

有効かぶりを考慮した鉄筋コンクリート部材の純ねじりの変形・耐力解析

志村和紀¹・佐伯 昇²

¹正会員 工修 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

RC 平板モデルを用いた鉄筋コンクリート部材の純ねじりの変形と耐力についての解析において、有効なかぶりコンクリートの評価を行い、解析を行なった。主圧縮ひずみを指標とした有効かぶり式を用い、ねじりひび割れ発生後における、有効なかぶりを考慮することにより部材のトルク-ねじり変形関係を精度良く評価できることを示した。また、その解析結果を基に立体トラスモデルによる耐力算定式について検討を行い、せん断流の外周を横方向鉄筋を中心とし、有効厚を仮定することにより鉄筋降伏が基本となってコンクリート圧壊、鉄筋の降伏によって起こる混合型の破壊形式を評価することができ、耐力の精度良い算定が可能であることを示した。

Key Words : RC plate model, effective cover, principal compressive strain, torque, twist, space truss model, ultimate strength, deformation

1. はじめに

ねじりを受ける鉄筋コンクリート部材の変形挙動の解析手法として、部材を RC 平板で構成された中空断面にモデル化する研究が発達してきた^{1), 2), 3), 4)}。このモデルはコンクリートの引張応力、あるいは tension stiffening を考慮することができるため載荷の初期から終局時まで変形を追跡することが可能であり、有用な解析手法といえる。一方、解析に与えるかぶりコンクリートの影響は大きく、全かぶりを有効として解析を行った場合、かぶりが断面寸法に比して厚い断面に対してはねじりひび割れ発生後のねじり剛性および終局耐力が実験値を大きく上回る場合がある。また、終局時には横方向鉄筋外側のかぶりコンクリートが剥離することも報告されており^{5), 6)}、かぶりの剥離現象を解析の中で評価することにより、精度の高い変形解析を行うことができると考えられる。

かぶりコンクリートの剥離現象を評価した研究としては長瀧ら⁷⁾のものがあるが、部材としての変形であるねじり角を指標としているため、断面形状・寸法によつては適用がしづらい場合もある。また、Collins ら⁸⁾はかぶり剥離荷重以降のかぶり全てを無視する解析を行なっているが、トルク-ねじり角曲線に実験ではみられない塑性棚状の流れ部が現れ、部材の変形挙動を表わしきれてはいない。著者らは前論文においてひび割れ間の骨材の

かみ合わせなどを考慮するためにせん断ひずみを指標とした有効かぶり式を提案したが⁹⁾不十分と考え、今回はさらに発展させ、かぶりの剥離現象を説明するためにより有効な指標として、新たにコンクリートの主圧縮ひずみを用いた有効かぶり式を構築して変形解析に適用し、既往の実験結果とも合わせて照査を行なった。

また、ねじり耐力について土木学会コンクリート標準示方書(以下示方書)において¹⁰⁾立体トラスモデルから導いた鉄筋降伏に対する算定式および腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力の式を示しているが、断面の寸法によっては実験に比べ過大に評価するとの報告もある¹¹⁾。また、かぶりコンクリートの剥離現象が生じた場合、示方書のようにせん断流の有効厚さの中心線を横方向鉄筋の中心と仮定すると過大な耐力を与える場合もあり、より実際の現象を安全側に捉えるためにはかぶりコンクリートを無視してせん断流の有効厚さを算定し、その外周を横方向鉄筋の中心とする方が合理的と考えられる。そこで、実験結果を基に立体トラスモデルを用いた終局時のせん断流の有効厚さの算定方法について考察を行ない、純ねじり耐力算定式の提案を試みた。

2. 解析上の仮定

ねじりを受ける中実断面 RC 部材の断面の中心部はねじりに対してはほとんど抵抗しないと考え、横方向鉄筋を囲む厚さ t_d の有効厚さを持つ中空断面に置き換え、中空断面を流れるせん断流によって抵抗すると仮定し、薄肉閉断面のねじり問題として解析を行う。また、中空断面を構成する壁を RC 平板要素として考え、力の釣り合い式および変形の適合条件式を適用した。以下に、えられた力のつりあい式を示す。

$$\sigma_d \cos^2 \alpha - \sigma_r \sin^2 \alpha - \sigma_{st} A_{st} / (q_0 t_d) = 0 \quad (1a)$$

$$\sigma_d \sin^2 \alpha - \sigma_r \cos^2 \alpha - \sigma_{st} A_{st} / (s \cdot t_d) = 0 \quad (1b)$$

$$\tau_{lt} = (\sigma_d + \sigma_r) \sin \alpha \cos \alpha \quad (1c)$$

ここで、 σ_d : コンクリートの平均主圧縮応力、 σ_r : コンクリートの平均主引張応力、 τ_{lt} : せん断応力、 α : 主圧縮応力方向と軸方向との成す角、 σ_{st} : 軸方向鉄筋応力、 σ_{st} : 横方向鉄筋応力、 A_{st} : 全軸方向鉄筋断面積、 A_{st} : 横方向鉄筋 1 本の断面積、 q_0 : せん断流の中心線の長さ、 s : 横方向鉄筋間隔

主圧縮応力方向と主圧縮ひずみ方向は一致するものとした¹¹⁾。

コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は二次放物線とし、圧縮-引張の二軸応力下にあるため Collins の応力低減係数¹²⁾を乗じた。また、横方向鉄筋および軸方向鉄筋で囲まれたコア・コンクリートは鉄筋の拘束を受けていると考えられるので低減係数の最小値を 0.6 とした。

コンクリートの引張応力-ひずみ関係は、tension stiffening を考慮したモデルを用いた¹³⁾。

解析は主圧縮縁ひずみ ε_{ds} を与え、せん断流の有効厚 t_d および主応力方向 α を仮定し、力の釣り合い条件式を満足するまで繰返し計算を行なった。

また、薄肉閉断面のねじり理論より、以下のねじり角およびねじりトルク算定式を用いた。

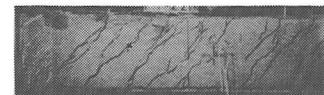
$$\theta = \gamma_{lt} p_0 / (2A_0) \quad (2)$$

$$T = 2qA_0 \quad (3)$$

ここで、 θ : ねじり角、 γ_{lt} : せん断ひずみ、 A_0 : せん断流の中心線で囲まれる面積、 T : トルク、 q : せん断流

3. 有効かぶりの検討

写真-1 に著者らの純ねじり実験におけるねじりひび割れ発生状況および終局時のかぶりコンクリートの剥離状況を示す。このように、終局時にはかぶりコンクリートの剥離が生じるため、ねじりに対して有効なかぶりコンクリートを考慮することは解析の精度を高めるために必要と考えられる。



