

(19) コンクリート充填鋼角柱のねじり耐荷力

Ultimate strength of Concrete filled Steel Box Columns subjected to Torsion

白 済 鉉* 清 宮 理** 廣 瀬 健 太 郎*
Jehyun BECK, Osamu KIYOMIYA and Kentaro HIROSE

* 早稲田大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

** 工博 早稲田大学 教授 理工学部 土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Recently, it has come to be obvious that steel-concrete composite members have an outstanding deformation capacity compared with steel or reinforced concrete members. However, in contrast to composite members subjected to bending, shear and axial force, the mechanical properties of composite members subjected to torsion are not well known. So that static loading tests on steel columns and composite columns were carried out in order to investigate basic properties of torsion and mechanical behavior. From the result of loading test, following conclusions were obtained; (1) The failure of thin-walled steel member was determined by local buckling and thick-walled one was by plastic characteristic. (2) The composite member has much higher bearing capacity than steel member because local buckling of thin steel plate was prevented by filled concrete.

Keywords : steel member, composite member, torsion, local buckling, static loading test

1. まえがき

多くの構造物では、構造物の設計にあたり、大きなねじりモーメントが生じないように構造設計を行って、ねじりに関する検討は通常省略されている。しかし、構造物の大型化、立地条件やデザイン面から非対称構造などが提案されてきており、ねじりの検討が必要となる場合がある。建物や橋梁下部架構に地震などの面外からの水平力が作用したときには、大きなねじりモーメントが生じる場合がある。また、地盤の不等沈下を受ける大型の海洋構造物、波浪動揺を受ける浮遊式構造物、地震や船舶の衝突などで偏心荷重を受ける杭式構造物などでもねじりの問題は近年重要となっている¹⁾。

鋼部材と鉄筋コンクリート部材に対しては、従来から多数の研究がなされてきており力学性状について載荷試験などでかなり把握され、設計式も提案されている。しかしながら、ねじりを受ける合成部材の力学的性質は曲げ、せん断あるいは軸圧縮力などを受ける部材に比べて、まだ不明な点が多くてその検討例も限られている。また設計式の提案も少なく、適用性についても十分吟味されているとは言い難い。合成部材は、高い強度特性や変形性能を持ち合わせており橋梁、海洋構造物など各種の構造物に適用されつつある。

そこで、本研究では、ねじりを受ける鋼部材及び合成部材の変形、ひび割れ、破壊などの基本的なねじり特性を検討するため、純ねじりの静的載荷試験を行った。ねじり載荷試験は正方形断面の鋼部材と合成部材を一端固定、他端ねじりの

条件で行った。なお、汎用プログラムで材料非線型を考慮した有限要素解析を行い、かつ累加方式による設計式と試験結果との比較検討を行った。

2. ねじりに関する理論式

2.1 コンクリート柱部材

弾性学²⁾によれば、短辺 a 、長辺 b の長方形断面を有する中実直線材に単純ねじりが作用したときの最大せん断応力 $\tau_{\max}$ は次式で与えられる。

$$\tau_{\max} = G_c \vartheta a k \quad (1)$$

ここに、 G_c : コンクリートのせん断弾性係数

$$k = \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \cosh \frac{(2n-1)\pi b}{2a}} \right] \quad (2)$$

一方、ねじりモーメント T_c とねじり率 ϑ の関係は次式で与えられる。

$$T_c = \frac{1}{3} G_c \vartheta a^3 b k_1 \quad (3)$$

ここに、

$$k_1 = \left[1 - \frac{192 a}{\pi^2 b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4 \tanh \frac{(2n-1)\pi b}{2a}} \right] \quad (4)$$

