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

Band: 7 (1964)

Artikel: Essais de poutres en béton armé en phase plastique

Autor: Maldague, J.C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-7903

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: 09.01.2026

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

Vb1

Essais de poutres en béton armé en phase plastique

Versuche an Stahlbetonbalken im plastischen Bereich

Tests of Reinforced Concrete Beams in the Plastic Range

J. C. MALDAGUE
Paris

Les essais dont il est partiellement rendu compte dans cet exposé font partie d'un programme établi par le Comité Européen du Béton, dans le but de définir les rotations dont sont capables les articulations plastiques des poutres en béton armé. Ils ont été réalisés à l'Institut de Recherches Appliquées du Béton Armé à Paris, sous la direction de M. Y. Guyon.

1. Programme et exécution des essais

Les caractéristiques des 23 poutres essayées, ainsi que les caractères mécaniques des matériaux utilisés font l'objet du Tableau I.

Les rotations des sections ont été mesurées à l'aide de clinomètres à cordes vibrantes, jusqu'à la rupture, ou presque; les flèches, par des comparateurs; les raccourcissements du béton et les allongements de l'acier par des extensomètres à cordes vibrantes. La fig. 1 montre la disposition des appareils sur les poutres sollicitées par une seule charge concentrée.

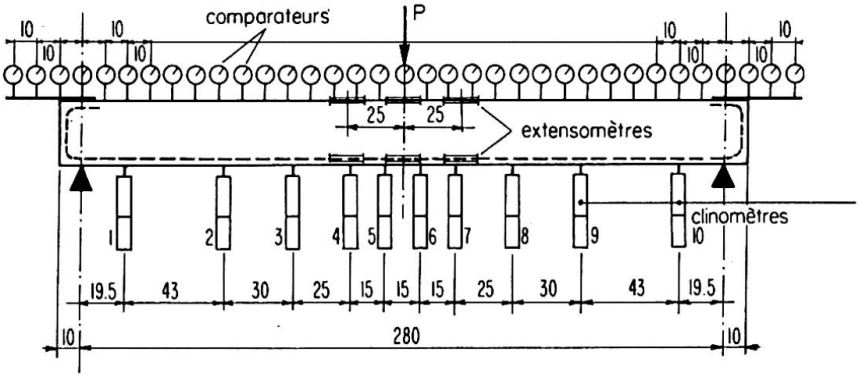


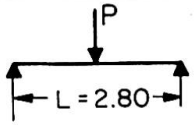
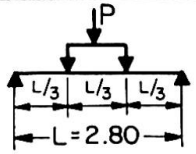
Fig. 1.

2. Résultats des mesures

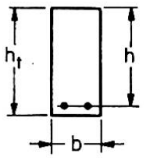
Les résultats des mesures, rassemblés dans le Tableau II ne concernent que la phase plastique. Dans ce Tableau figurent:

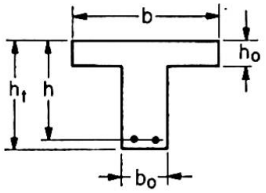
a) La valeur du *moment de plastification* expérimental. C'est le moment de flexion qui marque la fin de la phase de fissuration et le début de la phase