(a) ねじりひび割れ発生状況



(b) かぶりの剥離

写真-1 ねじりひび割れ・かぶりの剥離状況

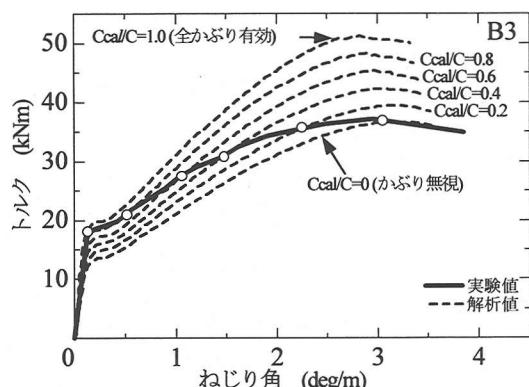


図-1 トルク-ねじり角関係に及ぼすかぶりの影響

(1) 有効かぶり式

かぶりコンクリートの解析結果に及ぼす影響を見るため、かぶりを変化させた場合の解析を行った。全かぶり C に対し解析上のかぶりを C_{cal} とし、 C_{cal}/C を 1.0 (全かぶり有効)、0.8、0.6、0.4、0.2 および 0 (かぶり無視) とした場合の解析例を図-1 に示す。これによれば、全断面を有効とした解析値はねじりひび割れ発生前は実験値と良く一致しているが、その後の剛性の低下はあまり現れず、耐力は実験値を大きく上回る。ねじり角が増すとともに実験値はかぶりを小さくした解析値と一致し、最終的にかぶりを無視した場合と一致する。これは、ねじりひび割れ発生とともにかぶりコンクリートの剥離が始まり、最終的には全てのかぶりが剥離することに対応すると考えられるが、実験の挙動を見るとその剥離過程(一般にはねじりひび割れ発生によるかぶり部の剛性低下、力の分担の低下が含まれる)不連続なものではなく、剥離は変形に応じて連続的に進行すると考えられる。

かぶりの剥離現象について Collins ら¹⁴⁾は、部材断面の隅角部においてコンクリートの圧縮応力方向が変化し、これに対し垂直方向に引張応力が生じかぶりコンクリートが剥離するとしている。また、圧縮応力によるボアン効果により引張ひずみが生じ、横方向鉄筋に囲まれたコア・コンクリートは鉄筋による拘束が生じるが、かぶ

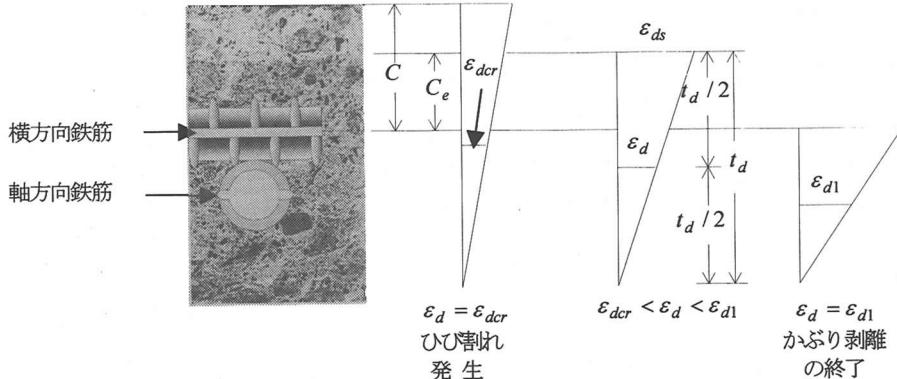


図-3 かぶりの剥離過程における有効かぶりと主圧縮ひずみ

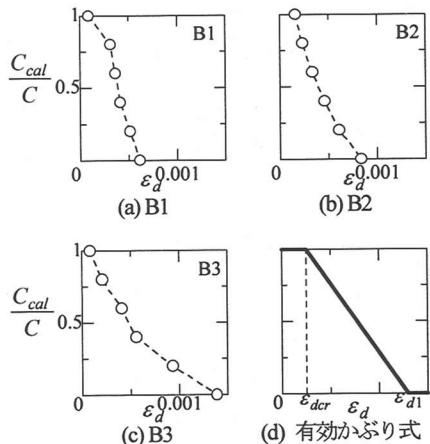


図-2 かぶりと主圧縮ひずみの関係

りコンクリートは部材表面での引張ひずみの拘束が生じないため、かぶりの剥離の原因になると考えられ、かぶりの剥離にはコンクリートの主圧縮ひずみが影響していると考えられる。そこで、図-1で○印で示した実験値と解析値の一一致点をかぶりと解析におけるコンクリートの主圧縮ひずみの関係で表した例を図-2(a), (b)および(c)に示す。これによれば、かぶりと主圧縮ひずみの間にはほぼ線形の減少傾向が認められ、かぶりの変化を主圧縮ひずみを指標として表せると考えられる。

そこで、ねじりひび割れ発生までは全かぶりを有効として解析を行い、以降はかぶりを徐々に減少させ、かぶりを無視した解析値に近づくような、以下の形式の有効かぶり式を仮定した(図-2(d))。

$$1) \epsilon_d \leq \epsilon_{dcr} \\ C_e = C \quad (4a)$$

$$2) \epsilon_{dcr} < \epsilon_d \leq \epsilon_{d1} \\ C_e = C \left(1 - \frac{\epsilon_d - \epsilon_{dcr}}{\epsilon_{d1} - \epsilon_{dcr}} \right) \quad (4b)$$

$$3) \epsilon_{d1} < \epsilon_d \\ C_e = 0 \quad (4c)$$

ここで、 ϵ_d ：コンクリートの平均主圧縮ひずみ(有効厚さ中央のひずみ)、 ϵ_{dcr} ：かぶりコンクリートの分担力を低下させるねじりひび割れ発生時の圧縮ひずみ、 ϵ_{d1} ：かぶりコンクリートの分担力が無くなるかぶり剥離終了時の平均圧縮ひずみ、 C ：かぶり(横方向鉄筋を中心よりコンクリート表面までの距離)、 C_e ：有効かぶりである(図-3)。