一般長方形断面材の単純ねじりに関して、式 (1) にねじり剛度 $G_c K_c$ と係数 k 、 k_1 を導入して、また、式 (1) と

式 (2) から $G_c \vartheta$ を消去すると、ねじりモーメント T_c とねじり率 ϑ および最大せん断応力 $\tau_{\max}$ の関係は次のように与えられる³⁾。

$$T_c = G_c K_c \vartheta \quad (5)$$

$$T_c = \tau_{\max} a^2 b k_1 / k \quad (6)$$

ここに、 K_c はコンクリート断面の純ねじり定数であり、次式により求められる。

$$K_c = \frac{1}{3} a^3 b k_1 \quad (7)$$

2.2 鋼殻柱部材

一室の閉断面部材についてのせん断応力 τ_s とねじり率 ϑ の関係は Bredt-Batho の実用計算公式から次のように与えられる⁴⁾。

$$\tau_s = \frac{q_s}{t} = \frac{T_s}{2 F t} \quad (8)$$

$$\vartheta = \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{T_s}{G_s K_s} \quad (9)$$

ここに、 q_s ：単純ねじりによるせん断流

F ：薄肉中心線に囲まれる面積

G_s ：鋼のせん断弾性係数

K_s ：鋼断面の純ねじり定数

$$K_s = \frac{4 F^2}{\oint \frac{dc}{t}} \quad (10)$$

上述の式からねじりモーメント T_s とねじり率 ϑ およびせん断応力 τ_s の関係は次のように求められる。

$$T_s = G_s K_s \vartheta \quad (11)$$

$$T_s = 2 F t \tau_s \quad (\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}) \quad (12)$$

2.3 合成柱部材

合成柱部材のねじり耐荷力 T_{sc} は、次式のように鋼部分とコンクリート部分を別個に計算し単純に累加する方法を今回検討した。

$$T_{sc} = T_c + T_s \quad (13)$$

また、合成柱部材のねじりモーメント T_{sc} とねじり率 ϑ の関係は式 (5)、および式 (11) を用いて、次式で与えられるものとみなす⁵⁾。

$$T = G K \vartheta = T_c + T_s = (G_c K_c + G_s K_s) \vartheta \quad (14)$$

累加方式では、鋼板とコンクリートの付着性状（完全合成でなく両者が分離していると仮定）と鋼板によるコンクリートの拘束圧の効果を見逃している。合成部材に対してはモーメントを単純に累加しても良いかも現在不明である。

2.4 終局ねじりモーメントとねじり剛度

表-1 には、ねじりに関する理論式から求めた各供試体の終局ねじりモーメントとねじり剛度の計算結果を示す。

表-1 終局ねじりモーメントとねじり剛度

供試体	鋼板の厚さ (mm)	終局ねじり モーメント (kN・m)	ねじり剛度 $G K$ (kN・m ²)
コンクリート 補間値	—	3.29	804.3
	2.3	3.24	1022.8
	3.2	3.26	947.4
	4.5	3.27	895.4
鋼殻柱	2.3	15.0	621.0
	3.2	20.8	864.0
	4.5	29.2	1215.0
合成柱	2.3	18.2	1643.8
	3.2	24.0	1811.3
	4.5	32.5	2110.4

3. 有限要素法による解析

ねじりを受ける鋼殻柱、無筋コンクリート柱および合成柱部材を材料非線型を考慮した有限要素法で解析した。有限要素解析では汎用プログラムの SOLVIA を使用した。図-1 に解析モデルを示す。使用する要素の種類は、鋼板にシェル要素を、コンクリートには、ソリッド要素を用いた。鋼部材は図-2 に示すようにバイリニヤ型、また、コンクリート部材の応力-ひずみ関係を図-3 に示す。

部材にねじりモーメントを与えるにあたり、部材の自由端となる側の横断面各 4 辺に分布荷重をかけた。図-4 に板厚 4.5mm の場合の合成柱の Von.Mises 応力分布を示す。鋼殻柱の解析では、板厚の違いによらず、局部座屈せずすべて塑性変形で終局を迎えた。局部座屈の件は、今後の課題としたい。

