

(28) 鉄筋入りコンクリート充てん鋼管柱材(RMC材)の基礎的研究

関西電力 関屋 進, 広尾 巖
 神戸井鉄工所 竹内修治, 永見晴彦
 ○小林征紀, 田淵敦彦

1. まえがき

鋼管にコンクリートを充てんした構造材(MC材)は、従来から各方面で用いられているが、送電用鉄塔の柱部材としても、昭和30年頃から大型鉄塔を中心に用いられてきた。

鋼管にコンクリートを充てんすると、柱の座屈耐力が増すばかりでなく、鋼管の断面変形を拘束することによって局部座屈が防止できるため、補剛材が不要となり経済的な構造材と言える。

しかしながら、送電鉄塔の柱材は、圧縮と引張の交番応力を受けるため引張の照査を必要とする。この場合、鉄塔がさらに大型化すると鋼管径も大きくなり、単にコンクリートを充てんしただけでは、座屈耐力に余裕を残しながら引張力で部材が決定され不経済になる。

筆者等は、コンクリート充てん鋼管柱材(MC材)の利点を守りながら上記の問題を解消する新構造材として、鉄筋入りコンクリート充てん鋼管柱材(Reinforced-Metal Concrete composite column)の開発を行っている。

RMCは鋼管に鉄筋籠を挿入し、コンクリートを充てんすることで、圧縮に対しては鋼管とコンクリートの合成断面(S+C)で抵抗し、引張力に対しては鋼管と鉄筋(S+R)で抵抗するものである。概念図を図1に示す。

今回、RMCの基礎的研究として、引張力に対する性能の評価のために実験的研究を行った。

2. 基本構造の挙動特性に関する実験

2.1 供試体の使用材料

(A) 鋼管および鉄筋

RMCは、鋼管と鉄筋が協調して引張力に抵抗するものである。従って材料の降伏強度を合わせることとし、STK55(鋼管)とSD40(鉄筋)の組合せにした。また、供試部材の大きさは、送電鉄塔の柱材を対象としたRMCの経済メリット範囲を $\phi 350$ 以上の柱と判断し、その1/2モデルとして $\phi 165.2 \times 4.5$ を選んだ。

材料の規格値と試験結果の比較表を表1に示す。

一方、鋼管と鉄筋の断面積比(応力分担比)については、圧縮と引張の強度バランスに関する検討を行い、鋼管と鉄筋の合計断面の25%の鉄筋(S:R=3:1)とするのが最も経済的であるとの結論に達し、この比を目途に鉄筋量を設定した。

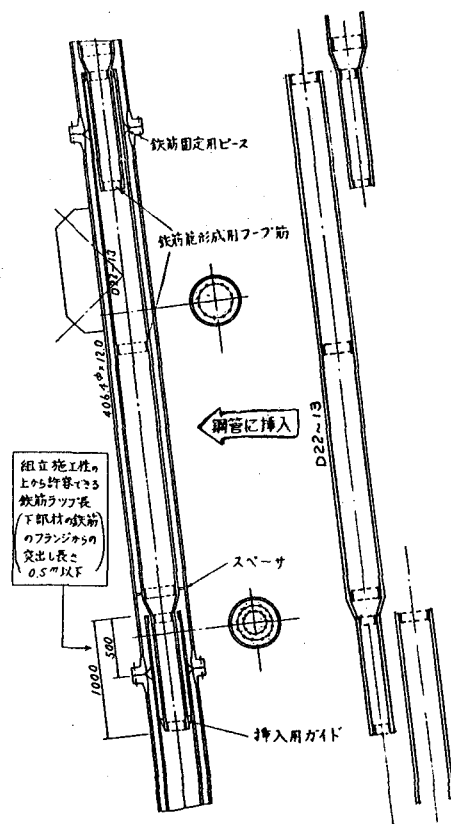


図-1 RMC材の概念図

表1 材料試験結果

	σ_B		σ_T		E		A	
	規格値	実測値平均	規格値	実測値平均	標準値	実測値	規格値	実測値
鋼管	55kg/cm ²	64kg/cm ²	40kg/cm ²	55kg/cm ²	2.1×10^6 kg/cm ²	2.75×10^6 kg/cm ²	2272 cm	2228 cm (b=44)
鉄筋(D-22)	57 "	70 "	40 "	50 "	"	2.81×10^6		異径のため測定不能
"(D-10)	57 "	60 "	40 "	42 "	"	2.01×10^6	0.7188 "	"