Tableau I

Poutre n°	Section					Armature principale		Caractères mécaniques de l'acier tendu			Résistance à la compression du béton $\sigma_{cyl.}$ kg/cm²	Cadres	Mode de chargement Portée m
	b cm	h_t cm	h cm	b_0 cm	h_0 cm	Traction	Compression	kg/mm²	kg/mm²	%			
A 2	25,1	27,9	25,3	—	—	2 ϕ 14	2 ϕ 14	27,7	41,0	35,7	318	ϕ 5 mm $t = 20$ cm	
A 5	15,1	28,0	24,5	—	—	6 ϕ 14	2 ϕ 6	27,8	41,1	36,6	338		
A 8	15,1	28,0	26,0	—	—	4 ϕ 10		26,2	38,0	37,7	338		
A 11	29,9	27,9	25,8	15,0	9,9	4 ϕ 10		25,7	37,7	38,6	326		
B 2	25,3	28,0	25,2	—	—	2 ϕ 14	2 ϕ 14	27,1	40,4	39,1	333		
B 5	15,2	28,0	24,4	—	—	6 ϕ 14	2 ϕ 6	26,6	40,4	37,0	310		
B 8	15,2	28,1	25,7	—	—	4 ϕ 10		26,8	38,2	39,3	310		
B 11	29,0	28,1	25,5	15,0	10,0	4 ϕ 10		26,3	38,3	37,9	310		
E 6	15,0	28,0	24,4	—	—	6 T 12	2 ϕ 6	53,0	65,0	15,1	258		
E 9	15,0	28,0	25,6	—	—	4 T 8		52,7	60,0	15,1	253		
F 6	15,0	28,0	24,4	—	—	6 T 12		51,9	64,9	17,1	415		
F 9	15,0	28,0	25,3	—	—	4 T 8		49,9	60,1	16,2	450		
H 2	25,0	28,0	25,7	—	—	2 T 14	2 T 14	50,6	61,8	16,3	308	ϕ 3 mm $t = 20$ cm	
H 5	15,0	28,0	24,6	—	—	6 T 14	2 ϕ 6	49,6	61,5	17,6	287		
H 8	15,0	28,0	25,3	—	—	4 T 10		47,5	58,1	18,9	295		
H 11	30,0	27,9	25,4	15,0	10,0	4 T 10		47,1	58,2	19,1	290		
N 2	30,0	14,0	11,4	—	—	2 T 14	2 T 14	50,0	62,0	17,3	288	ϕ 5 mm $t = 20$ cm	
N 5	30,0	14,0	10,3	—	—	6 T 14	2 ϕ 6	50,4	61,5	16,9	265		
N 8	30,0	14,0	11,3	—	—	4 T 10		47,6	58,4	19,4	305		
N 9	30,0	14,0	11,3	—	—	4 T 8		50,2	59,3	16,2	320		
R 4	15,0	28,0	23,7	—	—	6 T 16	4 T 10	47,5	57,7	16,4	292		
R 5	15,0	28,0	24,5	—	—	6 T 14	3 T 10	50,6	61,9	17,2	317		
R 6	15,0	28,0	24,6	—	—	6 T 12	1 T 10 + 2 T 8	52,6	65,2	17,0	387		

ϕ = acier doux
T = acier TOR
t = espacement des cadres





plastique. Au cours de l'essai, il ne se manifeste par aucune modification apparente des matériaux qui constituent la poutre, mais il peut être défini à partir d'un certain nombre d'*indices de plastification*, tous concordants, mis en lumière par l'examen des mesures effectuées. Il s'agit, en particulier:

— Du changement de pente des courbes qui représentent les déformations (flèches, rotations des sections, etc.) pour une même valeur du moment de flexion, précisément appelé moment de plastification.

— Du fait que le nombre des fissures de flexion cesse de croître lorsque la poutre équilibre ce moment de plastification, alors que les ouvertures des fissures situées dans la ou les régions qui se plastifient, augmentent dans des proportions importantes.

C'est ce que montrent, à titre d'exemple, les figures 2 à 6 relatives à la poutre A 8 et qui donnent, en fonction du rapport $\frac{P}{P_r}$, de la charge appliquée à la charge de rupture, les courbes de la flèche maximale (fig. 2), des rotations totales, définies ci-dessous (fig. 3), des déformations du béton et de l'acier dans l'axe de la poutre (fig. 4), des ouvertures des fissures (fig. 5).

Le changement de pente des quatre courbes, de même que le début d'accroissement d'ouverture des fissures se produit pour $P = 0{,}94\, P_r$ qui correspond

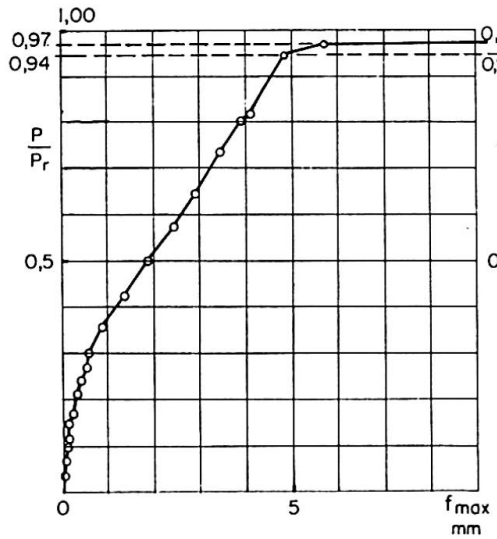


Fig. 2.

