

論文

[2140] プレストレスによるボックスラーメンの補強技術に関する基礎研究

円谷喜只*1・伊藤利昭*2・本田 勉*3・熊坂徹也*4

1. まえがき

地中のボックスラーメンを補強する場合、ボックス内面に鉄筋コンクリートを打増す方法が考えられるが、この方法はボックス内部空間の減少が可能な時にのみ適用できる。内部空間の減少を最小限に抑えるには、鉄板やFRP板の貼付補強が考えられるが、一般に地中のボックスラーメンは湿潤状態にあると想定されるから、これらの方法では耐久性や確実性に課題が残る。

また、ボックス内側の鉄筋の補強に対しては、既存の断面からこれをはつり出し、新たに鉄筋を添接する方法が考えられるが、この方法ではボックス外側の鉄筋補強は困難であり、したがってボックスコーナー部の補強ができない。

さらに、いずれの方法にも共通して、過大な応力度が生じていると想定される既存の鉄筋応力度を緩和・改善することはできないという問題点が残される。

これに対して、プレストレスによる補強が可能であれば、ボックス内空間を確保できるばかりでなく、断面に導入される軸力により既存の鉄筋応力度を緩和することが可能となる。さらに、ひびわれ幅を縮小させ得るので、鉄筋の劣化速度を低下させる効果も期待できる可能性がある。

そこで、本研究ではプレストレスによる補強技術の可能性を検討することを目的として、モデル解析によりプレストレスの効果を把握するとともに、基礎的な実験を行ってプレストレス導入方法とその効果を検証することとしたものである。

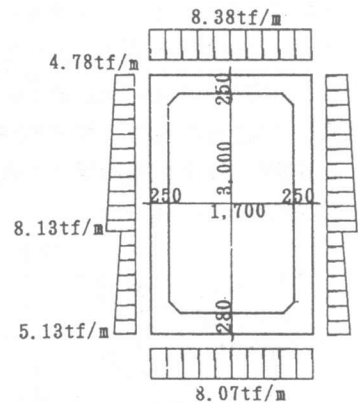


図1 検討対象モデル

2. プレストレスによる補強方法

2. 1. 検討対象モデル

検討対象として外荷重が図1で与えられる地中ボックスラーメンを設定し、断面力を図2のように得た。さらに断面算定を行って決定した鉄筋配置は図3のとおりである。

いま、このモデルにおいて、鉄筋の腐食が進行し、ボックス内側の鉄筋で1.0mm、外側鉄筋で1.8mmの腐食減量が生じている状態を検討対象とした。

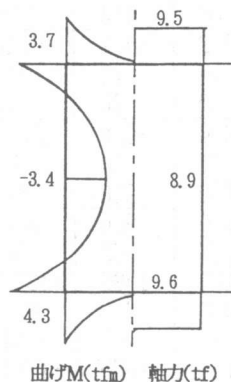


図2 断面力の計算結果

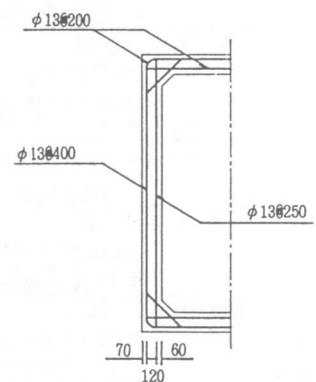


図3 検討対象モデルの配筋

*1 東電設計(株)第二土木本部地中線土木部次長、工修 (正会員)
 *2 東電設計(株)第二土木本部地中線土木部長、工修
 *3 (株)熊谷組技術開発本部PC技術部副長、工修 (正会員)
 *4 (株)熊谷組技術開発本部PC技術部

2. 2. プレストレスの導入方法

プレストレスの導入は、ウォータージェットを用いて溝を切削し、PC鋼材を挿入して、モルタルを充填した後、緊張することにより行う。ウォータージェットは既存の鉄筋を損傷させることなく、コンクリートのみを切削できる利点がある。また、断面に切削した溝内でPC鋼材の緊張・定着を可能とする方法として、図4に示すコネクタタイプの定着具の利用が考えられるが、基本的には定着具の種類は問わない。

