Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 36 (1976)

Artikel: Etude et essais sur modèle d'un caisson de réacteur en béton précontraint, à cavités multiples : synthèse des calculs et des essais sur modèle

Autor: Lafitte, R. / Saugy, B. / Vuilleumier, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921

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: 11.07.2025

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

PARTIE IV

Synthèse des calculs et des essais sur modèle

R. LAFITTE, sous-directeur, B. SAUGY, ingénieur, F. VUILLEUMIER, ingénieur principal
chez Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils S.A.

1. Introduction

Il convient de comparer les résultats obtenus par le calcul non linéaire du comportement du modèle du caisson, à l'aide d'un modèle mathématique, et les essais sur modèle physique à l'échelle 1/20, et d'en tirer des conclusions quant au caisson réel. Pour cela, les trois phases successives du comportement du modèle sont examinées:

— comportement globalement élastique; la limite de ce comportement est atteinte lorsque les déplacements deviennent non linéaires et irréversibles;
— phase de fissuration: elle est considérée comme achevée lorsque le réseau des fissures dans le béton est formé et qu'apparaissent les mécanismes entraînant la ruine du caisson;
— phase de ruine.

2. Comportement globalement élastique

Pour le modèle mathématique, la limite du comportement élastique se situe aux environs de 85 kg/cm^2 de pression intérieure, au moment où les premières fissures apparaissent dans la zone de convergence des turbines.

Pour le modèle physique, la limite du comportement globalement élastique apparaît à partir de 120 kg/cm^2. Les câbles de précontrainte n'ont pratiquement pas subi d'augmentation de tension. La valeur maximale de la tension des câbles les plus sollicités est estimée à 0,63 β_z (βz étant la contrainte de rupture de l'acier). La peau d'étanchéité qui suit la déformation du béton est encore peu sollicitée.

La part de pression, de 120 kg/cm^2, reprise par la peau, varie comme suit:

— cavité centrale: 7%;
— turbines: 11%;
— cavités périphériques: 12%;
— cavités périphériques extérieures: 16%.

En raison de la modélisation imparfaite dans la zone des turbines, l'analyse numérique surestime de 10% environ les forces qui agissent sur la dalle inférieure. Les caractéristiques du béton, prises en compte dans le calcul, sont plus faibles que celles réalisées sur le modèle physique (46 kg/cm^2 de résistance à la traction, au lieu de 65 kg/cm^2 au moment de l'essai). Si l'on introduit dans le modèle mathématique des caractéristiques de matériaux identiques à celles du modèle physique, la limite du comportement élastique est atteinte pour une pression de 115 kg/cm^2, donc très proche de celle résultant de l'essai.

3. Phase de fissuration

Pendant cette phase, le réseau des fissures se développe. La participation du béton à la reprise des efforts de traction diminue jusqu'à s'annuler, les charges étant progressivement reprises par les aciers de peau d'étanchéité et de précontrainte.

L'analyse numérique prend fin pour une pression de 133 kg/cm^2, par l'impossibilité de reprendre les efforts une fois le béton fissuré dans de larges zones. Cette valeur marque donc bien la limite de la participation du béton à la résistance.

Pour le *modèle physique*, la phase de fissuration, qui a débuté à 120 kg/cm^2, prend fin dès 165 kg/cm^2. A ce stade, le réseau principal des fissures apparaît clairement: fissure horizontale au milieu du fût et fissures verticales au droit des cavités périphériques. On commence à noter une augmentation de tension dans les câbles, notamment annulaires, qui atteint en moyenne 0,65 βz.

Il est malaisé de connaître de façon précise la pression reprise par la peau d'étanchéité; des plastifications locales peuvent fausser l'interprétation des valeurs fournies par les jauges de contraintes qui sont en nombre limité. On peut cependant estimer comme suit la part de pression reprise par la peau:

— cavité centrale: 7%;
— turbines: 13%;
— cavités périphériques: 20%;
— cavités périphériques extérieures: 21%.

L'écart entre les résultats des modèles mathématique et numérique provient, d'une part, de la différence des valeurs de rupture en traction du béton (la résistance du béton du modèle physique étant plus élevée que prévu), et, d'autre part, du fait que le réseau de calcul retenu ne prend pas en considération l'influence de la peau d'étanchéité lorsque la fissuration devient importante. Mais, si l'on ajuste la valeur fournie par le modèle mathématique en introduisant la valeur réelle de la résistance à la traction du béton, et la participation de la peau, la limite de fissuration atteint la valeur de 160 kg/cm^2.

4. Phase de ruine

Ainsi que nous l'avons vu précédemment pour le *modèle mathématique,* le calcul ne peut être poursuivi qu'en introduisant la rigidité des aciers, ou manuellement, sur la base du schéma de ruine qui est parfaitement déterminé. On constate que la rupture des câbles de précontrainte annulaires et des peaux d'étanchéité intervient pour une pression de l'ordre du 200 kg/cm^2.

