

V-9

ねじりと曲げの組合わせ荷重を受けるRC部材の破壊パターンと耐力

北海道大学大学院 学生員 下 西 勝
 北海道大学工学部 正 員 佐 伯 昇
 北海道大学工学部 正 員 藤 田 嘉 夫
 北海道大学工学部 正 員 志 村 和 紀

1. まえがき

近年、立体的あるいは曲線的なコンクリート構造物が造られることが多くなり、ねじり作用あるいはねじりと曲げなどの複合作用を受けるコンクリート構造物の設計に対する問題が重要となってきた。

また設計法に限界状態設計法が適用されるようになり、ねじり、曲げ荷重が作用する場合のせん断耐力の適正な算定が必要になってきている。

本論文は、RC桁にねじりと曲げ荷重が一定の割合で同時に作用する場合の耐力について、実験および解析によって検討を行ったものである。

2. 解析方法

解析はまずRC桁の破壊形式を中立軸より下のひびわれゾーンの破壊と中立軸より上の曲げ圧縮ゾーンの破壊に分け、さらにひびわれゾーンに対しては立体トラス理論を適用してスターラップの破壊とウェブコンクリートの破壊に分類し、曲げ圧縮ゾーンに対しては無筋コンクリートのせん断と圧縮の組合せ応力下の破壊曲線を適用して耐力の算定をおこなった。

(1) 中立軸より下のひびわれゾーンにおけるせん断耐力

中立軸より下のひびわれゾーンにおいて、曲げせん断応力は一様に分布し、またねじり荷重下のせん断流も一様に流れているとして、中実矩形断面のRC部材を中空箱型断面のトラスに置き換え、Bredtのねじり理論に基づく、立体トラス理論を適用した。立体トラス理論によるねじりによる応力-歪み関係式を曲げによるせん断流(q_s)を含めたものに拡張すると、軸方向鉄筋応力(σ_{s1})、横方向鉄筋応力(σ_{sv})、ウェブコンクリートの応力(σ_c)は次式のようになる。

$$\sigma_{s1} = \left(\frac{q \cdot a_0}{A_1} + \frac{q_s \cdot d_0}{A_s} \right) \cot \alpha \quad (1)$$

$$\sigma_{sv} = \left(\frac{q \cdot s}{A_v} + \frac{q_s \cdot s}{A'_v} \right) \tan \alpha \quad (2)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{q}{t_e} + \frac{q_s}{b_w} \right) \cos \alpha \cdot \sec \alpha \quad (3)$$

q : ねじりによるせん断流, $q = T / (2 A_0)$, A_0 は中面の面積

q_s : 曲げせん断によるせん断流, $q_s = Q / Z$, $Z = j \cdot d$, Q は曲げせん断力, $j = 1 / 1.15$

b_0 : 矩形断面の短辺の角の軸方向鉄筋の断面中心の間隔

b_w : ウェブ幅

α : 桁軸方向からのひびわれ角

a_0 : 中面の周長

s : スターラップ間隔

A_v : 横方向鉄筋の1本の断面積

A'_v : 曲げせん断に対する横方向鉄筋の断面積

d_0 : 中立面から主鉄筋までの距離

t_e : 仮想の箱形断面の有効厚さ, $t_e = b_0 / 6$

Ultimate Strength and Failure Modes of Reinforced Concrete Member Subjected to Bending and Torsion, by Masaru SHIMONISHI, Noboru SAEKI, Yoshio FUJITA and Kazunori SHIMURA

(1), (2), (3)の各式を各々のヤング率で割ると歪みが求められ, 全せん断歪み(γ)はそれらの和であらわされる. せん断歪みエネルギー($G \gamma^2 / 2$)が最小になる条件($d\gamma / d\alpha = 0$)から斜材の傾き(ひび割れ角度 α)を求めると, 次式ようになる.

$$\tan^4 \alpha = (a_0 \cdot t_e \cdot \beta_{T1} / A_1 + n \cdot \beta_{Tc}) / (s \cdot t_e \cdot \beta_{Tv} / A_v + n \cdot \beta_{Tc}) = k^{*4} \quad (4)$$

ここで

$$\beta_{T1} = 1 + \frac{2 A_1 \cdot d_0 \cdot A_0}{A_s \cdot a_0 \cdot Z \cdot l} \beta_T$$

$$\beta_{Tv} = 1 + \frac{2 A_v \cdot A_0}{A_v' \cdot Z \cdot l} \beta_T$$

$$\beta_{Tc} = 1 + \frac{2 t_e \cdot A_0}{b_w \cdot Z \cdot l} \beta_T$$

$$\beta_T = \frac{Q \cdot l}{T}, \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

ウェブのひび割れゾーンにおけるせん断破壊パターンは, 斜材として圧縮力を受け持つコンクリートの圧壊と, 垂直材として引張力を受け持つスターラップの降伏であり, これらの耐力の小さい方で破壊することになる.