ねじりひび割れ発生前は式(4a)に示すように、全かぶりを有効として解析を行い、ひび割れ発生後は式(4b)を適用し、有効かぶりを計算する。有効かぶりはひび割れ発生ひずみ ϵ_{dcr} 時までは全かぶりを有効とし、平均主圧縮ひずみ ϵ_d が ϵ_{d1} に達するとかぶりによる力の分担が無くなるものとし、かぶりを0とした。実験では、このように表面から徐々に剥離するようなことは生じないが、剛性が表面から断面内部に向かって低下し、トルクに抵抗できる有効なかぶり厚さが減少すると考えられる。 ϵ_d が ϵ_{d1} に到達した以降はかぶりを0とした式(4c)を適用する。

(2) かぶり剥離終了時のひずみ ϵ_{d1}

式(4a)～(4c)の中で、 ϵ_{d1} 以外の値は既知または算出できるものであり、これが定まれば有効かぶり C_e を決定できる。図-4に ϵ_{d1} を変化させた場合のトルク-ねじり角関係の解析例を示す。これによれば、 ϵ_{d1} を増大するに伴い、ねじりひび割れ発生後の剛性および耐力は共に大きくなる。そこで、トルク-ねじり角関係が得られている22体の試験体³⁾⁽⁹⁾⁽¹³⁾について、 ϵ_{d1} を変化させて解析を行い、ねじりひび割れ発生後の剛性および耐力が実験値と最も良く一致するものを選び、試験体の諸元と共にまとめたものを表-1に示す。

Hsuの実験のBシリーズ(表-1のB1～B6)の ϵ_{d1} と体積鉄筋比 p_{lt} の関係を図-5に示す。この実験は断面寸法が同一で体積鉄筋比 p_{lt} を変化させたものである。これによれば、鉄筋比の増加に伴い ϵ_{d1} が増加しており、 ϵ_{d1} と p_{lt} の間には単調増加の関係が認められる。

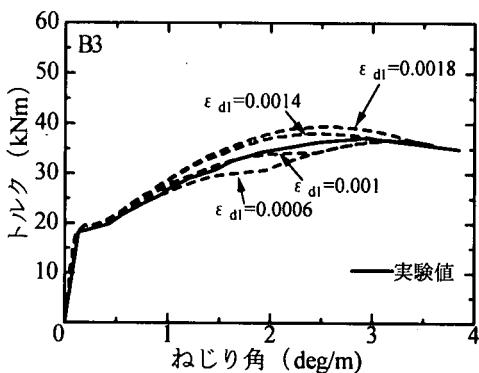


図-4 変形解析に及ぼすかぶり剥離終了ひずみの影響

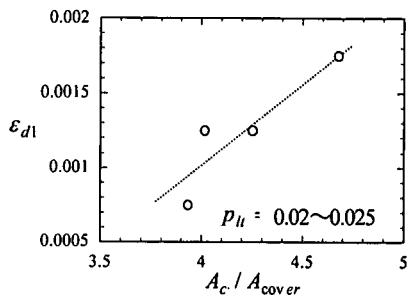


図-6 ε_{d1} と A_c / A_{cover} の関係

試験体	h cm	b cm	h_0 cm	b_0 cm	p_l	p_t	p_{lt}	ε_{d1cal}
B1	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0053	0.0054	0.0107	0.00050
B2	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0083	0.0082	0.0165	0.00075
B3	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0117	0.0117	0.0234	0.00125
B4	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0160	0.0162	0.0322	0.00150
B5	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0211	0.0213	0.0424	0.00200
B6	38.1	25.4	34.3	21.6	0.0267	0.0261	0.0528	0.00250
G1	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0040	0.0040	0.0080	0.00050
G2	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0062	0.0063	0.0125	0.00075
G3	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0088	0.0088	0.0176	0.00100
G4	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0120	0.0120	0.0240	0.00175
G5	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0158	0.0160	0.0318	0.00175
G6	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0060	0.0059	0.0119	0.00100
G7	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0093	0.0094	0.0187	0.00100
G8	50.8	25.4	47.0	21.6	0.0132	0.0131	0.0263	0.00200
C1	20.0	20.0	19.0	19.0	0.0135	0.0107	0.0242	-
C2	25.0	25.0	19.0	19.0	0.0087	0.0069	0.0155	0.00125
C3	30.0	30.0	19.0	19.0	0.0060	0.0048	0.0108	0.00100
S1	30.0	30.0	26.0	26.0	0.0060	0.0065	0.0125	0.00100
S2	30.0	30.0	26.0	26.0	0.0090	0.0098	0.0188	0.00100
S3	30.0	30.0	26.0	26.0	0.0120	0.0130	0.0250	0.00125
R1	17.0	9.0	16.0	8.0	0.0331	0.0448	0.0779	-
R2	20.0	12.0	16.0	8.0	0.0211	0.0285	0.0496	0.00100
R3	23.0	15.0	16.0	8.0	0.0147	0.0198	0.0345	0.00100
S1'	20.0	20.0	19.0	19.0	0.0128	0.0136	0.0262	-
S2'	22.0	22.0	19.0	19.0	0.0105	0.0112	0.0217	0.00075
S3'	26.0	26.0	19.0	19.0	0.0075	0.0080	0.0155	0.00075
S4'	30.0	30.0	19.0	19.0	0.0056	0.0060	0.0117	0.00050

h : 断面の長辺長さ, b : 断面の短辺長さ, h_0 : 横方向鉄筋の長辺長さ, b_0 : 横方向鉄筋の短辺長さ, $p_l = A_{sl} / (b \cdot h)$: 軸方向鉄筋比, $p_t = A_{st} \cdot 2(h_0 + b_0) / (s \cdot b \cdot h)$: 横方向鉄筋比, $p_{lt} = p_l + p_t$: 体積鉄筋比, ε_{d1cal} : かぶりの剥離終了時の圧縮主ひずみ (トルク-ねじり角関係においてかぶりを無視した解析が実験と一致する点の圧縮主ひずみの解析値)