(B) モルタル

RMC が性能を発揮するためには、鋼管と鉄筋の仲介役であるモルタルの強度が確保されなければならないが、同時にまた、鉄筋の挿入された鋼管内に完全に充てんできるような充てん施工性の良いモルタルであることも必要である。

一般に、モルタルは時間が経つと収縮する性質があり、鋼管内面の付着力を期待するRMC ではそれを防ぐ必要がある。また、施工性を良くするためにフロー値を小さくすると強度が保てなくなる。対策としては、無収縮セメント、膨張剤、あるいは減水剤などの使用が考えられ、それらの組合せで種々検討を重ね、表2に示す

配合を決定した。この配合に対する圧縮試験結果を表3に示す。これは、テストピース(φ 100×200)6体に対する試験結果の平均値である。

表-2 モルタルの配合

(m³当り)

W/C (%)	水 (kg)	セメント (kg)	砂 (kg)	CSA #20 (kg)	マイティ150R (kg)	フロー値 (sec)
40	824	810	1014	51	6.1	85

セメント : 普通セメント(JIS 5210 ボルトランドセメント)

砂 : 5mmのふるいを通る砂で表乾したもの

マイティ150R : 花王石炭

CSA 20 : 電気化学工業

圧縮強度は、目標値の400kg/cm² (対鋼材の弾性係数比 $N \leq 8$ を得るための目標値)をかなり上廻っているが、収縮度や付着力に対する配合上の配慮が結果的に圧縮強度を高めたものとする。

表-3 モルタル圧縮試験結果

28日強度

直径 ¹⁾ d (cm)	高さ ²⁾ h (cm)	質量 W (g)	最大荷重 P (t f)	圧縮強度 ³⁾ σ_c (kg/cm ²)	ヤング係数 ⁴⁾ E ($\times 10^5$ kg/cm ²)	$\frac{2.1 \times 10^6}{E}$
9.97	19.89	3429	49.5	685	2.63	7.99

2.2 モルタルの付着力

鋼管内面とモルタルの付着力を調査するため、表4に示す供試体によって付着試験を行った。試験結果を表5に示す。

ここで、試験荷重の1.0Pは鉄筋の許容引張強度に対応するもので鋼管の許容応力度(2550kg/cm²)を採った。また、定着強度とは、すべり始めの荷重を定着長さ l に対応する鋼管とモルタルの付着面積で割った値である。

表-4 付着試験供試体

供試体番号	本数	供試体概要	鉄筋本数	供試体の説明 繰返し載荷
				
A	1	$l = 200$	D10~10	繰返し載荷なし
B	1	$l = 400$	D10~14	" なし
BN	1	$l = 400$	"	" あり $0.5P \pm 0.25P$ 10 ⁵ 回
CN	1	$l = 600$	D10~18	" あり $0.5P \pm 0.25P$ 10 ⁵ 回
AS	1	$l = 200$	D22~5	" なし

供試体は、表4に示すように、鉄筋の縦断面積を変えたもの、あるいは繰返し荷重履歴を与えたものがあるが定着強度はこれらの影響を受けなかった。

定着長 l が200mm, 400mm, 600mm, と長くなると、定着強度は、 $26\text{kg}/\text{cm}^2 \rightarrow 20\text{kg}/\text{cm}^2 \rightarrow 19\text{kg}/\text{cm}^2$ と単調に減少している。これは l が短い場合は、全長が有効に定着強度に寄与しており、長くなると、定着強度に関与しない部分が存在することを示している。

2.3 鋼管と鉄筋の応力伝播と応力分布

鋼管から鉄筋への応力伝播状況の確認を目的として、表6に示す3種類のモデルによって引張試験を実施した。

供試体(4)は、鉄筋籠の両端をフリーにしたもの、(5A)は一端を固定したものである。また、(5B)は(5A)と同じ構造で鉄筋の本数のみ変えてある。

試験は、鋼管と鉄筋の許容引張強度(1.0P)の1.5倍(1.5P)まで段階的に荷重を加え、鋼管に貼付した歪ゲージによって、その応力度分布を求めた。試験結果を図2、図3に示す。