1) ウェブコンクリートの圧壊による破壊ねじりモーメント ($\cot^2 \alpha \geq \beta_2 \cdot \beta_{Tv} / \beta_{Tc} - 1$ のとき)

$$T_{cb} = \frac{2 \beta_k \cdot \gamma_c \cdot f_{cb} \cdot t_e \cdot A_0 \cdot k^*}{\beta_{Tc} (k^{*2} + 1)} \quad (5)$$

2) スターラップの降伏による破壊ねじりモーメント ($\cot^2 \alpha \leq \beta_2 \cdot \beta_{Tv} / \beta_{Tc} - 1$ のとき)

$$T_{vb} = \frac{2 \beta_k \cdot A_0 \cdot A_v \cdot f_{vy}}{\beta_{Tv} \cdot s \cdot k^*} \quad (6)$$

ここで

$$\beta_2 = \frac{t_e \cdot s \cdot f_{cb}}{A_v \cdot f_{vy}}$$

f_{cb} : コンクリートの圧縮強度

f_{vy} : スターラップの降伏強度

β_k : せん断力の断面への分布係数

γ_c : コンクリートの圧縮強度に対する係数

(2) 中立軸より上の圧縮ゾーンでは, 上弦材として圧縮力を受け持つコンクリートは, 曲げによる圧縮応力と曲げせん断応力, ねじりによる応力の複合応力下であり, 耐力算定には圧縮-せん断応力下の無筋コンクリートの破壊曲線を用いる.

1) 圧縮-せん断破壊曲線

圧縮-せん断応力下の無筋コンクリートの破壊曲線は次式のように求められている.¹⁾

$$\bar{\tau}^2 + \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2 = C^2 \quad (7)$$

ここで

$$C^2 = \frac{28}{8} \left(\frac{4 \eta_1 \cdot \sigma + 9 \eta_2}{7 \sigma + 18} \right)^2$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{f_{cb}}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{f_{cb}}, \quad \eta_1 = 1.77, \quad \eta_2 = 0.084$$

2) 曲げによる圧縮応力

コンクリートの応力-歪み関係を次式のようにおく.

$$\sigma = \frac{4}{7} E_c \cdot \varepsilon_c \left(1 - \frac{E_c \cdot \varepsilon_c}{7 f_{cb}} \right)$$

ここで、中立軸係数 k は以下の 3 次式を解いて求める。

$$A_1 k^3 + A_2 k^2 + A_3 k + A_4 = 0$$

ただし

$$\begin{aligned} A_1 &= 4 \eta_3 - \frac{4 M'}{7 n} - 4 j \cdot p_t & A_2 &= 4 (j \cdot p_a - \eta_4) + n' (-j \cdot p_t + \eta_3) \\ A_3 &= n' (j \cdot p_a - \eta_4) - n_a (-j \cdot p_t + \eta_3) & A_4 &= n_a (-j \cdot p_a + \eta_4) \\ \eta_3 &= (1 - a') p' & \eta_4 &= (1 - a') p \cdot a' & n' &= 7 n \cdot p_t / \alpha & n_a &= 7 n \cdot p_a / \alpha \\ M' &= M / (b_w \cdot d^2 \cdot f_{cb}) & p_t &= p + p' & p_a &= p + p' a' & n &= 7 & \alpha &= 2 / 3 \end{aligned}$$

コンクリートの応力を圧縮強度 f'_{cb} で割ると曲げによる圧縮応力が求められる。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_c}{f'_{cb}} = \frac{7}{4} p_k (4 - 7 p_k) \quad (8)$$

ここで、 $p_k = n (-p_t + p_a / k) / (\alpha \cdot k)$

3) ねじりによる圧縮応力

立体トラスモデルを適用するので、(3)式を次式のように変形した圧縮応力が曲げによる応力に付加されるものとした。

$$\bar{\sigma} = \beta_{tm} \cdot \beta_{tc} \cdot T / M \cdot M' \quad (9)$$

ここで

$$\beta_{tm} = \frac{k \cdot b \cdot d^2}{2 \cdot A_0 \cdot t_c} \times \frac{(k^2 + 1)^{1/2}}{k^*}$$