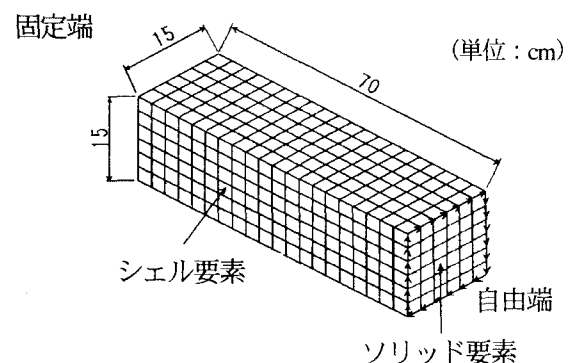


図-1 FEM 解析モデル

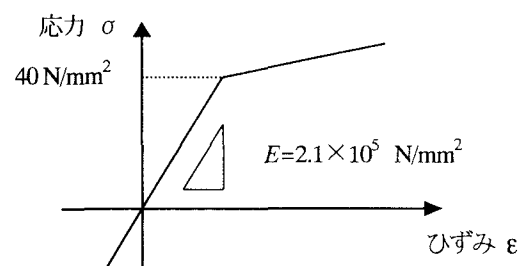


図-2 鋼部材の応力-ひずみ関係

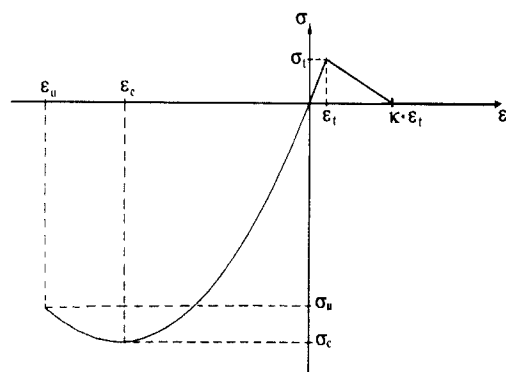


図-3 コンクリート部材の応力-ひずみ関係

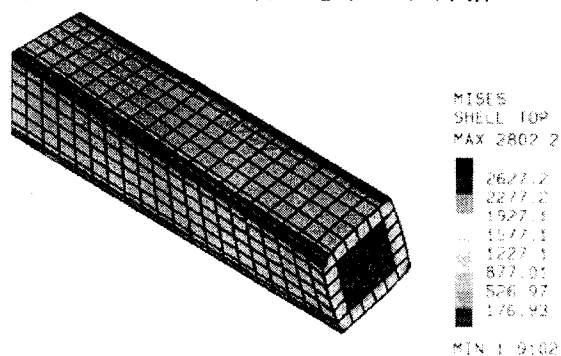


図-4 Von.Mises 応力分布

4. 載荷試験

4.1 供試体

表-2 に供試体の種類を示す。また、図-5 に供試体の基本構造を示す。鋼板の厚さが異なる両端コンクリート中詰め

表-2 供試体の種類

供試体名	中詰めコンクリート	鋼板の厚さ (mm)
Steel - 23	両端から 150mm	2.3
Steel - 32	両端から 150mm	3.2
Steel - 45	両端から 150mm	4.5
Comp - 23	全断面	2.3
Comp - 32	全断面	3.2
Comp - 23	全断面	4.5
Conc	全断面	—

・Steel；コンクリート中詰め鋼殻柱部材

・Conc；無筋コンクリート部材

・Comp；コンクリート充填鋼製柱の合成部材

鋼殻柱部材 3 体、全断面コンクリート充填鋼製柱の合成柱部材 3 体及び 1 体の無筋コンクリート柱部材をねじり載荷試験に用いた。鋼殻部材は、両端から 150mm の範囲に支持板を設けて中詰めコンクリートを用いて補強を行った。いずれの供試体でも基本寸法は全長 1m、断面 15×15cm とした。鋼板の板厚は 2.3、3.2 および 4.5mm であるので辺長と板厚の比 (h/t) はそれぞれ 65、47 および 33 である。