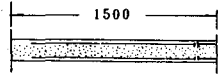
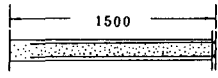
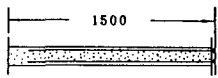
図2は、1.5P時に於ける各供試体の応力度分布を示したものである。いずれも、鋼管応力はモルタルを介して鉄筋へ十分伝達され、中央部では両者の歪がほぼ一致して平面保持が成立している。

また、図3は、供試体(5A)の荷重-歪線図で、歪の値は中央部3ヶ所の鋼管平均歪と鉄筋歪について示した。

表-5 付着試験結果

供試体	すべり始め荷重	定着長	定着強度	破断荷重	破断位置	備 考
8A	(t) 25.8	(cm) 20	(kg/cm ²) 25	(t) 42.6	鉄筋	
8AS	25.8	20	26	72.4	"	
8B	42.5	40	21	59.1	"	
8BN	<40> 40	40	20	59.5	"	静的引張によりスリップさせたのち繰返し載荷<>は静引張の値1Pは18.1t
8CN	<57> 57	60	19	66.6	"	

表-6 応力伝播試験供試体

供試体番号	本数	供試体概要	鉄筋本数
4	2		D10~10
5A	2		"
5B	2		D10~13

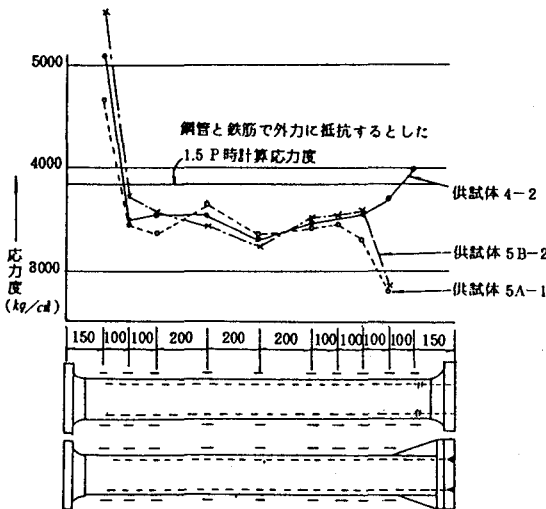


図-2 鋼管の応力度分布

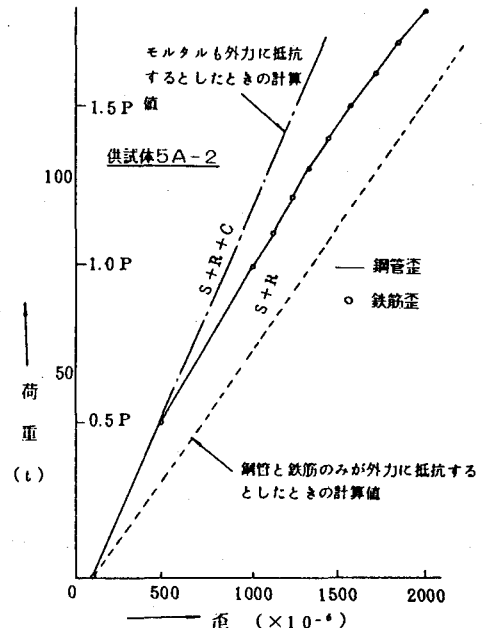


図-3 供試体中央部の歪値

これによると、比較的小さな荷重に対してはモルタルも外力に抵抗する性状を示し、荷重が大きくなるにつれて、鋼材のみで抵抗するとした計算値に近づいている。

なお、これらのモデルに於ては、応力伝播に必要な定着長さは200mm程度となっている。

3. 繰返し载荷の影響評価

RMC の繰返し载荷による影響評価を目的として、表7に示す供試体によって繰返し試験および引張試験を行った。

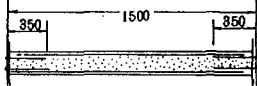
繰返し载荷試験では、荷重の大きさと繰返し数の設定が重要な要素となるが、送電鉄塔に於ては、一般に、風荷重の50年再限を想定して、 $0.5P \pm 0.25P \cdot 10^5$ 回（平常風対応）および $1.0P \pm 0.5P \cdot 3000$ 回（強風対応）の繰返し条件（ただし、 $1.0P$ は部材の許容強度または、それに対応する荷重）を用いることが多く、今回もこれに準じた。