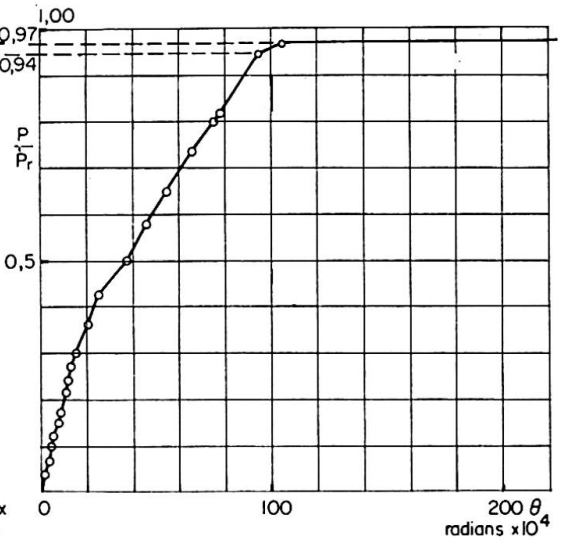


Fig. 3.

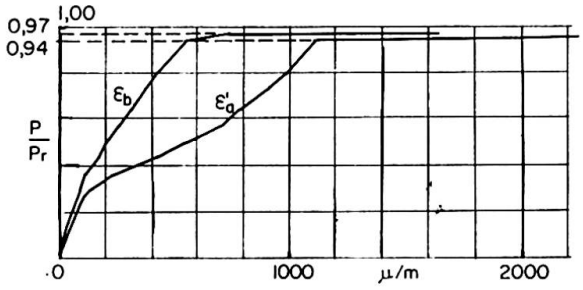


Fig. 4.

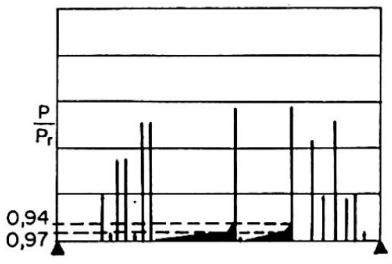


Fig. 5.

Tableau II

Poutre n°	Pourcentage d'acier tendu %	M_p kgm	M_e kgm	M_r kgm	θ_p	θ_e	θ_r	$\theta_e - \theta_p$	$\theta_r - \theta_p$
					Radians $\times \overline{10}^4$				
A 2	0,487	2294	2532	2707	140,2	340,8	875,1	200,6	734,9
A 5	2,500	5728	5938	6127	155,5	193,9	357,2	38,4	201,7
A 8	0,790	2417	2493	2558	94,3	337,3	863,7	243,0	769,4
A 11	0,415	2500	2510	2619	88,4	280,4	812,4	192,0	724,0
B 2	0,480	2090	(1)	2372	86,4	(1)	836,3	(1)	749,9
B 5	2,540	5318	5831	5925	195,3	447,3	712,4	252,0 (2)	517,1 (2)
B 8	0,820	2265	(1)	2331	132,1	(1)	618,0	(1)	485,9
B 11	0,410	2329	2462	2486	101,2	510,1	624,7	408,9	523,5
E 6	1,840	8318	8675	8815	254,1	369,7	(3)	115,6	(3)
E 9	0,523	2599	(1)	3054	136,0	(1)	493,0	(1)	357
F 6	1,840	7828	8962	9354	147,2	246,3	(3)	99,1	(3)
F 9	0,525	2606	3033	3089	121,2	404,9	(3)	283,7	(3)
H 2	0,481	4212	4454	5136	180,0	264,6	> 558 (6)	84,6	> 378 (6)
H 5	2,500	8598 (4)	9144	9704	264,0	312,7	398,3	48,7	134,3
H 8	0,795	3656	4230	4503	172,0	342,7	> 706,7 (6)	170,7	> 534,7 (6)
H 11	0,410	3683	4491	4701	128,2	371,0	(3)	242,8	(3)
N 2	0,900	1570	1927	1952	345,5	571,7	1001,2	226,2	655,7
N 5	2,950	3009	(1)	3707	434,3	(1)	662,6	(1)	228,3
N 8	0,910	1710	1836	2029	402,7	661,8	(3)	259,1	(3)
N 9	0,580	1164	(1)	1324	343,7	(1)	642,5	(1)	298,8
R 4	3,290	11020 (4)(5)	12049	13008	267,3	313,7	398,9	46,4	131,6
R 5	2,510	9172 (4)(5)	10768	11356	255,6	337,1	493,1	81,5	237,4
R 6	1,840	7856 (5)	8479	8913	246,1	292,0	559,3	45,9	313,2