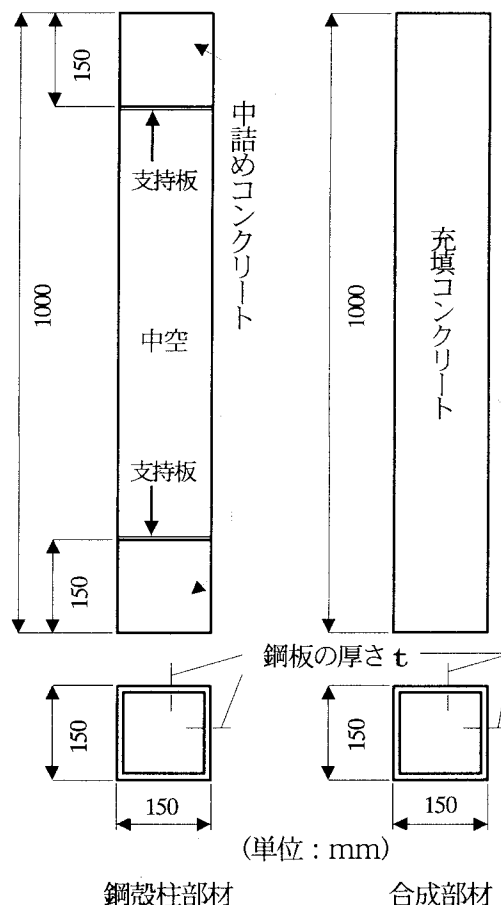


図-5 供試体の基本構造

4.2 材料特性

供試体と同一条件で養生した直径10cm、高さ20cmの円柱管理供試体を用いてコンクリートの圧縮試験と引張試験を行った。管理供試体の材料試験は載荷試験前と載荷試験後に圧縮試験を行い、その比例値を載荷試験の解析に用いた。管理供試体の試験結果の平均値とその試験当日の補間値を表-3 に示す。鋼殻柱部材にはSS-400の鋼板を用いた。

表-3 コンクリートの強度試験結果と補間値

		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
補間値	載荷試験前	51.3	3.3×10 ⁴	0.21	4.6
	載荷試験後	52.0	2.6×10 ⁴	0.18	4.7
	Comp-23	51.0	3.5×10 ⁴	0.21	4.6
	Comp-32	51.3	3.2×10 ⁴	0.20	4.6
	Comp-45	51.6	3.0×10 ⁴	0.20	4.7
	Conc	51.9	2.7×10 ⁴	0.19	4.7

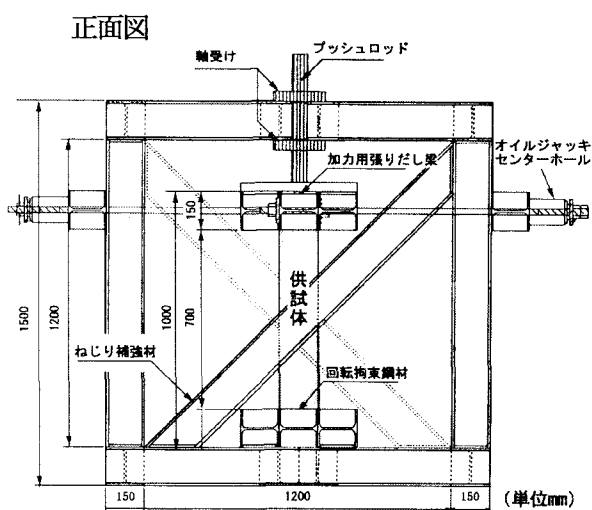
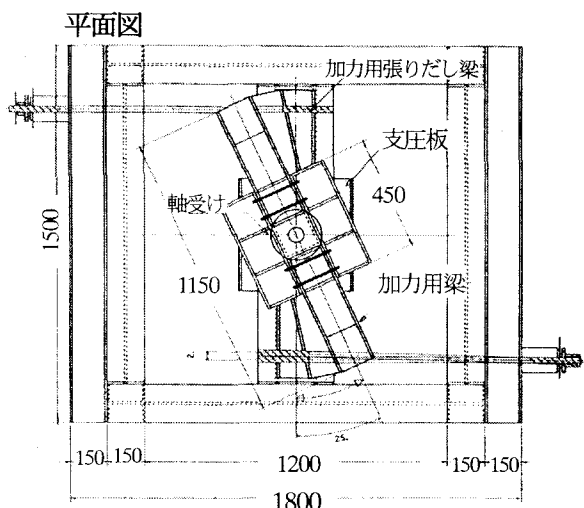