供試体は、繰返し载荷なしのもの2体、繰返し载荷ありのもの3体とし、さらに、繰返し载荷ありについては、上記繰返し条件の片方（平常風対応のみ）の履歴を与えたもの1体と両方の履歴を与えたもの2体によって比較した。

試験結果を図4に示す。これは、図2の場合と同様に、 $1.5P$ 時に於ける各供試体の応力分布を示したものである。各供試体の鋼管応力度は、鋼管と鉄筋が応力を分担するとして求めた計算応力度によく合致している。

次に、先の試験結果と合せて各種構造材の破断耐力についてまとめたものを表8に示す。この表から明らかのように、少なくとも縮小モデルに於ては、RMC はMCと鉄筋の累加耐力を有し、繰返し载荷履歴を受けても性能低下のないことが確認できた。

表-7 繰返し性能試験供試体

供試体番号	本数	供試体概要	鉄筋本数	供試体の説明 繰返し载荷
5.1 5.2	2		D10~10	繰返し载荷なし
5N1	1		D10~10	繰返し载荷あり $0.5P \pm 0.25P \cdot 10^5$ 回
5N2 5N3	2		D10~10	繰返し载荷あり ($0.5P \pm 0.25P \cdot 10^5$ 回) + ($1.0P \pm 0.5P \cdot 3,000$ 回)

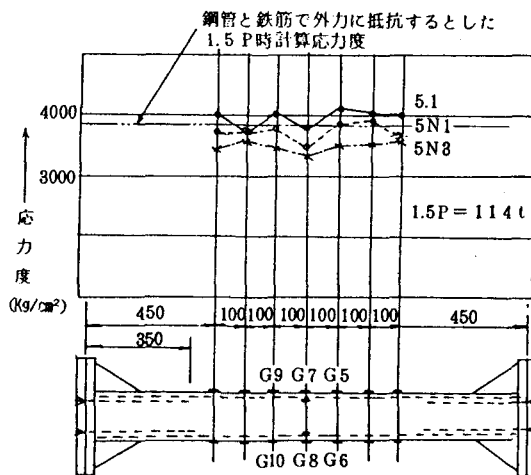


図-4 鋼管の応力度分布

表-8 各種構造材破断耐力比較表

	破断荷重		比 較		備 考
	計算値	試験結果	計算値	試験結果	
中空鋼管 (S55) 165.2φ×4.5	12496	※1 14227	1.00	1.00	※1 材料試験結果よりの計算値
鉄 筋 (SD40) D10~10	4066	※2 4260	0.33	0.30	※2 付着試験における3Aの鉄筋破断荷重
MC鋼管 (S55) 165.2φ×4.5	12496	※3 15000	1.00	1.05	※3 2A, 2Bの平均
RMC鋼管 165.2φ×4.5 繰返し載荷なし	16562	※4 18975	1.33	1.33	※4 5.1, 5.2の平均
RMC鋼管 165.2φ×4.5 繰返し載荷あり +D10~10	"	※5 19320	1.33	1.36	※5 5N1, 5N2, 5N3の平均

4. 継手部の特性に関する実験

鋼管材の継手としては、一般にフランジ方式が用いられることが多く、RMCの継手についてもフランジ継手を対象とした検討を行った。

フランジ継手は、フランジとフランジを接続する引張ボルトによって部材応力を伝達する構造となっているが、その部分はテコ作用によるフランジの物理的な変形（内円周の縁間が離間する）をともしうためRMCでは鋼管応力の不連続によって鉄筋への応力集中が懸念される。

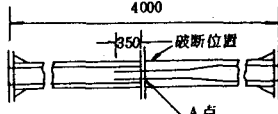
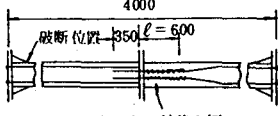
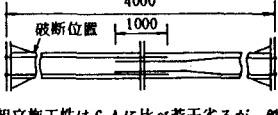
その対策として、鉄筋の重ね合せが合理的であると考え、表9に示す3種類のモデルによって引張力に対する挙動の確認を行った。