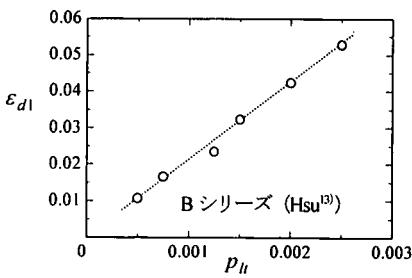


図-5 ε_{d1} と p_h の関係

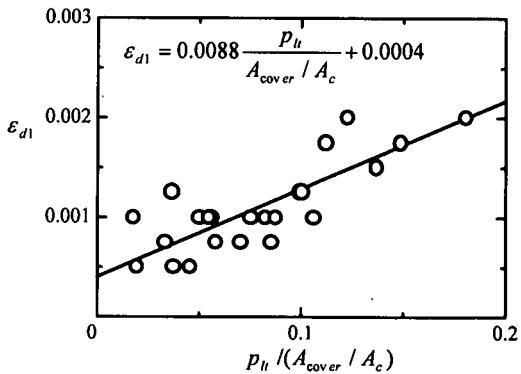


図-7 ε_{d1} と $p_h / (A_{cover} / A_c)$ の関係

ε_{d1} と p_h の間には正の相関関係が認められたが、同一の断面寸法に限定される。従って、 ε_{d1} を評価するためには断面寸法の影響を考慮する必要がある。Collins ら¹⁴⁾は実験的検討より、かぶりコンクリートの断面全体に対する面積率が大きな場合にはかぶりの剥離を考慮する必要があるとしており、このかぶり面積率が ε_{d1} と相関関係を持つことが考えられる。図-6 に ε_{d1} と A_c / A_{cover} (全断面積とかぶりコンクリート断面積の比: かぶり面積率の逆数) の関係を示すが、両者の間に正の相関関係が認められる。そこで、 ε_{d1} を p_h と A_c / A_{cover} で表すために、 $\varepsilon_{d1} = a(p_h^n(A_c / A_{cover})^m) + b$ (a, b, n, m は定数) の形式の評価式を仮定し、各定数について検討した結果、図-7 に示すように ε_{d1} と体積鉄筋比/かぶり面積率 $p_h / (A_{cover} / A_c)$ との間に良い相関があることが判り、以下の回帰式を得た。

$$\varepsilon_{d1} = 0.0088 \frac{p_h}{A_{cover} / A_c} + 0.0004 \quad (5)$$

ここで $A_{cover} = (h - h_0) \times (b - b_0)$: かぶりコンクリート面積, $A_c = bh$: 全断面積

式(5)で与えられた ε_{d1} を式(1a)~(1c)に適用することにより、各荷重段階における有効かぶりが定まる。

式(5)を用いた RC 平板モデルによる解析の流れを図-8 に示す。

表-2 ひび割れトルクおよび最大トルク

試験体	最大トルク T_u			ひび割れトルク T_{cr}		
	実験値 $T_{u exp}$	計算値 $T_{u cal}$	$\frac{T_{u cal}}{T_{u exp}}$	実験値 $T_{cr exp}$	計算値 T_{creal}	$\frac{T_{creal}}{T_{cr exp}}$
B1	22.26	24.27	1.090	20.56	19.32	0.940
B2	29.26	31.17	1.070	20.00	19.63	0.981
B3	37.51	36.68	0.980	20.11	18.05	0.898
B4	47.34	45.30	0.960	21.92	19.57	0.893
B5	56.15	49.50	0.880	22.60	19.52	0.864
B6	61.69	54.84	0.890	24.97	20.97	0.840
B7	26.89	27.68	1.030	20.22	16.75	0.828
B8	32.54	34.48	1.060	21.81	18.73	0.859
B9	29.83	30.37	1.020	19.66	19.90	1.012
B10	34.35	35.76	1.040	17.63	19.38	1.099
D1	22.37	23.40	1.050	15.03	17.37	1.156
D2	27.68	30.72	1.110	13.90	18.97	1.365
D3	39.09	37.47	0.960	15.14	19.64	1.297
D4	47.91	45.34	0.950	15.82	19.57	1.237
M1	30.39	28.05	0.920	19.21	19.15	0.997
M2	40.56	35.17	0.870	20.56	19.79	0.963
M3	43.84	38.08	0.870	20.68	19.47	0.941
M4	49.60	42.88	0.860	20.68	19.07	0.922
M5	55.70	49.79	0.890	21.69	20.27	0.935
M6	60.11	54.72	0.910	22.71	19.86	0.875
I2	36.04	38.81	1.080	24.86	23.99	0.965
I3	45.65	48.35	1.060	25.53	23.99	0.940
I4	58.07	58.72	1.010	28.02	26.01	0.928
I5	70.73	66.71	0.940	28.13	24.21	0.861
I6	76.72	74.15	0.970	27.57	24.09	0.874
J1	21.47	18.90	0.880	14.01	13.73	0.980
J2	29.15	21.50	0.740	17.06	13.32	0.781
J3	35.25	27.03	0.770	16.95	15.62	0.922
J4	40.67	30.29	0.740	17.96	14.70	0.818
G1	26.78	30.97	1.160	26.78	28.18	1.052
G2	40.34	43.53	1.080	30.28	31.42	1.038
G3	49.60	49.08	0.990	27.11	28.65	1.057
G4	64.85	58.61	0.900	28.70	28.25	0.984
G5	71.97	65.16	0.910	29.49	28.62	0.970
G6	39.09	39.05	1.000	30.96	21.60	0.698
G7	52.65	55.42	1.050	33.67	31.18	0.926
G8	73.44	59.10	0.800	33.67	22.01	0.654
N1	9.10	9.28	1.020	7.59	5.79	0.763
N1a	8.99	9.25	1.030	7.03	5.95	0.846
N2	14.46	13.42	0.930	7.45	6.22	0.835
N2a	13.22	12.94	0.980	7.50	6.21	0.828
N3	12.20	11.46	0.940	7.41	6.02	0.812
K1	15.37	12.92	0.840	12.32	8.43	0.684
K2	23.73	18.50	0.780	12.20	8.96	0.734
K3	28.47	22.58	0.790	12.43	8.77	0.706
K4	35.03	26.63	0.760	13.11	9.06	0.691
C1	11.30	10.78	0.950	11.30	9.80	0.867
C2	15.25	16.31	1.070	11.07	9.68	0.874
C3	20.00	19.02	0.950	11.86	9.75	0.822
C4	25.31	21.60	0.850	11.86	10.25	0.864
C5	29.72	24.27	0.820	14.01	8.63	0.616
C6	34.23	27.73	0.810	13.90	9.08	0.653
C1	15.03	14.39	0.960	5.23	4.91	0.939
C2	15.49	13.89	0.900	11.64	9.09	0.781
C3	18.24	15.60	0.860	16.87	15.60	0.925
S1	24.45	26.76	1.090	13.58	14.54	1.071
S2	29.43	31.37	1.070	15.85	14.57	0.919
S3	34.28	34.41	1.000	17.14	14.59	0.851
R1	5.36	4.64	0.870	0.93	1.14	1.226
R2	4.39	4.61	1.050	2.42	2.11	0.872
R3	5.31	5.03	0.950	3.42	3.67	1.073
S1	11.83	13.24	1.120	5.51	4.06	0.737
S2	12.37	13.63	1.100	7.80	5.25	0.673
S3	14.10	13.85	0.980	11.29	9.63	0.853
S4	17.11	16.42	0.960	17.11	16.42	0.960
平均			0.956	平均		
変動係数			0.109	変動係数		
最大値			1.139	最大値		
最小値			0.715	最小値		