(1) L'épaufrement n'a été observé que pour la charge de rupture.
(2) Ces valeurs qui paraissent exceptionnelles ne sont pas portées sur la fig. 9.
(3) Mesure impossible.
(4) Très grandes ouvertures des fissures d'effort tranchant.
(5) Indices de plastification difficiles à déceler.
(6) Mesure précédent immédiatement la rupture.

environ à $M = 0{,}94\, M_r$. Ce point appartient encore à la phase de fissuration dont il marque la fin. Pour $P = 0{,}97\, P_r$, la poutre commence à fonctionner en régime plastique. Le changement de phase se produit pour un très faible accroissement de charge (3%). Entre ces deux charges, c'est à dire presque instantanément, l'acier manifeste un allongement très important alors que le raccourcissement du béton varie très peu (voir fig. 4).

La fig. 6 représente les rotations mesurées le long de la poutre, portées en ordonnées, pour chaque valeur du rapport $\frac{P}{P_r}$. A partir de $0{,}97\, P_r$, les courbes se déplacent parallèlement à elles-mêmes dans les régions non plastifiées, ce qui prouve que les déformations de ces régions, qui fonctionnent en régime fissuré élastique, deviennent négligeables devant l'importance des déformations plastiques concentrées dans l'articulation.

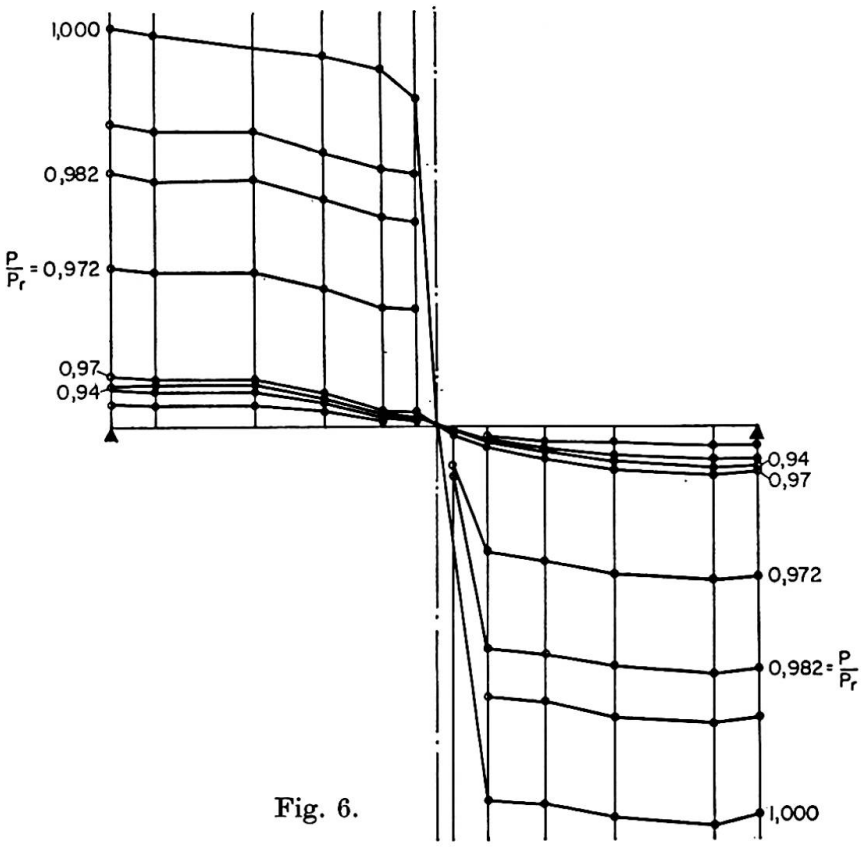


Fig. 6.

La poutre A 8, armée à 0,8% d'acier doux a été choisie à dessein pour illustrer l'existence de ces indices de plastification. Dans les poutres armées d'acier écroui à froid, sans palier d'écoulement, les changements de pente des graphiques sont moins brusques mais nettement repérables. Lorsque le pourcentage d'acier va croissant, ces indices demeurent visibles mais la précision avec laquelle ils permettent de définir le moment de plastification va en diminuant jusqu'à prêter à discussion dans le cas de pourcentages excessifs.