供試体(6A)は組立て施工性に重点を置いたもので、接続部は一重鉄筋となっている。

(6B)は(6A)と同じ構造であるが、応力集中を受ける側の鉄筋に対して、応力集中の緩和をはかるため、一部分テーピングを行いモルタルの付着を切っている。また、(6C)は強度に重点を置いたもので、継手部は二重鉄筋となっている。

荷重-歪線図を図5に、また、破断試験結果を表10に示す。図5に示すように、供試体(6A)では鉄筋に応力集中し、破断も中央フランジのハブ近傍で発生した。(6B)では、応力集中の緩和効果が見られるものの、荷重が大きくなるとやはり鋼管と鉄筋の歪に差が生じており、実用上問題がある。また、二重鉄筋とした(6C)は、許

表-9 継手部性能試験供試体

供試体番号	本数	供 試 体 概 要	鉄筋本数
6A	1	 組立施工の面からは最も好ましい鉄筋の接続位置である。 しかし、荷重時、フランジの変形により鉄筋のA点に応力集中が起る懸念がある。	D10~10
6B	1	 供試体6AにおけるA点の応力集中を長さℓの範囲に拡散させ応力集中の緩和を目的とした供試体である。	D10~10
6C	1	 組立施工性は6Aに比べ若干劣るが、鉄筋端部のフランジ面からの突出長さとしては実用上50mm程度は許容できるので、荷重時、フランジ変形による鉄筋の過負担分を、ラップ部の二重鉄筋に分担させることをねらった供試体である。	D10~10

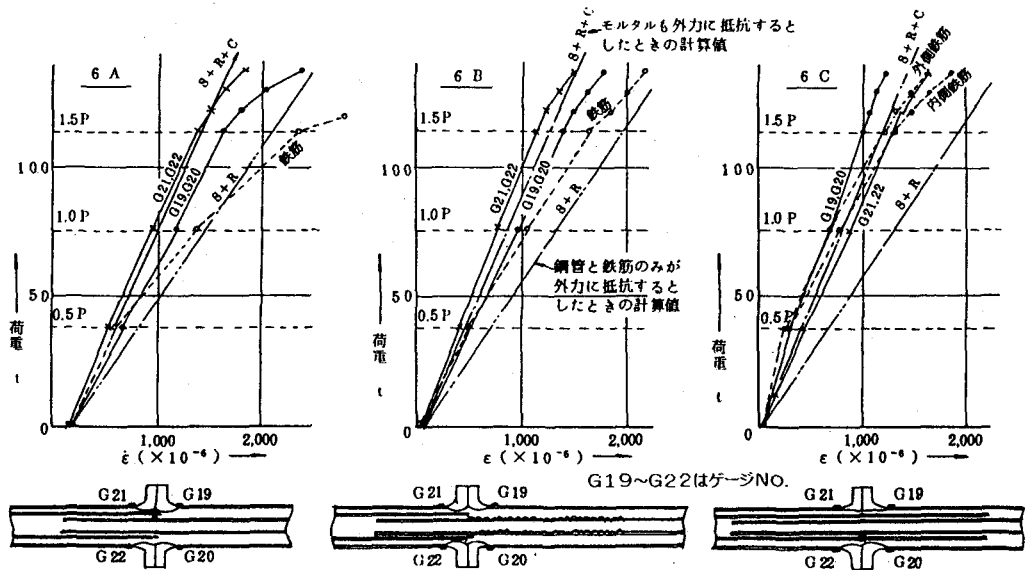


図-5 継手部性能試験結果（継手部の歪値）

容引張強度の1.5 倍の荷重(1.5P)に対しても鋼管と鉄筋の歪がほぼ等しく、しかも鋼管と鉄筋のみが力を分担するとした計算値を大きく下廻っていることから、構造としては3 種類の中で一番優れている。

最終破断耐力は、2.28P ～2.39P で各供試体ともほぼ同等であったが、これはフランジ継手そのものの耐力が大きいため、鉄筋の性能低下の影響が表面に表われなかったものと考ええる。