図-6 載荷装置の概要

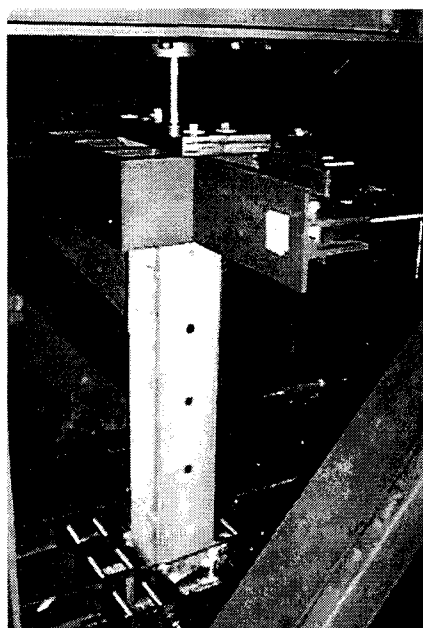


図-7 載荷状況

4.3 載荷方法

図-6に載荷装置の概要を示す。載荷方法として、上部支圧板の張りだし梁の載荷治具を介して油圧ジャッキにより加力し、両端に大きさが等しく方向が逆向きのねじりモーメントを与えた。ジャッキによる力により供試体に加えられる偶力の腕の長さ l は、0.5mとした。すなわち、ジャッキにより大きさ P の荷重を加えることによって、供試体に加えられるねじりモーメントの大きさは、 $P \cdot l$ (kN・m)である。載荷にあたっては、二台のジャッキの引き込み量がほぼ等しくなるように注意しながら、静的に荷重を単調増加させた。載荷状況を図-7に示す。

5. 載荷試験結果

5.1 ねじりモーメントとねじり率

図-8～図-10に載荷試験で得られたねじりモーメントとねじり率の関係を示す。Steel-45 供試体では、ねじりモーメント 35kN・m 程度まで両者の関係は直線的であり、約 40kN・m を超えたあと曲線の勾配が徐々に緩やかになった。Steel-32 供試体では、28kN・m 程度で横這いになり、ねじり率 0.21(rad/m) 程度でねじりモーメントがいきなり低下して、そのあと徐々に載荷荷重が減少した。この供試体では図-11に示すように供試体

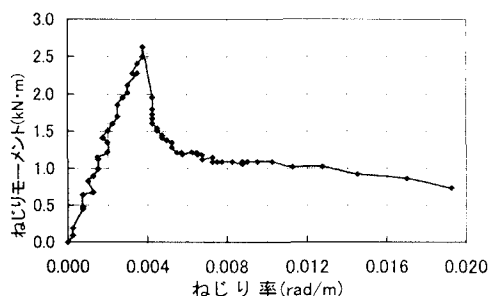


図-8 ねじりモーメントとねじり率(コンクリート)

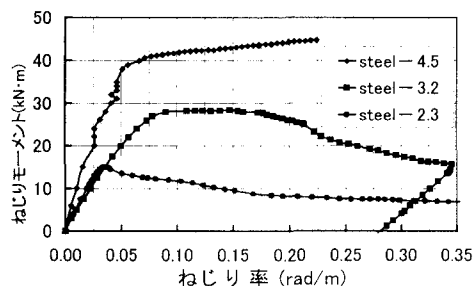


図-9 ねじりモーメントとねじり率(鋼殻柱)