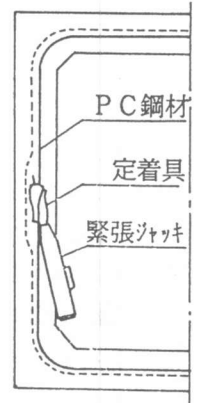


図4 緊張定着方法

2. 3. プレストレスの導入レベル

プレストレスの導入レベルとして次の5レベルが考えられる。

レベル I : コンクリートに引張応力度が発生しない限界状態

レベル II : コンクリート応力度が設計引張強度の60%を越えない限界状態

レベル III : コンクリートのひびわれ幅が許容値を越えない限界状態

レベル IV : 鉄筋の応力度が許容値を越えない限界状態

レベル V : プレストレスを導入しない現状の状態

ボックス各部の断面力に対して、各レベルの限界状態を得るのに必要な緊張力は、応力度照査の結果、表1のように与えられる。なおコンクリートの設計強度 $f'_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ 、鉄筋の許容引張応力度 $\sigma_{sta}=1400\text{kgf/cm}^2$ 、コンクリートの許容ひびわれ幅を満足する鉄筋応力度の制限値として $\sigma_{spa}=1000\text{kgf/cm}^2$ を計算条件として用いた。

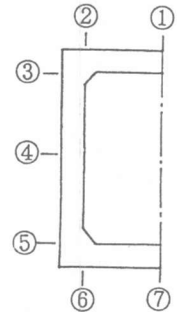


表1 各断面における必要緊張力

断面 応力度照査		頂版		側壁			底版	
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
断面力	M (tfm)	0.9	3.7	3.5	3.4	4.2	4.3	0.6
	N (tf)	9.5	9.5	7.9	8.9	9.8	9.6	9.6
レベル I	P (tf)	11.9	66.3	64.1	71.6	75.2	71.0	0.0
	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	16	49	46	60	53	48	4
	$\sigma_s(\text{kgf/cm}^2)$	65	164	143	256	177	147	28
レベル II	P (tf)	2.2	44.2	42.3	51.9	51.9	47.1	0.0
	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	15	43	40	54	47	42	4
	$\sigma_s(\text{kgf/cm}^2)$	-50	26	5	120	38	8	28
レベル III	P (tf)	0.0	13.8	13.1	20.4	17.5	15.3	0.0
	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	17	54	51	69	58	52	4
	$\sigma_s(\text{kgf/cm}^2)$	-160	-996	-994	-992	-995	-995	28
レベル IV	P (tf)	0.0	9.0	8.0	16.7	12.2	10.2	0.0
	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	17	58	54	74	62	56	4
	$\sigma_s(\text{kgf/cm}^2)$	-160	-1395	-1397	-1392	-1397	-1393	28
レベル V	P (tf)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	17	59	54	87	65	57	4
	$\sigma_s(\text{kgf/cm}^2)$	-160	-1836	-1713	-3026	-2031	-1889	28

プレストレスを与えない現状では、鉄筋の腐食により、許容応力度を上回る引張応力度が発生しており、これに対して緊張力を導入すれば、鉄筋の応力度が緩和されることが確認できる。

一方プレストレス導入の施工性を考えると、溝内に配置できるPC鋼材は、15.2mm程度のシングルストランドが限度と考えられる。摩擦損失等を考慮した15.2mmストランドの有効緊張力は、10tf程度となるから、1m当たり2本を配置することにより、表1からプレストレスレベルIII程度が導入可能と考えられる。

3. PC鋼材配置の検討

3. 1. 曲げ半径の検討

ボックスコーナー部のPC鋼材は、通常の鋼材配置より小さな曲げ半径で配置されるので、大きな求心力が生じ、コンクリートには局部的に過大な応力度が発生することになる。一方、求心力を減ずるためにPC鋼材の配置半径を大きくとると、PC鋼材は偏心配置となるのでコーナー部外側にプレストレス導入量が小さい領域が生じると予想される。そこで、有効なPC鋼材配置を求めるため、有