Enfin, les fig. 7 et 8 donnent, pour l'ensemble des poutres, les points repré-

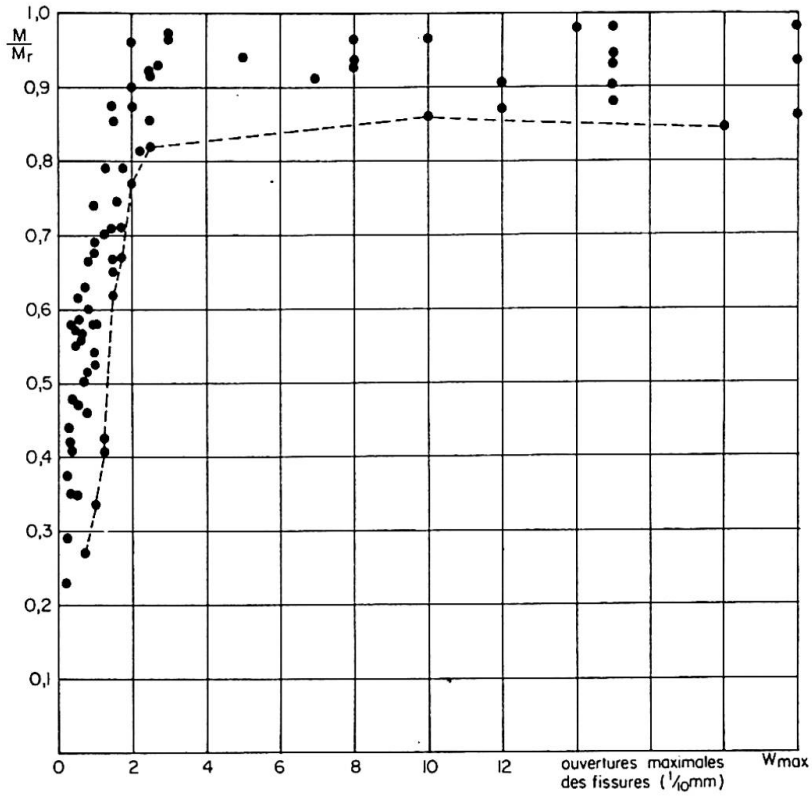


Fig. 7. (Poutres armées d'acier doux).

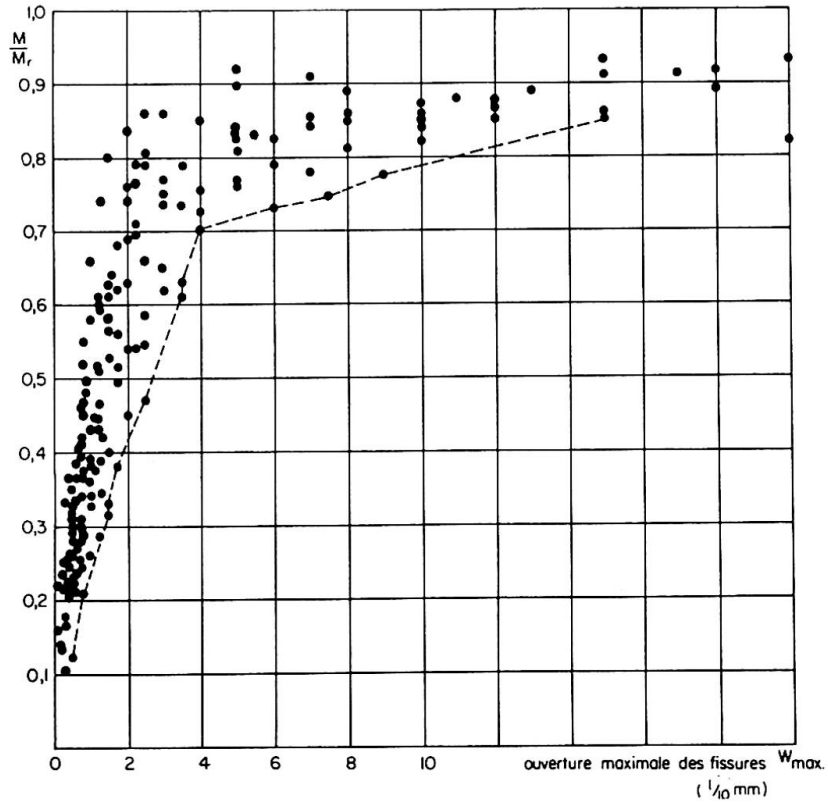


Fig. 8. (Poutres armées d'acier TOR).