4) セン断応力

曲げせん断応力 τ を f'_{cb} で割った $\bar{\tau}$ は次式で表される。

$$\bar{\tau} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \cdot M' \quad (10)$$

ここで

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= Q \cdot L / M & \gamma_2 &: \text{曲げせん断応力の放物線分布を補正する係数} \\ \gamma_3 &= 1 / j & \gamma_4 &= d / L \end{aligned}$$

5) 圧縮-せん断破壊パターンの耐力

(8), (9)式による $\bar{\sigma}$ と (10)式による $\bar{\tau}$ が (7)式を満足させるように繰り返し計算を行い、 M' を決定する。これにより中立軸より上の圧縮ゾーンの圧縮-せん断破壊パターンの耐力が求められる。

3. 実験方法

実験に使用した R C 桁の配筋図と断面図を、図-1、図-2 に示す。

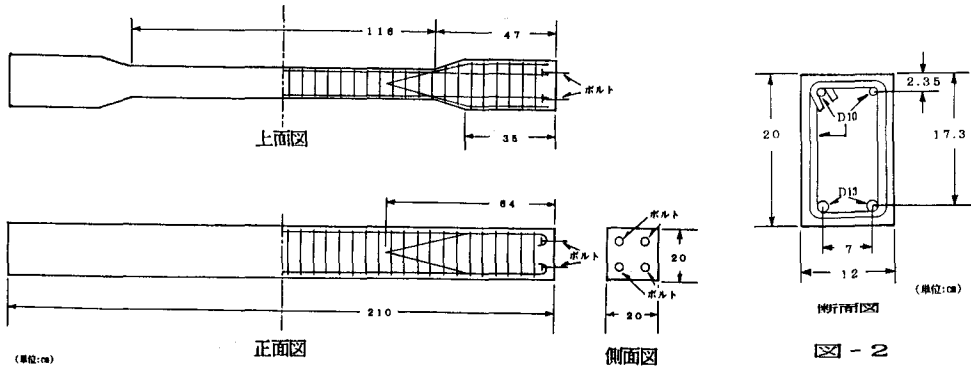


図-1 供試体形状

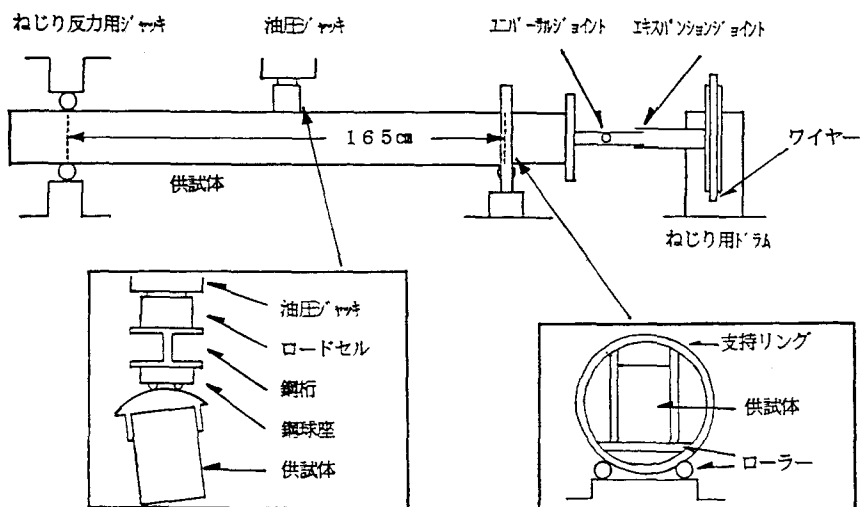


図-3 実験装置

支間長 $L = 165 \text{ cm}$ 、曲げに対して両端単純支持の RC 部材の中央、または $1/3$ の点に曲げ荷重を 1 点載荷し、ねじり荷重に対しては片持支承として、一端をねじりに対して固定して他端にねじり荷重を載荷した。

実験装置は図-3 に示してある通りで、曲げ荷重の載荷に対してはジャッキと桁の接点にねじり変形に対し回転する球座を用いて、ねじり角が拘束されないようにした。

ねじり荷重の載荷に対しては、ねじり用ドラムと桁の間にはエキスパンションジョイントとユニバーサルジョイントを用いて、軸方向の変形とねじり載荷端部のたわみ角による変位が拘束されないようにした。