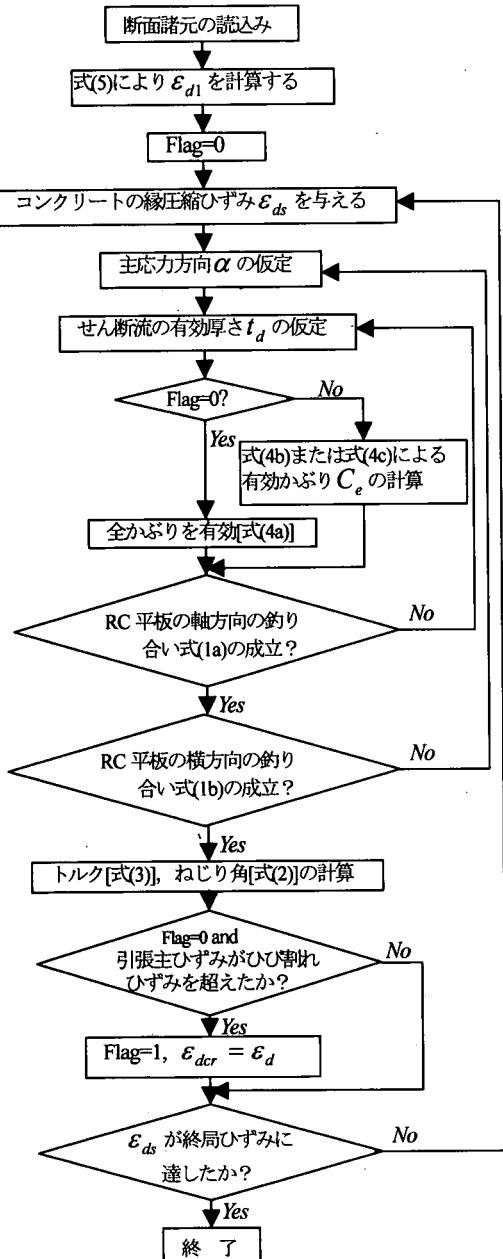


図-8 解析の流れ

解析の際には、コンクリートの縫圧縮主ひずみ ϵ_{ds} のステップは 10×10^{-6} 、コンクリートの終局圧縮ひずみ $\epsilon_{cu}' = 0.0035$ とした。

最大トルクおよびひび割れトルクについて 65 試験体の実験値と計算値を整理したものを表-2 に示す。また、表-1 で示した 27 試験体のトルク-ねじり角関係を図-9 に示す。

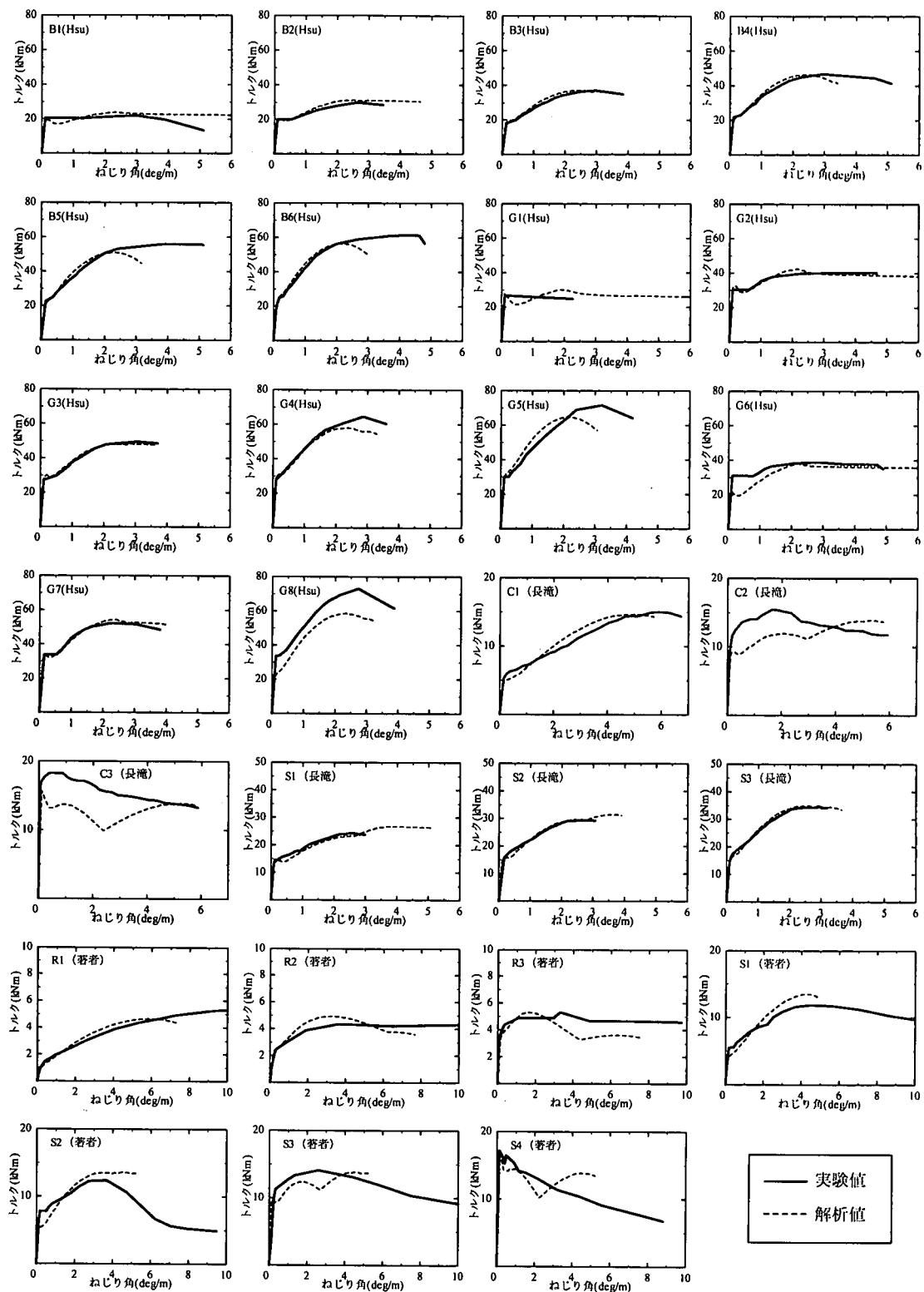


図-9 トルクーねじり角関係の実験値と解析値の比較

表-2によれば、本解析法による最大トルクは実験値と比較的良い対応を示し、計算値の実験値に対する比は0.715～1.139の範囲にあり、平均値で0.956、変動係数は0.109であった。また、ひび割れトルクについては最大トルクに比べ幾分変動が大きくなるものの計算値／実験値比は平均0.905であり、幾分安全側ではあるが、おおむね評価することができた。