sentant les ouvertures maximales des fissures en fonction du rapport entre le moment de flexion calculé au droit de la fissure, pour la charge sous laquelle l'ouverture est mesurée et le moment de rupture de cette même section. Ces graphiques donnent une idée de l'importance des ouvertures des fissures lorsque la poutre est sollicitée par le moment de plastification.

b) La valeur du *moment d'épaufrement* qui marque le début de la désorganisation visible du béton comprimé: petites fissures horizontales, sur les faces latérales, et léger soulèvement d'une écaille de béton sur la face supérieure de la poutre.

Les premiers signes de la destruction ont échappé quelquefois à l'observation la plus attentive. Dans d'autres cas, l'épaufrement a été observé en même temps que la rupture. Il est probable que la vitesse d'application des charges joue un certain rôle dans la marge qui sépare les premiers signes de rupture de la rupture complète.

c) La valeur du *moment de rupture*, défini comme étant le moment maximal atteint au cours de l'essai et correspondant à la désorganisation complète du béton comprimé. C'est le moment qui peut être calculé par les méthodes de calcul à rupture des sections.

d) La valeur des *rotations totales* mesurées lorsque la poutre est soumise au moment de plastification (θ_p), au moment d'épaufrement (θ_e) et au moment de rupture (θ_r) précédemment définis. Elles représentent la somme des rotations mesurées par les clinomètres n° 1 et 10 (voir fig. 1) c'est-à-dire, pratiquement, la somme des rotations des sections d'appui.

e) Les valeurs des différences ($\theta_e - \theta_p$) et ($\theta_r - \theta_p$) qui représentent la *capacité de rotation* de l'articulation plastique entre le début de la plastification et le début de la désorganisation (épaufrement) ou la rupture. Toutes ces rotations sont exprimées en radians $\times \overline{10}^4$.

La fig. 9 qui donne les capacités de rotation précédentes en fonction du pourcentage d'acier montre que celles-ci diminuent lorsque le pourcentage augmente.

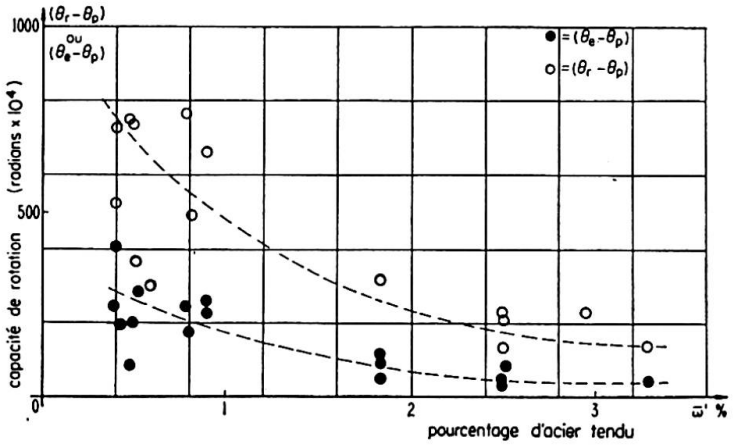


Fig. 9.

3. Calcul du moment de plastification

La connaissance du moment de plastification d'une poutre est nécessaire à la définition des lois de déformation en phase plastique dont ce moment marque le début. Elle est par ailleurs indispensable à certaines méthodes de calcul des systèmes hyperstatiques auxquelles il sert de références [1].

Lorsque le pourcentage d'armature tendue n'est pas excessif, c'est l'acier qui se plastifie le premier. Il pourrait sembler normal de définir le moment de plastification comme le moment de flexion pour lequel *apparaît* la plastification des aciers. Mais cette définition n'est pas en accord avec l'expérience. Ainsi, le moment qui correspond au début du palier d'écoulement, dans la poutre A 8 est égal à $0{,}74\,M_r$ alors que le moment de plastification est égal à $0{,}94\,M_r$. Cette constatation faite systématiquement, conduit à émettre l'hypothèse suivante:

Le moment de plastification d'une poutre en béton armé est obtenu lorsque le raccourcissement du béton comprimé atteint une certaine valeur ϵ_0 (que l'on peut appeler *raccourcissement de plastification*), cette hypothèse étant valable quel que soit le pourcentage d'acier, à partir du minimum pour lequel le moment résistant de la section homogène de béton seul est égal au moment résistant de la section fissurée armée, jusqu'au pourcentage critique supérieur.