A partir de 165 kg/cm^2, on constate que le *modèle physique* se déforme rapidement et que la peau d'étanchéité est fortement sollicitée. Elle se plastifie dans les cavités des turbines et les cavités périphériques extérieures, aux environs de 180 kg/cm^2. La tension dans les câbles annulaires du fût augmente rapidement. A partir de 210 kg/cm^2, les efforts engendrés par l'augmentation de pression sont intégralement repris par les aciers. Dès lors, et jusqu'à la rupture, le modèle se comporte latéralement comme une structure, composée d'un assemblage de blocs de béton dissociés, frettée par des éléments métalliques (câbles et peau). La ruine survient par la rupture d'un câble annulaire à 238 kg/cm^2, suivie de la rupture de la peau d'étanchéité des deux cavités périphériques extérieures à 240 kg/cm^2.

Dans la comparaison des deux moyens d'analyse, mathématique et physique, on peut noter la remarquable correspondance des réseaux de fissures obtenus par le calcul (fig. 3 de la 2e partie de l'exposé concernant le calcul non linéaire), et par l'essai sur modèle (photographies Nos 13, 14 et 15 de la 3e partie concernant les essais). C'est cette identité qui permet d'effectuer le calcul manuel des mécanismes de ruine, et de juger de l'influence des composantes de la structure sur la pression ultime.

5. Transposition des résultats au caisson réel

La limite du comportement élastique du caisson réel va se situer au-dessous de celle relevée sur le modèle physique, en raison de la résistance à la traction plus faible du béton. Cependant, la résistance plus grande de la dalle inférieure et la présence d'armatures passives permettent de réduire l'écart. On peut estimer que la limite du comportement élastique du caisson réel est voisine d'une pression intérieure de 110 kg/cm^2. Rapportée à la pression de test de 75 kg/cm^2, cette valeur correspond à un coefficient de sécurité de 1,5.

Dans la *phase de fissuration,* l'influence de différences sur la résistance à la traction du béton tend à diminuer; la limite de la phase de fissuration dépend, par contre, de la présence plus ou moins grande d'armatures passives. Nous avons vu dans l'examen du problème de similitude que, dans les sections les plus sollicitées, la quantité d'acier était pratiquement identique dans le modèle physique et dans le caisson réel. On doit cependant remarquer que, dans ce dernier, l'acier est mieux réparti dans la masse du béton, en raison de la présence des armatures passives, ce qui répartit la fissuration et retarde le développement des mécanismes de ruine. La limite de la phase de fissuration du caisson réel se situe donc au-dessus de celle déterminée par le modèle. On estime à 175 kg/cm^2 la pression correspondante, soit un coefficient de sécurité de 2,3 par rapport à la pression de test.

Dans la *phase de ruine*, le caisson réel est une structure entièrement fissurée, dans laquelle le réseau des fissures est fortement ramifié, du fait de la présence des armatures passives et de l'ancrage de la peau d'étanchéité. Les mécanismes de ruine n'apparaissent pas avec autant de clarté que dans les modèles. Le caisson se comporte comme une structure plus plastique dont les déformations croissent plus rapidement. On estime que la ruine du caisson par rupture des câbles ou de la peau d'étanchéité, moins résistante dans le caisson réel, devrait survenir pour une pression un peu inférieure à celle enregistrée lors de l'essai sur modèle. Elle serait de l'ordre de 220 kg/cm^2, ce qui représente un coefficient de sécurité de 2,9 par rapport à la pression de test.

6. Conclusions générales

6.1. Les études et essais sur modèle ont confirmé que la structure en béton précontraint d'un caisson à cavités multiples, particulièrement complexe, était réalisable avec la sécurité voulue.

6.2. La sécurité à la rupture admissible, rapport de la pression entraînant la ruine du caisson (rupture de câbles de précontrainte et perte d'étanchéité)

à la pression de test (pression maximale dans le circuit d'hélium majorée de 15%), était fixée à 2,5. Les calculs et essais ont montré que le caisson projeté avait une sécurité de 2,9.

6.3. Trois phases dans le comportement du caisson réel ont pu être distinguées:

— comportement globalement élastique, jusqu'à une pression intérieure de 110 kg/cm^2, égale à 1,5 fois la pression de test (75 kg/cm^2);
— phase de fissuration jusqu'à une pression de 175 kg/cm^2, égale à 2,3 fois la pression de test;
— phase de ruine se terminant par la rupture du caisson pour une pression de 220 kg/cm^2, égale à 2,9 fois la pression de test.

6.4 La limite du comportement globalement élastique du caisson est fonction, principalement, de la résistance à la traction du béton.

On constate que l'on peut agir sur la fin de la phase de fissuration en modifiant la quantité d'armatures passives.