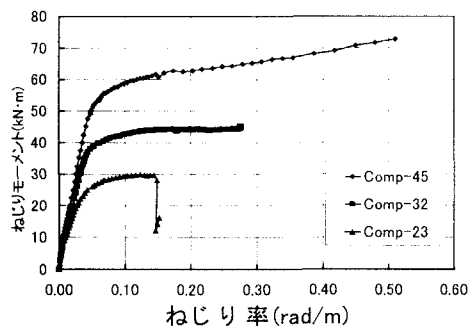


図-10 ねじりモーメントとねじり率(合成柱)

中央部に局部座屈現象が生じた。Steel-23 供試体でも $15\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度で急に折れたあとと徐々に減少した。Steel-23 供試体には Steel-32 供試体よりも大きい局部座屈による変形が見られた。合成部材は、いずれの供試体でもねじり率が小さい段階で直線的で、鋼材降伏後はほぼ水平となった。Comp-45 供試体ではねじりモーメントが $50\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度まで直線的であった。また $50\sim 60\text{kN}\cdot\text{m}$ で勾配が徐々に緩やかになって約 $60\text{kN}\cdot\text{m}$ を超えたあとと曲線の勾配がほぼ水平になった。Comp-32 供試体でも $35\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度まで直線的であって、約 $40\text{kN}\cdot\text{m}$ を超えたあとと Comp-45 と同じような曲線となった。Comp-23 供試体では少し折れたあとと最大ねじりモーメント $30\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度まで緩慢な曲線が描かれた。この供試体では角部の溶接されている部分の破裂のため荷重はその時点で終了した。

5.2 充填コンクリートの崩壊状況

荷重試験後に合成柱供試体の鋼板を切り開き、観察された充填コンクリートのひび割れ状況を図-12 に示す。合成柱供試体の充填コンクリートはひび割れが全面に渡り等間隔に生じ、ひび割れの方法は大体 45° で、せん断崩壊している状況がわかった。



図-11 局部座屈現象



図-12 ひび割れ状況

6. 試験結果とその考察

ねじりに関する理論式と有限要素法による解析結果および試験結果から求めたねじりモーメントとねじり率曲線を図-13～図-15 に示す。また、表-4 には各種供試体におけるねじり耐力力の比較値を示す。

6.1 コンクリート柱

図-13 にコンクリート柱供試体の試験結果と理論値および有限要素解析結果との比較を示す。低荷重段階におけるコンクリート柱供試体のねじり剛度 $G_c K_c$ の試験値は約 $800\text{kN}\cdot\text{m}^2$ となっている。これは理論式から求めたねじり剛度 $804.3\text{kN}\cdot\text{m}^2$ と概ね一致している。また、有限要素解析から求めたねじり剛度

$1100\text{kN}\cdot\text{m}^2$ は試験値より約 1.3 倍程度高くなっている。破壊ねじりモーメントは試験値が $2.63\text{kN}\cdot\text{m}$ となった。これに対して、理論式から求めた計算値 $3.29\text{kN}\cdot\text{m}$ は試験値より約 1.25 倍高くなっている。また、有限要素解析結果によると、ねじり剛度が若干異なるものの、破壊ねじりモーメントの解析値 $2.70\text{kN}\cdot\text{m}$ は、試験値とほぼ一致した。

6.2 鋼殻柱

鋼殻柱供試体の中で板厚 4.5mm の Steel-45 供試体の試験結果と理論値および有限要素解析結果との比較を図-14 に示す。表中の試験値は、ひずみゲージの測定値で鋼材が降伏したときのねじりモーメントを示す。理論値、有限要素法も鋼材が降伏したときのねじりモーメントを示す。

試験結果から低荷重段階における鋼殻柱供試体(板厚 4.5mm)のねじり剛度 $G_s K_s$ は $1215.0\text{kN}\cdot\text{m}^2$ となった。これは、図-14 に示したようにねじりモーメントが約 $15\text{kN}\cdot\text{m}$ までは、線型性を保ち、理論式から求めた計算値と有限要素解析結果による解析値がほぼ等しくなった。しかし、その後のねじり剛度は非線型を示し始めている。鋼殻柱供試体のねじり耐力力は表-4 か