図-9に示したトルク-ねじり角関係については、体積鉄筋比 p_{bh} が2%程度以下の小さい場合には、変形挙動を精度良く表していると考えられるが、 p_{bh} が3%程度以上の場合には変形が小さく現れる場合があった(B5,B6,G5)¹³⁾。また、G8¹³⁾については、実験値は全かぶり有効の解析に近い挙動を示し、有効かぶり式を用いた本解析法では耐力が小さく評価された。さらに、正方形断面でかぶりを変化させた長滻らのCシリーズ³⁾ではかぶりの減少を過大に見積もることもあった。かぶりが試験体寸法に比して大きな場合には、本研究で用いているRC板で構成された薄肉閉断面理論の適用範囲を超えることも考えられる。

4. 純ねじり耐力算定式の検討

示方書では、純ねじり耐力として弾性解に基づくコンクリートの斜め圧縮破壊耐力 M_{tcud} （本論文では T_{uccal} とする）と立体トラスモデルにおいて軸方向、横方向の両鉄筋が降伏した場合の耐力 M_{byd} （= T_{uycal} ）を計算し、両者のうち小さい方を純ねじり耐力としている。本研究で対象とした試験体に対し示方書式による耐力算定を行った結果を表-3①に示す。これによれば算定値の実験値に対する比の平均は0.920で幾分安全側の評価となっている。特に、*印で表した斜め圧縮破壊として判定されたものに対してはかなり安全側となっているものがある。図-10に示方書式で斜め圧縮破壊として算定されたR2試験体の軸方向鉄筋および横方向鉄筋のひずみ測定結果を示すが、それぞれ半数の鉄筋は降伏ひずみに達している。小試験体のため降伏ひずみが大きくなることもあるが、トルク-ねじり角関係は長い塑性棚状の変形を示し、最大ねじり角も10deg/mを越えており、降伏の状態と考えられ、本来鉄筋の降伏破壊であったものが斜め圧縮破壊として評価されている場合があると考えられる。

前章で検討したように、終局時において横方向鉄筋外側のかぶりコンクリートの剥離を考慮した場合、横方向鉄筋中心を結ぶ線はせん断流の外周となる。そこで、横方向鉄筋の中心線をせん断流の外周として耐力の解析を行なうこととした。このように仮定した場合、トルクを算定するためには示方書式では必要のなかったせん断流

表-3 純ねじり耐力算定式

試験体	実験値		①示方書式		②提案式		
	T_{uexp}	T_{uccal}	T_{uycal}	$\frac{T_{uycal}}{T_{uexp}}$	T_{uycal2}	$\frac{T_{uycal2}}{T_{uexp}}$	
	kNm	kNm	kNm		kNm		
B1	22.26	37.52	22.47	1.009	20.50	0.921	
B2	29.26	38.22	33.65	1.150	29.44	1.006	
B3	37.51	37.85	48.63	* 1.009	39.74	1.059	
B4	47.34	39.49	66.35	* 0.834	51.25	1.083	
B5	56.15	38.50	88.86	* 0.686	59.88	1.066	
B6	61.69	38.36	110.64	* 0.622	63.27	1.026	
B7	26.89	36.43	24.46	0.909	22.73	0.845	
B8	32.54	36.96	24.61	0.756	22.91	0.704	
B9	29.83	38.36	26.41	0.886	23.08	0.774	
B10	34.35	36.77	26.36	0.767	22.75	0.662	
D1	22.37	36.86	23.03	1.029	20.90	0.934	
D2	27.68	36.14	34.56	1.249	29.60	1.069	
D3	39.09	38.08	50.65	* 0.974	41.13	1.052	
D4	47.91	39.53	68.41	* 0.825	52.42	1.094	
M1	30.39	39.04	27.79	0.914	24.22	0.797	
M2	40.56	39.49	40.04	* 0.974	32.91	0.811	
M3	43.84	36.96	49.86	* 0.843	37.47	0.855	
M4	49.60	36.81	66.62	* 0.742	44.85	0.904	
M5	55.70	37.80	85.63	* 0.679	52.21	0.937	
M6	60.11	38.72	104.15	* 0.644	57.90	0.963	
I2	36.04	44.59	35.84	0.994	32.80	0.910	
I3	45.65	44.59	50.86	* 0.977	44.70	0.979	
I4	58.07	44.59	66.13	* 0.768	55.82	0.961	
I5	70.73	44.59	86.41	* 0.630	68.97	0.975	
I6	76.72	44.59	110.65	* 0.581	82.75	1.079	
^(a) H _{sl}	J1	21.47	27.06	23.12	1.077	19.18	0.893
	J2	29.15	27.25	35.11	* 0.935	26.27	0.901
	J3	35.25	29.37	50.76	* 0.833	34.92	0.991
	J4	40.67	29.25	67.63	* 0.719	38.77	0.953
	G1	26.78	55.89	25.32	0.945	23.76	0.887
^(b) H _{sl}	G2	40.34	56.92	38.99	0.957	35.44	0.879
	G3	49.60	53.04	55.91	* 1.069	47.56	0.959
	G4	64.85	54.45	74.06	* 0.840	60.22	0.929
	G5	71.97	53.11	99.97	* 0.738	73.71	1.024
	G6	39.09	56.02	38.96	0.997	35.30	0.903
	G7	52.65	56.98	57.25	* 1.082	49.65	0.943
	G8	73.44	54.52	81.55	* 0.742	64.85	0.883
	N1	9.10	12.02	8.87	0.975	8.01	0.881
^(c) H _{sl}	N1a	8.99	11.85	8.84	0.982	7.96	0.885
	N2	14.46	12.20	15.53	* 0.843	12.98	0.898
	N2a	13.22	11.79	16.06	* 0.892	13.15	0.995
	N3	12.20	11.56	13.27	* 0.947	11.20	0.918
	K1	15.37	21.50	13.62	0.886	12.11	0.788
^(d) H _{sl}	K2	23.73	21.77	23.84	* 0.918	19.33	0.815
	K3	28.47	21.20	34.78	* 0.745	24.72	0.868
	K4	35.03	21.05	53.46	* 0.601	29.55	0.844
	C1	11.30	21.73	10.46	0.926	9.63	0.852
	C2	15.25	21.54	19.02	1.247	16.26	1.066
^(e) H _{sl}	C3	20.00	21.68	28.48	* 1.084	22.44	1.122
	C4	25.31	21.79	40.58	* 0.861	28.13	1.112
	C5	29.72	21.81	54.51	* 0.734	31.62	1.064
	C6	34.23	21.95	71.26	* 0.641	33.61	0.982
	C1	15.03	12.04	18.11	* 0.801	14.48	0.963
^(f) H _{sl}	C2	15.49	23.52	18.11	1.168	14.48	0.934
	C3	18.24	40.64	18.11	0.993	14.48	0.794
	S1	24.45	37.36	29.13	1.192	25.77	1.054
	S2	29.43	37.36	43.70	* 1.269	36.21	1.230
	S3	34.28	37.36	58.27	* 1.090	45.08	1.315
^(g) H _{sl}	R1	5.36	2.52	10.97	* 0.471	6.31	1.178
	R2	4.39	5.02	10.97	* 1.142	6.12	1.393
	R3	5.31	8.56	10.97	* 1.611	5.80	1.092
	S1	11.83	10.83	17.25	* 0.915	14.13	1.195
	S2	12.37	15.64	17.25	* 1.264	14.59	1.179
^(h) H _{sl}	S3	14.10	25.97	17.25	1.224	14.62	1.037
	S4	17.11	39.06	17.25	1.008	14.51	0.848
	平均					0.920	0.968
	変動係数					0.220	0.139
最大値					1.611	1.393	
最小値					0.471	0.662	