Enfin, on dispose d'une certaine liberté d'action sur le coefficient de sécurité à la rupture en modifiant la quantité de précontrainte annulaire. Cette marge, à l'intérieur de laquelle les résultats de la présente étude sont garantis, est estimée à $\pm 10\%$.

6.5 La rupture du modèle s'est produite dans le fût du caisson par éjection des éléments du béton entre cavités extérieures, éléments qui se trouvaient dans un milieu tendu dans toutes les directions. Cette rupture est intervenue dans la zone du caisson dont le comportement est le mieux connu, ce qui est satisfaisant pour la conception du projet final.

6.6 Les calculs manuels des mécanismes de ruine effectués sur le caisson de référence ont conduit à un résultat qui s'est trouvé globalement confirmé par les modèles. On notera surtout la remarquable correspondance entre le réseau de fissures calculé à l'aide du modèle mathématique et celui obtenu sur le modèle physique. Ce résultat valorise fortement le modèle mathématique comme moyen de démonstration de la sécurité d'un caisson.

Références

1. ZIENKIEWICZ, O.C.: The Finite Element Method. Mc.-Graw-Hill, 1971.
2. HUSSAIN, M., SAUGY, B., et ZIMMERMANN, Th.: Analyse tridimensionnelle du Comportement non linéaire d'un Caisson de Réacteur nucléaire en Béton précontraint. 1st Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, 1971.
3. SAUGY, B., ZIMMERMANN, Th., et HUSSAIN, M.: Three-Dimensional Rupture Analysis of a Prestressed Concrete Pressure Vessel Including Creep Effect. 2nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, 1973.
4. SAUGY, B., et ZIMMERMANN, Th.: Analyse non linéaire des Structures massives. Annales ITBTP, avril 1972.
5. SAUGY, B.: Contribution à l'Etude théorique du Comportement non linéaire des Structures massives en Béton armé sous Charges rapides. Bulletin technique de la Suisse romande, N° 22, 1969.
6. SAUGY, B., et ZIMMERMANN, Th.: The Finite Element Method Applied to Massive Heterogeneous Structures. Int-Rep 71, presented at Conference on Computational Aspect of the Finite Element Method at ISD, 1971.
7. REBORA, B., ZIMMERMANN, Th., et WOLF, J.-P.: Dynamic Rupture Analysis of Reinforced Concrete Shells. ELCALAP-Seminar, Berlin, 1975.

Résumé

Afin de démontrer que la structure en béton précontraint d'un caisson à cavités multiples d'une centrale nucléaire est réalisable avec une sécurité suffisante, par rapport à la pression de test p, une étude comportant un essai sur modèle à l'échelle 1/20 et une analyse numérique non linéaire par éléments finis tridimensionnels a été réalisée.

Le comportement du caisson est globalement élastique jusqu'à une pression intérieure de 110 kg/cm^2 (1,5 p) et il se rompt à une pression de 220 kg/cm^2 (2,9 p).

Les schémas de ruine obtenus par le calcul et par le modèle sont remarquablement semblables; ce résultat confirme la validité du modèle mathématique comme moyen de démonstration de la sécurité du caisson.

Cette étude montre l'intérêt d'une collaboration étroite entre le projeteur, le laboratoire d'essais et les analystes.

Zusammenfassung

Zum Beweis, dass ein von zahlreichen Hohlräumen durchsetztes Reaktordruckgefäss aus vorgespanntem Beton für ein Kernkraftwerk, bezogen auf den Versuchsdruck p mit genügender Sicherheit ausführbar ist, wurde eine Studie an einem Modell im Masstab 1:20 und eine nichtlineare numerische Berechnung mittels dreidimensionaler finiter Elemente durchgeführt.

Es zeigte sich, dass das Druckgefäss bis zu einem Innendruck von 110 kg/cm^2 (1,5 p) elastisch ist und bei einem Druck von 220 kg/cm^2 (2,9 p) zu Bruch geht.

Die durch Rechnung und am Modell erhaltenen Versagensdiagramme zeigen sehr gute Übereinstimmung; dieses Resultat bestätigt die Gültigkeit des mathematischen Modells für den Sicherheitsnachweis des Druckgefässes.

Die vorliegende Untersuchung zeigt die Bedeutung einer engen Zusammenarbeit zwischen Projektersteller, Versuchslaboratorium und Berechner.

Summary

To prove that the prestressed concrete structure of a pressure vessel with multiple cavities of a nuclear plant is feasible with a sufficient safety in relation with the test pressure p, a study including a model test at a scale 1:20 and a non-linear numerical analysis with tridimensional finite elements has been achieved.

The behaviour of the vessel is mainly elastic up to an inside pressure of 110 kg/cm^2 (1.5 p) and rupture happens for a pressure of 220 kg/cm^2 (2.9 p).

The rupture patterns computed and obtained by the model are remarkably similar; this result confirms the validity of the mathematical model as a mean to demonstrate the safety of the pressure vessel.

This study shows the interest of a close collaboration between the designer, the tests laboratory and the analysts.