ねじり-曲げ荷重の載荷の割合は実験ごとに变えて、5 種類のタイプを実験し、ねじり-せん断荷重の載荷の割合は 2 種類 ($Q \cdot L / M = 2$ と $Q \cdot L / M = 3$) を実験した。

4. 実験および解析結果

実験および解析結果を表-1 に、実験値と解析値の比較を図-4 に示す。

中央 1 点載荷 ($Q \cdot L / M = 2$) のタ

表-1 実験および解析結果

Q/L M	T M	fcb		実験値		解析 値				ひび割れ 角度 (deg)
				(tf-m)	中立軸より下部		中立軸より上部		曲げ破壊 (tf-m)	
					ナゲ・ソリグット破壊 (tf-m)	スラップ破壊 (tf-m)	圧縮-せん断破壊 (tf-m)			
2	2.60	313	T	0.600	0.488	1.260	1.600	—	47.5	
			M	0.230	0.187	0.484	0.615	1.458		
	0.95	340	T	0.570	0.523	1.179	1.243	—	47.5	
			M	0.600	0.551	1.241	1.308	1.466		
	0.58	330	T	0.590	0.500	1.107	0.945	—	47.5	
			M	1.017	0.863	1.910	1.630	1.464		
	0.32	370	T	0.485	0.545	0.983	0.740	—	47.4	
			M	1.515	1.705	3.072	2.312	1.475		
	0.18	345	T	0.325	0.485	0.823	0.457	—	47.4	
			M	1.805	2.694	4.572	2.540	1.467		
3	2.60	363	T	0.590	0.563	1.236	1.847	—	47.5	
			M	0.230	0.216	0.475	0.710	1.472		
	0.95	362	T	0.670	0.551	1.124	1.310	—	47.5	
			M	0.715	0.580	1.183	1.379	1.472		
	0.65	325	T	0.650	0.487	1.054	0.977	—	47.5	
			M	0.995	0.749	1.621	1.503	1.461		
	0.32	320	T	0.490	0.458	0.876	0.628	—	47.4	
			M	1.555	1.433	2.739	1.962	1.461		
	0.18	340	T	0.330	0.455	0.696	0.431	—	47.3	
			M	1.840	2.529	3.871	2.439	1.467		

イブの桁の、降伏した時点でのひび割れ状況図を図-5に示す。

実験による桁の耐力は、曲げ荷重およびねじり荷重をそれぞれ一定の割合で載荷して、ねじりあるいは曲げ荷重のどちらかがそれ以上かからなくなった時点で降伏と判断した。

ただし、曲げの割合が大きい場合などには、曲げ破壊して曲げ荷重がかからなくなった時点においても、ねじり荷重に対する耐力が残存し、ねじり荷重が増加する傾向をみせることがあった。