Cette hypothèse implique, dans le cas des poutres armées selon les pourcentages de la pratique, que l'acier, ayant atteint sa phase plastique, se soit allongé d'une quantité suffisante pour que le béton se plastifie à son tour. En d'autres termes, le changement de comportement de la poutre, qui se traduit par de nouvelles lois de déformation, dépend finalement du béton comprimé.

La méthode de calcul utilisée pour déterminer l'expression théorique du moment de plastification a été développée par plusieurs auteurs [2]. Elle suppose que le diagramme contraintes-déformations du béton comprimé puisse être assimilé à une parabole du second degré dont le sommet se trouve hors de la poutre dans le cas de faibles charges. Nous supposons que ce sommet se situe au niveau de la fibre la plus comprimée lorsque le béton atteint son raccourcissement de plastification ϵ_0 (fig. 10) et que la contrainte maximale de compression qui sollicite la poutre est égale à la résistance du béton en compression σ_0 mesurée sur cylindres. Dans ce cas:

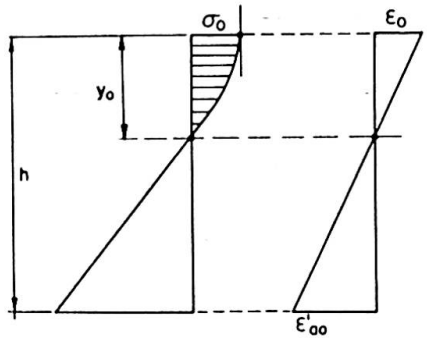


Fig. 10.

$$M_p = \tfrac{2}{3}\sigma_0 b\, y_0 (h - \tfrac{3}{8} y_0), \tag{1}$$

$$y_0 = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 + \epsilon'_{a0}} h. \tag{2}$$

L'allongement ϵ'_{a0} de l'acier, correspondant au raccourcissement ϵ_0 du béton a été défini graphiquement par l'intersection du diagramme réel de traction de l'acier et de l'hyperbole:

$$\sigma'_a = \frac{2\,\sigma_0\,\epsilon_0}{3\,\bar{\omega}'\,(\epsilon_0 + \epsilon'_a)} \tag{3}$$

définie par les conditions d'équilibre des forces internes et dans laquelle $\bar{\omega}'$ est le pourcentage d'acier, σ'_a et ϵ'_a respectivement la contrainte et l'allongement de l'acier.

La valeur du raccourcissement ϵ_0 a fait l'objet de plusieurs propositions. Nous avons utilisé celle du Dr Y. SAILLARD (2):

$$\epsilon_0 = 0{,}12 \times 10^{-3} \sqrt{\sigma_0}, \tag{4}$$

Tableau III

Poutre n°	Pourcentage d'acier %	$\epsilon_0 \times 10^3$	$\epsilon'_{a0} \times 10^3$	Moment de plastification		$\frac{M_p \text{ exp.}}{M_p \text{ th.}}$
				expérimental kgm	théorique kgm	
A 2	0,487	2,14	31,5	2294	2130	1,08
A 5	2,500	2,20	5,00	5728	5500	1,04
A 8	0,790	2,20	21,00	2417	2150	1,12
A 11	0,415	2,17	39,5	2500	2255	1,11
B 2	0,480	2,20	34,0	2090	2150	0,97
B 5	2,540	2,11	4,0	5318	5500	0,97
B 8	0,820	2,11	17,5	2265	2100	1,08
B 11	0,410	2,11	34,5	2329	2300	1,01
E 6	1,840	1,93	2,25	8318	5940	1,40
E 9	0,523	1,91	9,00	2599	2730	0,95
F 6	1,840	2,45	4,45	7828	7700	1,02
F 9	0,525	2,55	23,00	2606	2825	0,92
H 2	0,481	2,10	13,8	4212	4250	0,99
H 5	2,500	2,04	1,92	8598	7250	1,19
H 8	0,795	2,06	8,25	3656	3350	1,09
H 11	0,410	2,05	17,2	3683	3850	0,96
N 2	0,900	2,05	7,17	1570	1520	1,03
N 5	2,950	1,96	1,80	3009	2450	1,23
N 8	0,910	2,10	7,50	1710	1620	1,06
N 9	0,580	2,15	12,80	1164	1150	1,01
R 4	3,290	2,05	1,60	11020	7800	1,41
R 5	2,510	2,13	2,10	9172	7800	1,18
R 6	1,840	2,35	3,92	7856	7520	1,04

Elle conduit, pour les bétons réalisés dans cette série d'essais à des valeurs un peu supérieures à $2{,}0 \times 10^{-3}$. (Valeur proposée par M. Y. Guyon.)