*：示方書式において斜め圧縮破壊として判定

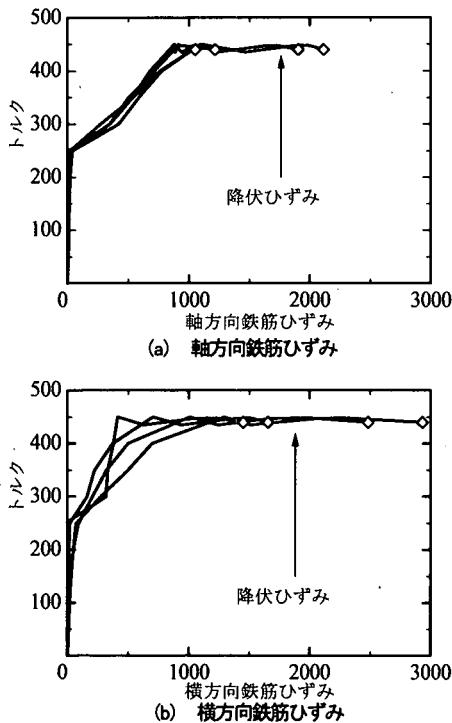


図-10 R2 試験体の鉄筋のひずみ挙動

の有効厚さ t_d を規定する必要がある。以下に t_d の検討方法を述べる。

せん断流の外周を横方向鉄筋の中心線とするためねじりの有効面積 A_0 は

$$A_0 = (b_0 - t_d)(h_0 - t_d) \quad (6)$$

となる。式(6)をトルクとせん断流の関係式(3)に代入し整理すれば、

$$t_d = l_0 - \sqrt{l_0^2 - \left(a_0 - \frac{T}{2q} \right)} \quad (7)$$

$$\text{ここで, } l_0 = \frac{b_0 + h_0}{2}, \quad a_0 = b_0 h_0$$

また、横方向鉄筋と軸方向鉄筋の両方が降伏した場合のせん断流 q は

$$q = \tau_{lt} t_d = \sqrt{q_i q_w} \quad (8)$$

ここで、

$$q_i = \sum A_{sl} f_{yl} / \{2(h_0 + b_0 - 2t_d)\}$$

$$q_w = A_{sw} f_{yw} / s$$

式(7)に実験によって得られた最大トルク $T_{u\exp}$ および断面諸元を代入し、式(8)を適用することによりせん断流の外周を横方向鉄筋中心と仮定した場合の実験値に対応した t_d を求めた。ここで、 q_i と q_w の大きい方を他方

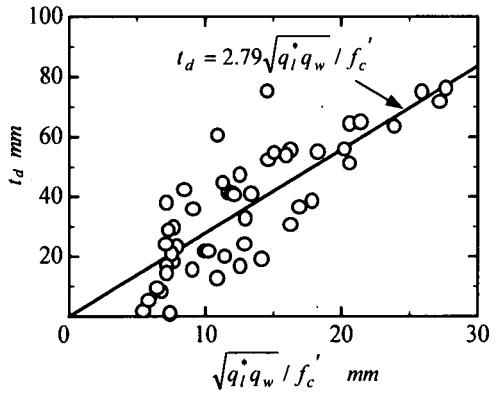


図-11 t_d の検討

の 1.25 倍までに制限した¹⁰⁾。また、 q_i は t_d の関数であるから逐次代入法による収束計算を行なった。収束条件は $\{t_{d(i+1)} - t_{d(i)}\} / t_{d(i+1)} < 0.001$ とした。

また、式(8)、式(1c)より、

$$t_d \propto \sqrt{q_i q_w} / \sigma_d \quad (9)$$

ここでは、 q_i に代わり算定上

$$q_i^* = A_{sl} f_{yl} / \{2(h_0 + b_0)\} \quad \text{を用いた。}$$

ねじりによる破壊パターンは横方向鉄筋の降伏、軸方向鉄筋の降伏、斜材コンクリートの圧壊^{15), 16)}があるが、実験において破壊状況を観察すると、鉄筋の降伏による破壊かあるいは斜材コンクリートの破壊パターンか区別することが一般的に難しい。

