

1. まえがき

Nielsen 等によって提案されている塑性理論を応用した鉄筋コンクリートはりのせん断破壊理論は、実験的に確認されている多くの事実を少くとも定性的には説明する事ができるものであって、この種の理論も基礎とした実用設計法が今後用いられるようになる可能性も大であると思われる。本文は、Nielsen 等の理論の妥当性を実験的に検討した結果を述べるものである。

2. Nielsen の提案式

曲げによる軸方向鉄筋の降伏が先行しない場合のせん断強度を与える式は次のとおりである。

$$\tau_u / \nu f_c' = \sqrt{\psi / \nu (1 - \psi / \nu)} \quad \text{ただし } \psi = A_{sv} f_{yv} / b_w \Delta f_c' \quad \text{----- (1)}$$

$$\tau_u / \nu f_c' = 1/2 [\sqrt{1 + (q/\nu)^2} - q/\nu] + \psi / \nu \cdot q/\nu \quad \text{----- (2)}$$

$$\tau_u / \nu f_c' = 1/2, \quad \psi / \nu > 1/2 \quad \text{----- (3)}$$

ここで (2) 式は、最小の強度を与える降伏線の角度 (β) が $\tan^{-1}(\nu/q)$ よりも小さくなってしまふ場合に適用されるものである。(1), (2) 式は腹鉄筋が降伏した後、(3) は腹鉄筋降伏前に破壊が生ずるとしている。

3. 実験による検討

Nielsen の提案式は、比較的小スレンダーで腹鉄筋量が多くない場合には実験結果と良く一致する事が示されているが、せん断スパンが短い場合 [(2) 式]、腹鉄筋量が相当多い場合 [(3) 式] には問題があると思われるので、その様な条件において実験を実施した。RT シリーズは丁形断面のはりで ($b=40, b_w=15, d=23\text{cm}$, $p_w=5.54\%$)、せん断スパン比 (q/ν) が 1.35 ~ 2.69 と小さく、せん断補強程度 ($A_{sv} f_{yv} / b_w \Delta$) も 9.1 ~ 19.9 % と比較的小さい場合であり、R シリーズは I 形断面 ($b=40, b_w=8, d=25\text{cm}$, $p_w=10.14\%$) のはりで、補強程度を 47.6 ~ 140.4 % と相当大きくした場合である。

	NO.	f_c' %	ψ	q/ν	τ_u %	スラック	$\tau_{cal,1}$ %	$\tau_{cal,2}$	$\tau_{cal,3}$	$\tau_{cal,4}$
RT series	21	211	0.075		75.6	降伏せず	45.3 (1.67) I	58.6 (1.29) II	74.8 (1.01) II	
	22	295	0.031	1.35	84.4	降 伏	40.7 (2.07) II	66.4 (1.27) II	85.5 (0.99) II	—
	23	293	0.047		87.9	〃	46.8 (1.88) II	67.6 (1.30) II	86.6 (1.02) II	
	11	305	0.057		74.2	〃	52.2 (1.42) I	59.5 (1.25) II	74.1 (1.00) II	
	12	184	0.086		62.9	〃	43.5 (1.45) I	47.6 (1.32) II	59.0 (1.07) II	
	13	298	0.034	1.79	77.3	〃	40.6 (1.90) II	54.5 (1.42) II	68.9 (1.12) II	—
	14	415	0.043		96.4	〃	57.6 (1.67) I	67.9 (1.42) II	85.0 (1.13) II	
	15	290	0.051		77.9	〃	48.0 (1.62) I	56.7 (1.37) II	70.9 (1.10) II	
	31	301	0.066	2.69	62.9	〃	55.2 (1.14) I	55.3 (1.14) II	64.9 (0.97) II	—
	32	295	0.044		51.3	〃	45.4 (1.13) I	47.0 (1.09) II	56.5 (0.91) II	
R series	1	275	0.173		101.2	〃	75.0 (1.35) I		89.4 (1.13) I	89.4 (1.13) I
	2	463	0.186		162.6	〃	105.4 (1.54) I		129.1 (1.26) I	129.1 (1.26) I
	3	279	0.287	2.95	109.5	降伏せず	83.4 (1.31) I	←	124.8 (1.04) I	103.4 (1.06) III
	4	255	0.296		116.1	一部降伏	79.7 (1.46) I		99.9 (1.16) I	99.4 (1.17) III
	5	298	0.310		113.1	降伏せず	86.3 (1.31) III		110.4 (1.02) I	107.9 (1.05) III
	6	298	0.471		120.5	〃	86.3 (1.40) III		112.2 (1.07) II	109.3 (1.10) III