限要素法による解析的検討を行った。

曲げ半径は図5に示す3水準とし、導入緊張力は単位荷重の100tfとした。解析モデルは断面形状が対称なので1/4モデルを用いた。PC鋼材

の配置は、コーナー部での求心力による抜け出しの防止、溝切削の施工性および防食の観点から、かぶりを100mm以上確保す

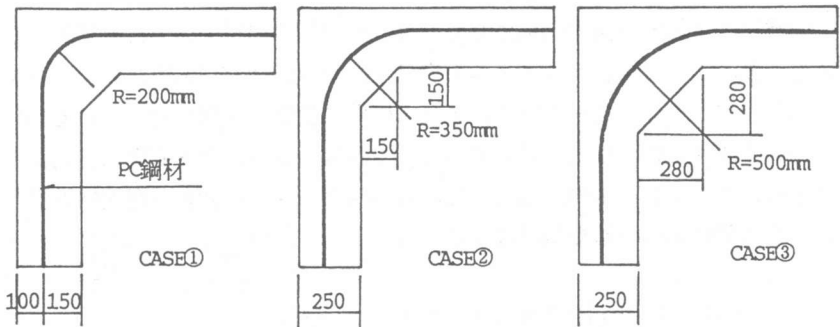


図5 曲げ半径の検討ケース

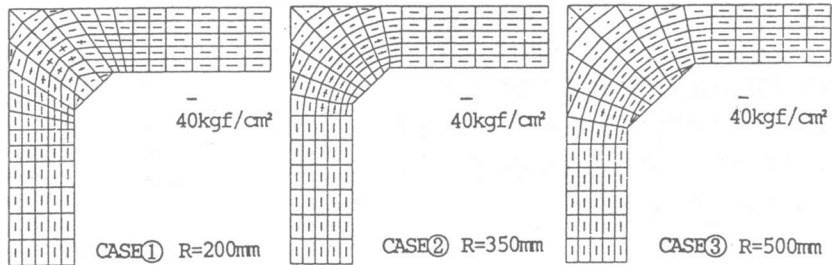


図6 主応力の解析結果

ることとした。このため曲げ半径500mのCASE③ではハンチの打増しを行っている。

主応力の計算結果を図6に示す。

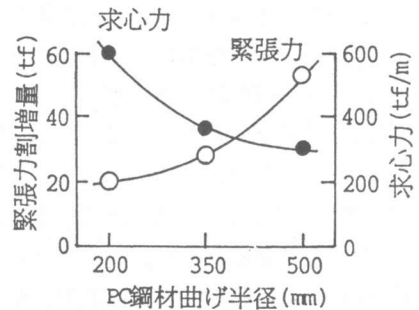
直線部ではいずれも様なプレストレスが導入されていることが確認できるが、コーナー部では、曲げ半径が大きくなるほどコーナー外側のプレストレスが導入されない領域が広くなり、また内側に導入されるプレストレスの値も小さくなっていることがわかる。したがって、曲げ半径の大きい場合には緊張力の割増が必要となる。

一方、曲げ半径が小さいと求心力が大きくなるため、コンクリートの局部応力に対する補強筋量が増加する。

図7は曲げ半径と緊張力の割増量および求心力との関係を求めた結果である。曲げ半径500mmではハンチ部にコンクリートの打増しが必要なことを考慮すると、緊張力の割増量・求心力ともに比較的小さい曲げ半径350mmの配置がもっとも有利と考えられる。

3. 2. 直線配置と偏心配置の比較

外荷重による曲げ応力をキャンセルするには、図8のようにPC鋼材を偏心配置するのが有利と考えられる。しかし地中のボックスラーメンの曲げ変形は、周辺地盤によって拘束されるので、