Le Tableau III donne, en particulier, le rapport entre le moment de plastification expérimental et le même moment calculé. On constate, pour 18 poutres sur 23, une concordance qui semble justifier l'hypothèse faite sur le rôle déterminant du béton en ce qui concerne le seuil de plastification d'une poutre en béton armé. L'écart ne dépasse pas 12%.

Pour cinq poutres (E 6, H 5, N 5, R 4 et R 5), l'écart est important. Il convient de remarquer que les pourcentages d'armature de ces poutres sont parmi les plus élevés et que l'acier, selon les diagrammes de traction dont nous disposons, travaille encore en régime élastique.

Par ailleurs, il n'a pas été tenu compte des aciers comprimés dans les calculs. Il est probable qu'ils ont une influence sur le moment de plastification (cas de R 4 et R 5 par exemple), mais les résultats dont nous disposons ne sont pas suffisamment nombreux pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions. Selon ces premiers résultats, l'hypothèse ne semble applicable ni aux poutres dont le pourcentage d'acier tendu est voisin du pourcentage critique supérieur, ni aux poutres armées d'une quantité suffisante d'aciers comprimés.

Notations

P = charge concentrée.
P_r = charge de rupture.
M = moment de flexion.
M_p = moment de plastification.
M_e = moment d'épaufrement (début de la désorganisation du béton comprimé).
M_r = moment de rupture.
h_t = hauteur totale de la poutre.
h = hauteur utile.
b = largeur poutre (section rect.).
= largeur table (poutre en té).
b_0 = largeur nervure (poutre en té).
h_0 = épaisseur table de compression.
L = portée de la poutre.
ϕ = désigne un acier doux. Ex.: $2\phi 14$.
T = désigne un acier Tor: 2 T 14.
t = espacement des armatures transversales.
y_0 = position de l'axe neutre dans une section sollicitée par le moment de plastification.
θ_p = rotation due au moment de plastification.
θ_e = rotation due au moment d'épaufrement.

θ_r = rotation due au moment de rupture.
$\bar{\omega}'$ = pourcentage d'acier tendu.
σ_0 = contrainte de compression dans le béton lorsque le moment de plastification est appliqué.
$\sigma_{cyl.}$ = résistance du béton à la compression, mesurée sur cylindre.
σ'_a = contrainte de l'acier tendu.
ϵ'_a = allongement de l'acier.
ϵ_0 = raccourcissement de plastification du béton.
ϵ'_{a0} = allongement de l'acier correspondant au raccourcissement ϵ_0 du béton.

Bibliographie

1. M. Z. Cohn and V. A. Petcu: "Influence of steel percentage on the plastic adaptability of redundant reinforced concrete beams." Bull. Acad. Pol. Sci., Serie Sci. Techn. nº 10—11, 1961.
2. Y. Saillard: «L'épuisement du béton armé en flexion simple.» CEB 1955.

Résumé

Le but des ces essais, dont le programme a été établi par le CEB, est de mesurer les rotations des articulations plastiques. Ces mesures sont données dans le texte. Une hypothèse est ensuite faite, permettant le calcul du moment de plastification d'une poutre en béton armé.

Zusammenfassung

Auf Grund von Versuchen, deren Programm vom CEB aufgestellt worden war, sind die Verdrehungen in den plastischen Gelenken gemessen worden. Die Ergebnisse sind in der Arbeit dargelegt. Es wird eine Hypothese aufgestellt, die die Berechnung der plastischen Momente in Stahlbetonbalken ermöglicht.

Summary

The purpose of these tests, the program of which was set-up by the European Concrete Committee (C.E.B.), is to measure the rotations of the plastic hinges. The results of the measurements are given in the text. An hypothesis is then made, which permits the calculation of the plastic moment of a reinforced concrete beam.

Leere Seite
Blank page
Page vide