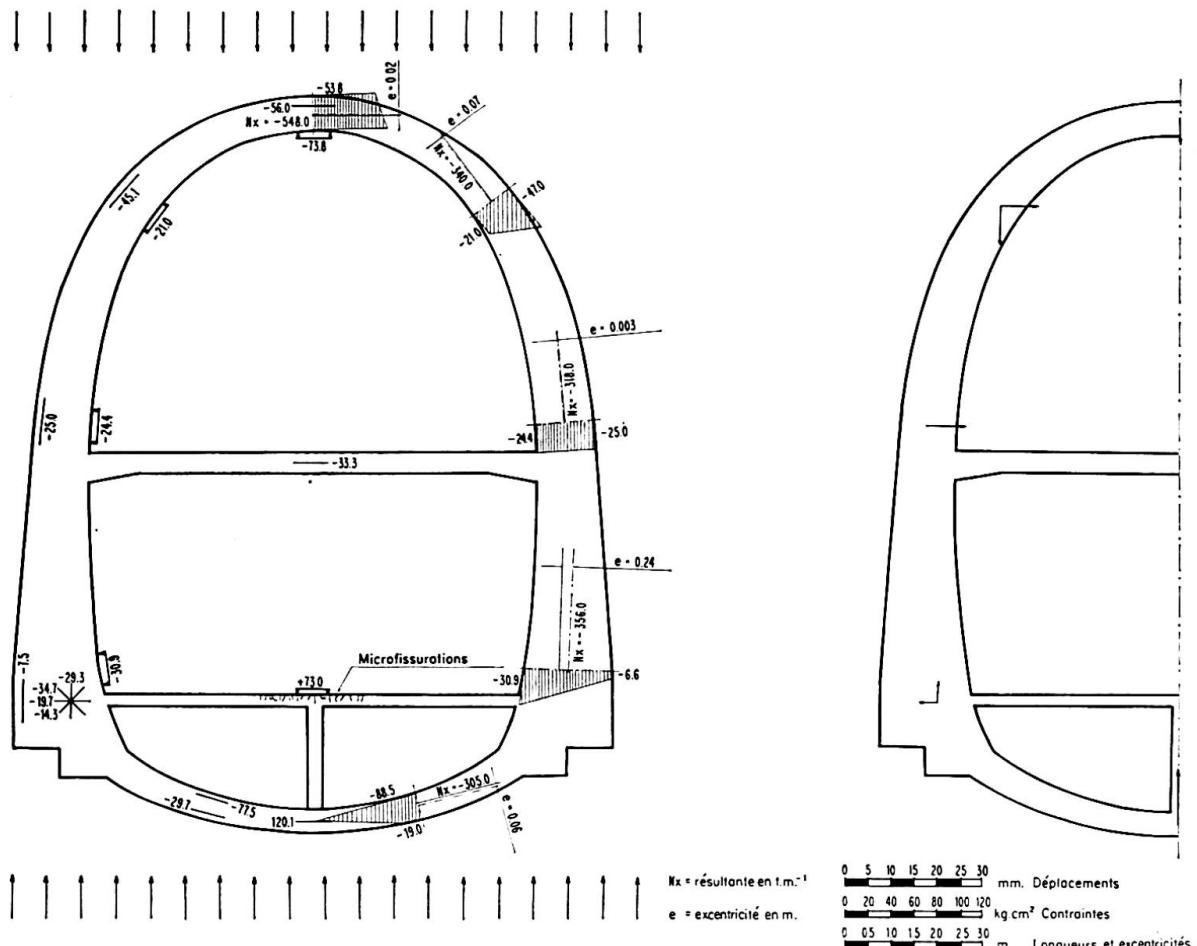


Fig. 8.

### Considérations finales

Les essais sur modèle ont montré la complexité des phénomènes statiques qui peuvent se développer dans le revêtement du tunnel.

L'examen des résultats dus au diagramme de charge à  $45^\circ$ , montre que la collaboration de la roche est quelquefois localisée: entre autres, aux points où les moments fléchissants sont les plus élevés, on a des sections du revêtement dans lesquelles les contraintes de traction d'intrados sont plus considérables que les contraintes de compression d'extrados.

On doit présumer que les diagrammes des contraintes se prolongent dans le rocher de manière à assurer une résultante d'équilibre à la compression déplacée vers l'intérieur du rocher, dont on doit considérer la collaboration.

Remarquons que quelquefois la roche avec sa cohésion intérieure collabore de façon efficace notamment dans les sections les plus faibles quand le béton entre en plasticité (ce qui n'arrive pas dans le cas de terrain incohérent). D'autre fois en clé de la voûte supérieure, par exemple, elle se dégage du revêtement et, sous l'effet de forces de traction assez fortes, se fissure en direc-

tion radiale, en tel cas un état de compression assez poussé se transmet néanmoins dans les sections correspondantes du revêtement d'une façon tout à fait indépendante.

Sans entrer dans des considérations d'ordre théorique, nous voyons que sous l'angle de l'application les essais sur modèle ont précisé le fonctionnement statique du revêtement, tout au moins pour les conditions de charge les plus générales et intéressantes et se sont avérés très utiles dans le cadre de l'économie du projet.

### Résumé

L'auteur décrit des essais effectués pour étudier le comportement statique du revêtement en béton armé du tunnel du col de la «Cisa», point culminant de l'autoroute Parme-La Spezia traversant les Apennins.

Les modèles géomécaniques, à l'échelle de 1:20, comprennent le revêtement en béton armé et un bloc de rocher ou de terrain qui l'enveloppe sur une assez grande étendue.

Les poussées ont été appliquées dans l'hypothèse de diagrammes de charge répartis dans la masse d'une manière uniforme et, pour le rocher en particulier, à orientation différente.

Les essais ont fourni les données d'évaluation nécessaires en vue de proportionner l'armature et les épaisseurs de béton en fonction des sollicitations que les types différents de roche et de charge engendrent probablement.

### Zusammenfassung

Die Versuche bezweckten, das statische Verhalten der Eisenbeton-Verkleidung des Scheiteltunnels des Cisa-Passes im Zuge der Apenninüberquerung der Parma-La-Spezia-Autobahn zu bestimmen.

Das geomechanische Modell umfaßte die Tunnelauskleidung und den daran angrenzenden Fels oder Erdboden, dessen Druck gleichmäßig verteilt, aber verschieden gerichtet, angenommen wurde.

Die Versuche ergaben die Zahlengrundlagen für die Bestimmung der Größe der Bewehrung und der Stärke der Betonquerschnitte im Zusammenhang mit den Spannungen, die voraussichtlich bei den verschiedenen Gesteinsarten und Belastungen auftreten können.

### Summary

The object of the tests was to determine the static behavior of the reinforced concrete liner of the topmost Cisa Pass tunnel of the Parma—La Spezia express-way crossing the Apennines.

The geomechanical model included the liner and the rock or soil surrounding it, whose pressure was assumed to be uniform but variously directed.

The tests yielded the data required for determining the size of the steel reinforcement and the thickness of the concrete in relation to the stresses which might presumably be originated by the various types of rock and loadings.