表-10 継手部性能試験結果

1P:76t

供試体	破断荷重	破断時の荷重増	伸び	伸び率	破断位置
6 A	178.0 t	2.28 P	78mm	2 %	中央フランジハブ近傍
6 B	179.5	2.36 P	242	6	加力側フランジリブ先端
6 C	182.0	2.39 P	308	8	〃

5. 実物大供試体の実験

縮小モデルによって得た研究成果の検証と実規模に於ける性能確認を目的として、実物大モデルによる引張試験を実施した。

5.1 供試体の諸元および試験方法

実物大モデルの鋼管サイズは、RMC の経済メリット範囲($\geq \phi 350$) から、その最小サイズである $\phi 355.6 \times 10.0$ (STK55) を選定し、これを基準部材とし、MCとの組合せによる4ブロックで供試体を構成した。供試体の構造を図6に、また、その諸元を表11に示す。

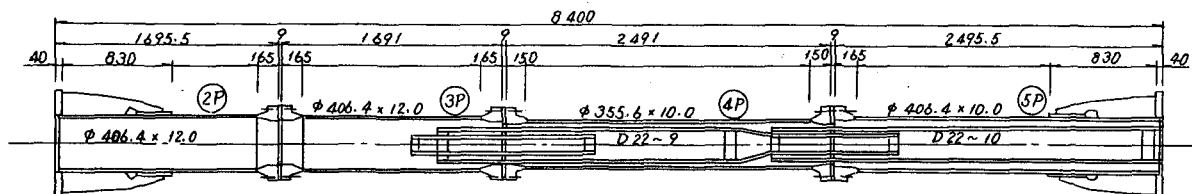


図-6 実物大供試体の構造

試験は、1000t の横型引張試験機によって静引張り→繰返し→破断の順に行った。

静引張り試験は、RMC（基準部材）の許容引張強度を1.0Pとし、0 から1.5Pまでの荷重を段階的に加え各部の応力を測定した。また、繰返し試験は、1.0P±0.5P・3000 回の片振り履歴を与え、異常のないことを確認した後破断試験を行った。

なお、充てんモルタルは、縮小モデルと同じものを採用した。

5.2 試験結果

静引張試験に於ける各点の応力分布を図7に、また、破断試験結果を表12に示す。応力分布図には、1.0Pに対する計算応力度を一点鎖線で示したが、測定値はほぼ計算値と合致しており、縮小モデルに於ける結果と同等の性状であることが確認できた。

また、破断試験に於いては、基準部材（φ355.6×10.0）のほぼ中央で破断し、破断荷重は、865t（2.36P）で、これも縮小モデルの2.28P～2.39Pと同等の性能を示しており、継手部の耐力も確保されていたことからRMCの期待耐力を十分満足するものであった。これによって実構造物に於いても、縮小モデルで確認した通りの性能が得られることが実証できた。

なお、表中に $P_2 \times 1.05$ の値が示してあるが、これは実部材強度（ P_2 ）に対してコンクリート充てん鋼管であるための強度上昇分を、鋼管についてのみ5%想定したもので破断荷重とよく合致している。

表-11 供 試 体 諸 元

		MC 406.4×12	RMC 355.6×10 D22~9	RMC 406.4×10 D22~10
断面積 (cm^2)	鋼管 A_s	148.7	108.6	124.5
	鉄筋 A_t		34.83	38.71
			143.43	163.21
許容応力度 (kg/cm^2)		2550	2550	2550
破断応力度 (kg/cm^2)		5500	5500	5500
許 容 強 度 (Ton)		379.18	(1P=) 365.74	416.18
破 断 荷 重 (Ton)		817.85	788.87	897.66
繰 返 し 荷 重		0.48 P~1.45 P	0.5 P~1.5 P	0.44 P~1.32 P
実破断予想荷重 (Ton)		837.92	849.10	956.41