偏心配置の場合には期待どおりのプレストレスが導入できない恐れがある。そこで周辺地盤の拘束効果をバネにより評価し、その影響の解析を試みた。

バネの値は道路橋示方書IV下部構造編の地盤反力係数推定式より求めた。ただし圧縮には抵抗し、引張には抵抗しないものとしている。また解析には1/2モデルを用いた。なお、導入緊張力は奥行き1m当たり20tfとした。

プレストレス載荷時の変形の計算結果を、バネを考慮する場合と無視した場合とを比較して図9に示す。

地盤反力は側壁の横方向に生じており、その値は奥行き1m当たりで約1tfであった。この結果、ボックスの変形はやはり周辺地盤に拘束され、バネを考慮した方が小さくなっている。またこの時、側壁中央部に導入される曲げ応力の大きさは約70%に低減していた。プレストレスによる変形は0.1mmと微小なので、反力バネの値はここでの計算値よりさらに大きい可能性もあり、この場合PC鋼材の偏心効果はさらに低下することになる。

これに対して直線配置では一様な軸力が導入されるので、このような周辺地盤の拘束を受けることはない。

さらに、ボックス内に切削した溝内にPC鋼材を配置する作業性を考えると、偏心位置に精度よく配置することは極めて困難であり、直線配置の方が現実的な配置と考えられる。

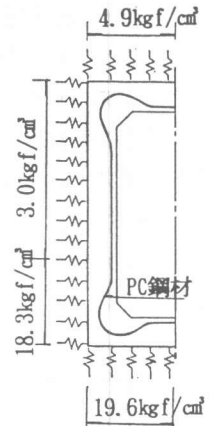


図8 偏心配置

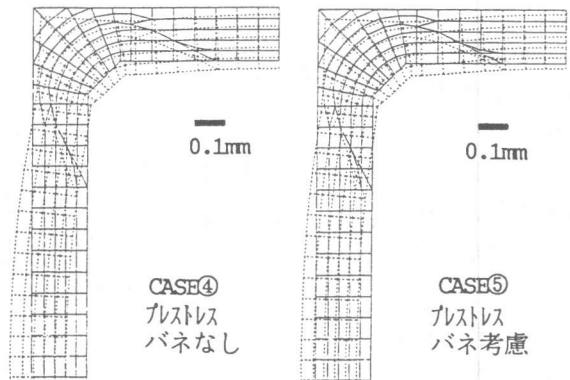


図9 変形の解析結果

4. プレストレス導入試験

4. 1. 試験の目的

- 1) プレストレス導入のための施工性確認
- 2) コーナー部補強の設計方法の照査
- 3) FEM解析結果の照査

を目的としてプレストレス導入試験を実施した。

4. 2. 試験供試体

供試体は実物大で、図10に示すようにボックスの1/4モデルとした。コンクリート強度は $f'_{ck}=250\text{kgf/cm}^2$ 、鉄筋は主筋、配力筋ともにD13ctc250mmである。

PC鋼材配置のための溝寸法は幅125mm、奥行き200mmとし、ウォータージェットにより切削した。ウォータージェットは、吐出圧力 2000kgf/cm^2 、吐出流量 25 l/min 、噴射幅45mmであり、1m当たりの切削時間は120分を要した。切削状況を写真1に示す。

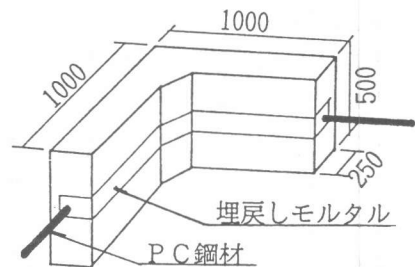


図10 試験供試体

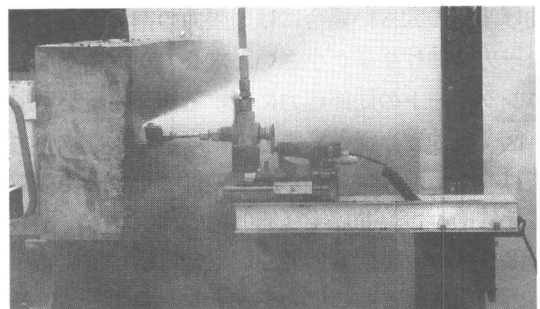


写真1 ウォータージェットの切削状況

PC鋼材は解析検討結果より、曲げ半径350mmの直線配置である。また摩擦損失低減のため、アンボンド鋼材を用いた。ポリエチレンのアンボンド被覆は緊張時の求心力により破損する恐れがあるので、エポキシコート鋼材、またはステンレスシースを使用した。