実験結果は表に示した。ここで $T_{cal.1}$ は Nielsen の提案式 (1)~(3) によって求めたせん断強度で $\nu = 1/3\sqrt{f_c}$ である。(実験値/ $T_{cal.1}$) は 1.13 ~ 2.02 (平均 1.52, 変動係数 17.1%) と大きく、特に θ/a , ψ とともに小さく (2) 式が適用される場合 (II と示した) に計算値が過小となっている。これは (2) 式が、「降伏線の角度は載荷点と支点とを結ぶ直線の角度 ($\tan^{-1} \theta/a$) よりも小さくならない」事を仮定して導かれている事に起因するものと考えられる。すなわち、降伏線の角度 β と主応力の角度 α には $\beta = 2\alpha$ の関係がある事、また、ウェブの主圧縮応力の傾斜角は $\tan^{-1} \theta/a$ より小さくはならない事を考え合わせれば、 θ/a が小さい場合の制限条件は、 $\alpha = \beta/2 \geq \tan^{-1} \theta/a$ とすべきであると思われる。その様に考えると (2) 式を代りに (2') 式が得られる。

$$\tau_u/\nu f_c = 1/2 [\theta/a + \psi/\nu (\theta/a - \theta/a)] \quad \text{----- (2')}$$

(1), (2'), (3) 式によって計算した値が $T_{cal.2}$ である。(実験値/ $T_{cal.2}$) の平均値は 1.33, 変動係数は 8.2% であって、Nielsen の提案式を用いた場合に較べて変動係数がきわめて小さくなっている。計算値が全般的に小さいのはコンクリート強度の低減係数 ν とりに方に関連があるものと思われ、この点についてはさらに検討を要すると思われるが、とりあえず $\nu = 1/3\sqrt{f_c}$ とおくと $T_{cal.3}$ に示したように計算値と本実験値とはほぼ一致する ($\tau_u/T_{cal.3}$ の平均値 1.06, 変動係数 6.2%)。

以上の様に、 θ/a の小さい範囲に修正を加えれば、塑性理論に基づくせん断強度式は実験値と良く一致する解を与える事が、少くとも本実験の範囲では明らかになった。

表中に I, II と記入されているのはスターラップ降伏後にせん断破壊を起こすはずであり、III と記されたものはスターラップ降伏以前にウェブコンクリートが圧壊するはずである。しかし同表から明らかなように、せん断補強率が大きい R シリーズにおいて、予測される破壊モードと実際の破壊モードが異なっている。すなわち、I と予測されたはりが、実際にはスターラップの降伏前にウェブの圧壊によって破壊を起している (III のモード) 場合が多いのである。

この事は塑性理論の適用の限界を示唆しているように思われる。すなわち、スターラップが降伏する場合には変形能力も大きいので塑性理論の適用が可能である。しかし、スターラップが降伏する以前に破壊が生ずる場合には、もっぱらコンクリートの変形能力に頼る事になるが、コンクリート自体の変形能力は小さいため塑性理論の適用が不適当になるものと考えられるのである。

ウェブコンクリート およびスターラップの弾性変形も考慮した Campbell 等の ²⁾ variable angle truss analogy による (4) 式も R シリーズに適用したものが $T_{cal.4}$ であるが ($\nu = 1/3\sqrt{f_c}$ とした)、この場合にはせん断強度ばかりでなく破壊モードも実験と良く一致している事であって、III の領域では塑性理論よりも、むしろ弾性理論が有効である事を示している。

$$\tau_u/\nu f_c = 1/2 \sin 2\alpha_u \quad \text{----- (4)}$$

$$\sin \alpha_u = (-1 + \sqrt{1+A})/A, \quad A = (1 - 2\psi_b/\nu)/(\psi/\nu - \psi_b/\nu)$$

$$\psi_b = \nu E_o / (2E_o + E_y)$$

E_o : コンクリートの最大応力時の歪 ($= 0.002$), E_y : スターラップの降伏歪

本実験は、山本一夫、丸茂自修両氏 (当時 山梨大学在学) が担当したものである、また、実験に当っては山梨大学技官 塩沢一雄氏の協力を得た事を付記し、ここに謝意を表する次第である。

(主な参考文献)

1. M.P. Nielsen 他 "Concrete plasticity - Shear in beam" CEB Bulletin D'Information No. 126, June 1978
2. T.I. Campbell 他 "Rigid-plastic theory v. truss analogy method calculating the shear strength of reinforced concrete beams" Mag. of Conc. Research, Vol. 32, No. 110, March 1980