繰返し荷重：182.9 Ton～548.6 Ton

実破断予想荷重＝実材料強度×公称断面積

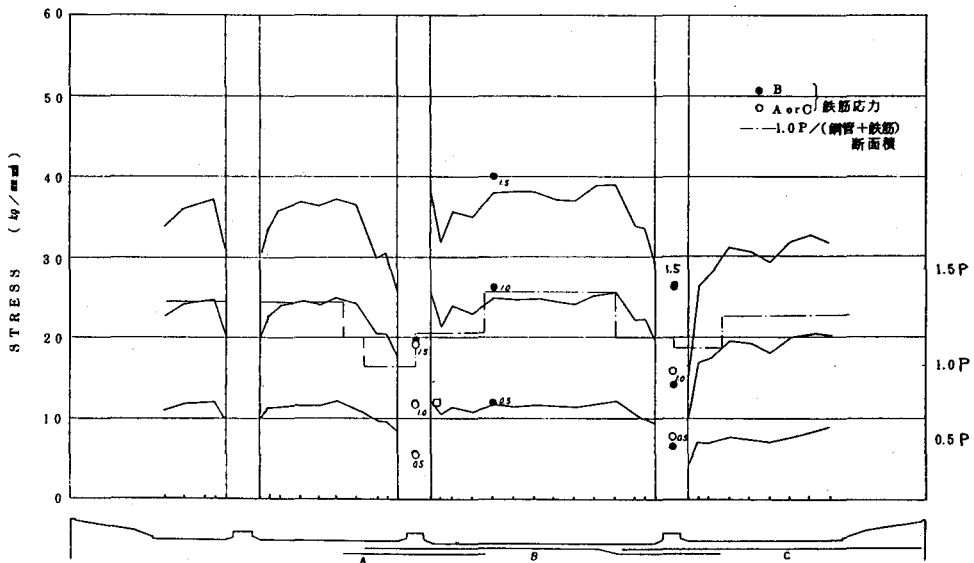
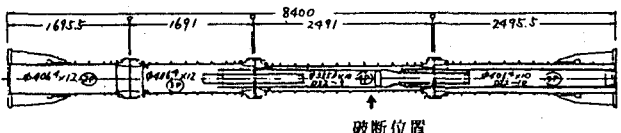


図-7 応 力 分 布 図

表-12 破断試験結果

破断位置				
残留伸び (%)	1.68	8.15	4.22	0.78
材実料強度	P ₁	837.92 ton	887.92 ton	849.10 ton
	P ₂	819.89	819.89	836.44
	P ₂ ×1.05	860.88	860.88	867.75
破断荷重			865.0 (236P)	

P₁ = 実材料強度×公称断面積

P₂ = " × (試験片の板厚を適用した断面積)

6. 経済比較

表13は、500kV送電鉄塔の下部4節の柱材のみを対象として、MC、中空鋼管、およびRMCの3種類の構造材を用いた場合の重量とコスト（資材費+工事費）を比較したものである。

コストについては、MCを1.000とした場合の比率で表示している。この

例では、RMCと他の構造材との差が約10%となっているが、少なくともRMCは経済的な構造材として期待できることを示しており、大型になるほど有利になるものと考える。

表-13 各種構造材の経済比較表

単位ton

構造材 項目		コンクリート充てん鋼管	中空鋼管(STK55)	鉄筋入り コンクリート充てん鋼管
鋼材重量	鋼管	27.82	34.63	19.54
	フランジ	14.40	14.40	12.48
	ボルト	1.44	1.64	1.03
	鉄筋	-	-	8.94
コンクリート重量		75.33	-	50.17
柱材寸法		φ558.8 × 14.0	φ609.6 × 16.0	φ457.2 × 12.0
コスト比		1.000	0.955	0.873

7. あとがき

コンクリート充てん鋼管柱材(MC)の性能向上を目的としたRMCの基礎的研究から、RMCは、その引張性能に於て十分期待に答えられるものと思われる。また、圧縮強度とのバランス改善によって、経済性の向上もはかられる見通しも得た。今後、この成果を踏まえて、さらに実用的な研究が進められ、RMCが種々の柱材として活用されることを期待する。

最後に、この研究当初から種々御指導いただいた京都大学防災研究所・若林教授、大阪工大・南助教教授および御協力いただいた日本橋梁株式会社の方々に、紙面を借りて深甚の謝意を表すものである。

※1)参考文献

1. 日本建築学会編：鋼管コンクリート構造計算基準・同解説(1980年)
2. 橋梁と基礎(83-2)：合成柱(充てんコンクリート方式)を有する鋼製橋脚の諸問題(上、下)