計算による桁の耐力は、ウェブコンクリートの圧壊、スターラップの降伏、圧縮ゾーンのコンクリートの圧縮-せん断破壊の各々の耐力と曲げ耐力の最小値をとった。

曲げ耐力(M_b)の計算は、コンクリート標準示方書²⁾によった。

スターラップ(D10)に使用した鉄筋はSD30で、その降伏点は3850(kgf/cm²)であった。

各係数の値($\gamma_c, \gamma_s, \beta_k$)は、すべて1として計算した。

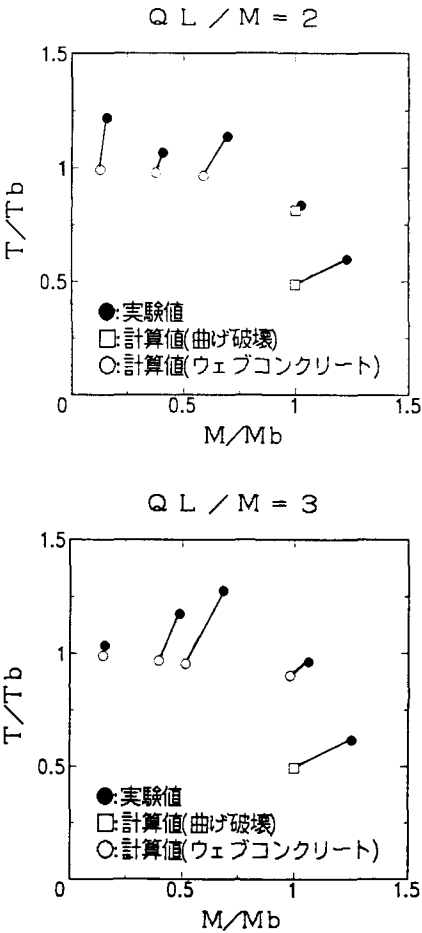


図-4 実験値と解析値の比較

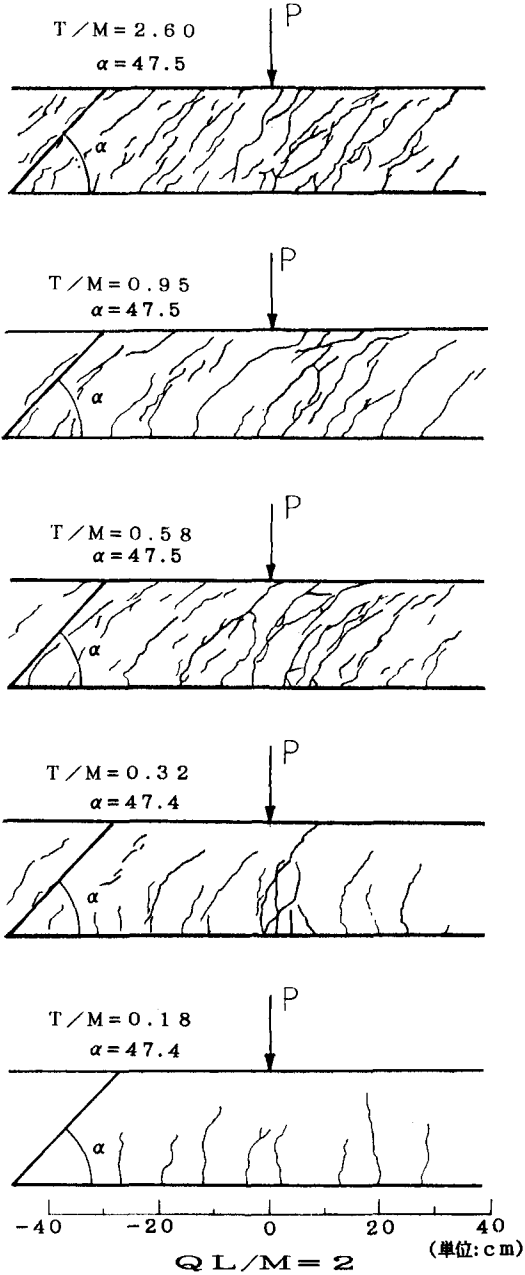


図-5 ひび割れ図

今回の解析においては曲げ破壊とウェブコンクリートの圧壊の2種類の破壊パターンがみられた。

図-4において、黒丸で示したものが実験値、白丸が計算値(ウェブコンクリートの破壊)、白四角が計算値(曲げ破壊)である。

また、実験の破壊パターンは、圧縮鉄筋、引張鉄筋、スターラップと桁表面に貼付した歪みゲージ等の計測値によると、解析による破壊パターンと一致していた。

5. まとめ

(1)解析において、曲げ-ねじりの組合せ荷重下のせん断破壊パターンはウェブコンクリートの圧壊、スターラップの降伏、圧縮-せん断ゾーンのコンクリートの圧縮-せん断破壊の3つに分類され、せん断耐力はこの3つの算定値の最小値として求められる。

(2)今回の実験においては、ウェブコンクリートの圧壊と曲げ破壊の2種類の破壊パターンであったが、立体トラス理論に基づいて曲げ-ねじりの組合せ荷重下の桁のせん断耐力を算定した結果、計算値と実験値はよく一致していた。

(3)ひび割れ角度については、降伏時のひび割れ角度と計算値はよく一致していた。ただし、曲げ荷重の割合が大きい $T/M=0.18$ のものは、曲げひび割れが卓越し、ねじりによるひび割れの発達はみられなかった。

6. 謝辞

本実験に際して協力してくれた、北海道大学工学部の大学院生の池田 哲郎君、4年生の原田 希樹君と故 並木 卓夫君に深く感謝します。

7. 参考文献

1)佐伯 昇, 高田宣之, 藤田嘉夫: 圧縮-ねじり荷重下のコンクリートの変形と破壊挙動, 土木学会論文報告集, 308号, pp.99~108, 1981

2)土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編]