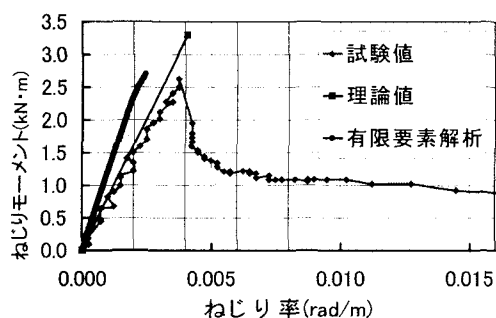


図-13 試験結果との比較 (コンクリート柱)

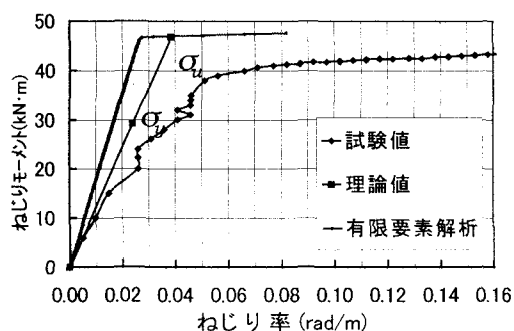


図-14 試験結果との比較 (鋼殻柱)

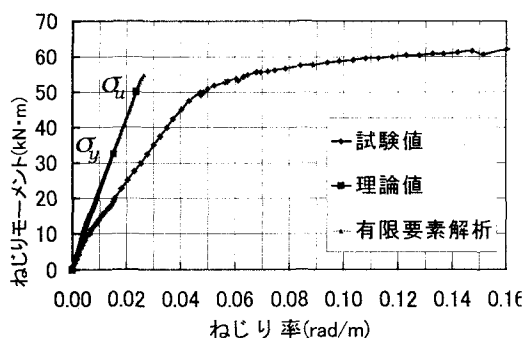


図-15 試験結果との比較 (合成柱)

表-4 各種供試体におけるねじり耐荷力の比較値

部材		理論値 T_a ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	有限要素解析 T_b ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	試験結果 T_c ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	T_a/T_c	T_b/T_c
コンクリート柱		3.3	2.7	2.6	1.25	1.03
鋼 殻 柱	板厚 2.3mm	14.9	23.7	14.9	1.00	1.59
	板厚 3.2mm	20.8	32.8	27.0	0.77	1.21
	板厚 4.5mm	29.2	46.0	39.0	0.75	1.18
合 成 柱	板厚 2.3mm	18.2	30.1	24.0	0.76	1.25
	板厚 3.2mm	24.0	39.5	36.0	0.67	1.10
	板厚 4.5mm	32.5	52.0	48.0	0.68	1.08

ら試験値が $38.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ となっている。理論式から求めた計算値は $29.23 \text{ kN}\cdot\text{m}$ で試験値の $38.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ より 23%位小さくなった。また、有限要素法による解析値 $46 \text{ kN}\cdot\text{m}$ は試験値より 1.2 倍位高くなっている。

有限要素解析では、板厚の違いによらず、すべて塑性破壊した。しかし、載荷試験によれば、板厚 2.3mm と 3.2mm の鋼殻柱は局部座屈により破壊した。板厚が薄いと、ねじりモーメントが加わる際に生じる圧縮力により局部座屈するが、今回の解析では、このような局部座屈は再現できなかった。