かぶりコンクリートを無視して、鉄筋で囲まれたコンクリートを対象にする場合、破壊パターンをコンクリートの圧壊と鉄筋降伏の混合型の破壊と考えるのが合理的と考えられる。鉄筋降伏後のひずみの増大と共にかぶりコンクリートが力の分担を失い、コアコンクリートの応力が増大し、最終的にはコンクリートの圧縮破壊も同時に起こり耐荷力を失うと考えれば、式(9)中の σ_d は f_c' に近くなり、終局時のせん断流の有効深さ t_d は

$$\sqrt{q_i q_w / f_c'} \quad \text{に対応していると考えられる。}$$

そこで、先の実験データを用い式(7)により求めた t_d と $\sqrt{q_i q_w / f_c'}$ の関係を図-11 に示す。図-11 によれば、両者の間には線形関係が認められ、以下の t_d の評価式を得た。

$$t_d = 2.79 \frac{\sqrt{q_i q_w}}{f_c'} \quad (10)$$

$$\text{ここで, } q_i^* = A_{sl} f_{yl} / \{2(h_0 + b_0)\}$$

式(10)により t_d を求め、式(3)、式(6)および式(8)により最大トルク $T_{u\text{cal}2}$ を計算した結果を表-3②および図-12 に示す。

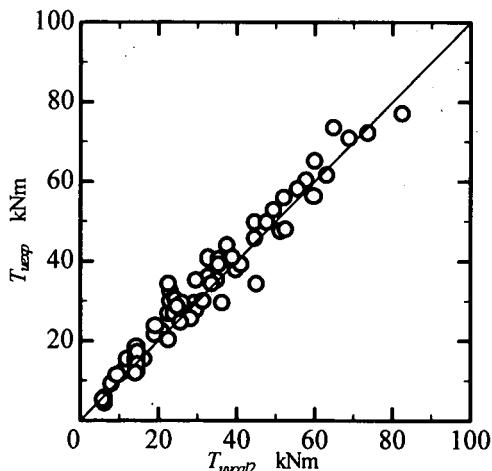


図-12 純ねじり耐力式の実験値との比較

表-3②によれば、計算値の実験値に対する比の平均は0.968、変動係数は0.139であり比較的高い精度で最大トルクを評価できると思われる。

図-11において $\sqrt{q_1 q_w} / f_c'$ が7(mm)以下の場合、式(10)の適合が悪くなり、かぶりコンクリートを無視する仮定からはずれると考えられるが、図-12に示すように耐力の算定に対してはあまり問題が無いと考えられる。

5. 結 論

本研究により得られた結論を以下に示す。

(1) RC 平板モデルを用いた鉄筋コンクリートの純ねじり変形解析において、かぶりコンクリートのねじりひび割れ発生により生ずる剛性低下あるいは剥離現象を評価するため、コンクリートの主圧縮ひずみを指標とした有効かぶりを考慮することにより、ほぼ妥当な精度で変形挙動を把握できる。

(2) 耐力の算定において、示方書におけるコンクリートの斜め圧縮破壊耐力は安全側の算定値を与える傾向にあり、上述の有効かぶりの考察から、終局時においてはかぶりコンクリートの分担を無視し、それに対応した耐力に対するコンクリートの有効厚さの算定式を導いた。すなわち、せん断流の外周を横方向鉄筋中心とするせん断流の有効厚さ評価式を既往の実験値より求め、耐力の算定値と実験値を比較した結果、良い対応を示していた。

参考文献

- 1) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.
- 2) Hsu, T. C. : Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion, *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.6, pp.624-635, 1988.
- 3) 長瀧重義、李 承漢、岡本享久：鉄筋コンクリート部材のねじり耐荷機構に関する一考察、土木学会論文集、No.390/V-8, pp.179-188, 1988.
- 4) 二羽淳一郎、桧貝 勇、守屋紀和：ねじりを受けるRC棒部材に関する解析的研究、土木学会論文集、No.420/V-13, pp.97-105, 1990.
- 5) Mitchell, D. and Collins, M. P. : Diagonal Compression Field Theory - A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion, *ACI Journal*, Vol.71, No.8, pp.396-408, 1974.
- 6) Rahal, K. N. and Collins, M. P. : Effect of Thickness of Concrete Cover on Shear - Torsion Interaction - An Experimental Investigation, *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.3, pp.334-342, 1995.
- 7) 長瀧重義、岡本享久、曾我寿孝、安達孝行：二軸応力下にある鉄筋コンクリート板要素の構成則とねじり部材への適用、土木学会論文集、No.414/V-12, pp.129-136, 1990.
- 8) Rahal, K. N. and Collins, M. P. : Analysis of Sections Subjected to Combined Shear and Torsion - A Theoretical Model, *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.4, pp.459-469, 1995.
- 9) 志村和紀、原田希樹、佐伯 昇：ねじりを受ける矩形およびT形RC部材の変形性状について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.587-592, 1994.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」, 1996.
- 11) 児島孝之、高木宣章、上垣義明：PRC部材の終局純ねじり耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.2, pp.191-196, 1990.
- 12) 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析、土木学会論文集、No.360/V-3, pp.1-10, 1985.
- 13) Hsu, T. T. C. : Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members, *ACI SP-18*, pp.261-306, 1968.
- 14) Rahal, K. N. and Collins, M. P. : Simple Model for Predicting Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Sections, *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, pp.658-666, 1996.
- 15) 佐伯 昇：コンクリート部材のねじり応力と耐力、コンクリート工学、Vol. 29, No.9, pp.19-27, 1991.
- 16) 佐伯 昇、高田宣之、志村和紀、藤田嘉夫：ねじりと純曲げの組合せ荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力、土木学会論文集、No. 442/V-16, pp.35-42, 1992.

CALCULATION FOR DEFORMATION AND ULTIMATE STRENGTH
OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS UNDER TORSION
IN CONSIDERING EFFECTIVE COVER THICKNESS

Kazunori SHIMURA and Noboru SAEKI

The concept of the effective cover thickness was applied to predict the deformation and ultimate strength of reinforced concrete members subjected to pure torsion. The principal compressive strain was applied as an index of the effective cover thickness in order to evaluate the effect of cover thickness on the torsional strength. The predicted behavior using the reinforced concrete plate model showed good agreement with experimental data. When the concrete cover is spalled out at ultimate state, the shear flow should flow inner to the reinforcement cage. Therefore, the ultimate strength assuming the center line of lateral reinforcement as the perimeter of shear flow was investigated. The space-truss model was applied for calculating the ultimate torsional strength. It was found the proposed method was applicable for predicting the ultimate torsional strength of reinforced concrete members.