6.3 合成柱

合成柱供試体の中で板厚 4.5mm の Comp-45 供試体の試験結果と理論値および有限要素解析結果との比較を図-15 に示す。

試験結果からねじりモーメントが約 $10 \text{ kN}\cdot\text{m}$ までのねじりモーメントとねじり率曲線の勾配は直線的で、ねじり剛度 GK の試験値は約 $2100 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ となった。これは 3.3 (1) の式に示したように鋼部分とコンクリート部分を別個に計算し単純に累加する方法で求めた理論値とほぼおなじ結果が得られた。しかしコンクリートにひび割れが生じた後は、供試体のねじり剛性が低下し鋼板のみのねじり剛性となった。いったん部材内に貫通ひび割れが生じるとねじり剛性は累加できないといえる。図-15 でねじれ率が 0.05 rad/m よりねじり率と曲げモーメントの関係が折れ曲がっている。この位置のねじり率に対して載荷試験では 1.0 倍以上のねじり率でもねじりモーメントは低下しなかった。

有限要素解析でも、ねじりモーメントが約 $10 \text{ kN}\cdot\text{m}$ までは、ねじり率の増加が試験値とよく似ている。その後のねじり率の増加は解析の方が小さかった。今回の有限要素法ではひび割れ後のコンクリートの部材内での挙動をうまく表現していないと考える。各供試体とも解析の方が試験値よりもねじり率の増加は小さかったが、曲線がほぼ横ばいになると思われるねじりモーメントは試験値と解析値は概ね一致している。また、ねじり耐力の試験値は約 $48 \text{ kN}\cdot\text{m}$ となった。これは単純累加方式で求めた理論値 $32.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ より約 1.5 倍高くなっている。この結果から鋼殻柱供試体にコンクリートを充填したことによるねじり耐力は高くなり、かなりの合成効果が得られることがわかった。

7. 結論

(1) 今回のねじり載荷試験において中空鋼部材の破壊性状は、鋼板の厚さが薄い場合局部座屈で破壊して、厚い場合は鋼材の塑性で破壊されることがわかった。鋼管にコンクリートを充填

した合成部材は、中空鋼部材と比較して大きな耐荷力があり、コンクリートの存在により局部座屈が防止される。合成柱の角部の溶接部での破断がなければ 10 程度大きなじん性率が得られることがわかった。

(2) 載荷試験によると、供試体のねじり耐荷力は累加方式によるねじり耐荷力より 30%ほど大きかった。ただし累加方式の適用にあたっては、溶接箇所の局所的な強度が確保されていることが前提となる。有限要素法の計算結果は、載荷試験より逆にやや大きな値を与えた。今回有限要素法では、局部座屈、溶接の破断など考慮できず、また、鋼材の降伏後の挙動の追跡も十分ではなかった。この点は今後の課題としたい。

(3) 設計式と有限要素法での初期剛性は載荷試験結果よりやや大きな値であった。しかし、ねじりモーメントとが比較的小さい段階から、載荷試験ではねじり剛性が低下する傾向があった。この原因としてコンクリートにひび割れが入るとねじり剛性は鋼部分のみで寄与しているためと考える。このためひび割れ発生後は、剛性の累加は出来ない結果となった。

あとがき

今回の載荷試験は、ねじりの基礎的な性状を把握することが目的で、供試体の寸法も小さく境界条件、鋼板の溶接の仕方など課題を残している。今後板厚、形状など幅広い範囲でねじりの座屈を実験的と解析的に検討していきたい。今回の実験等に関して、早稲田大学学生、井口重信君、SK エンジニアリングの小山さんの協力を得たのでここに感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 清宮 理・山田昌郎：鋼板・コンクリート合成部材の純ねじり特性、港湾技術研究所報告 第36巻第2号、1997年7月
- 2) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. : Theory of Elasticity, International student Edition, McGraw-Hill, 1951年
- 3) 小松定夫：薄肉構造物の理論と計算、山海堂、pp.108-158、1969年
- 4) 中井 博・北田俊行：鋼橋設計の基礎、pp.145-157、1992年5月
- 5) 中井 博・北田俊行・才村幸生・神崎昭雅：コンクリートを充填した鋼製箱形断面の終局ねじりに関する実験的研究、土木学会論文集, No. 437/1-17, pp.89-95, 1991年1月