- コーナー部コンクリートの補強には、図11のように
- 1) 位置決めを兼用した支圧板
 - 2) 埋戻しモルタルのせん断補強筋
 - 3) 埋戻しモルタル全体の抜出し防止筋（ラーメンの配力筋にアンカー筋を追加）

を配置した。写真2に溝内の配置状況を示す。

埋戻しモルタルは $f'_{ck}=550\text{kgf/cm}^2$ のプレミックス品を用いた。

4. 3. 試験方法

試験のパラメーターとして、

- 1) 導入する緊張力：20, 45tfの2水準
- 2) コーナー部補強の有無
- 3) シース破損対策の種類：エポキシコート鋼材、ステンレスシースの2水準

を考慮し、表2に示す3ケースを計画した。

試験はPC鋼材に所定の緊張力を与え、

- 1) アンボンド鋼材の摩擦係数
- 2) コンクリート、補強筋のひずみ分布
- 3) ひびわれ発生荷重
- 4) シース破損対策の有効性確認

を計測するものである。試験方法を図12に示す。緊張載荷は単調増加とし、最大緊張力に到達後単調除荷とした。

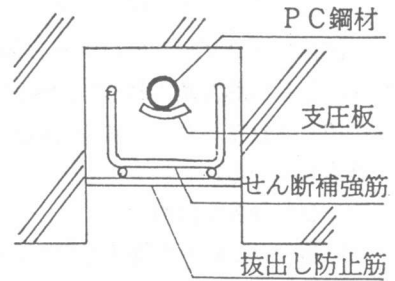


図11 コーナー部補強筋

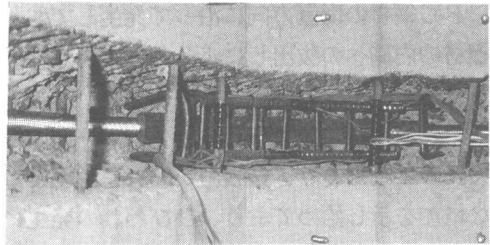


写真2 コーナー部の配筋状況

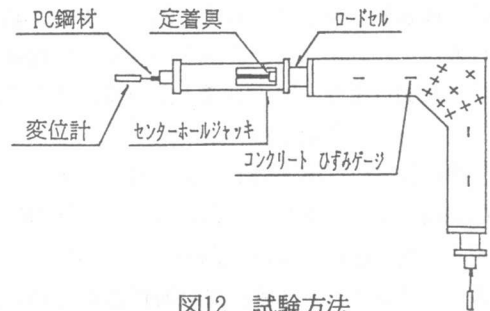


図12 試験方法

表2 試験ケース

No.	PC鋼材	緊張力	支圧板	せん断補強筋	抜出し防止筋	シース破損対策
①	T15.2mm	20tf	○	—	—	エポキシコート鋼材
②	T15.2mm	20tf	○	○	○	ステンレスシース
③	T21.8mm	45tf	○	○	○	ステンレスシース

4. 4. 試験結果

(1) 摩擦係数の測定結果

摩擦係数の変化は図13のようである。アンボンドT15.2mmは平均して $\mu=0.04$ と小さく有利である。アンボンドT21.8mmはコーナー部での変形抵抗が大きいため $\mu=0.11$ 、またエポキシコートT15.2mmは表面に砂粒が付着しているためアンボンド加工しても $\mu=0.15$ とやや大きい値となったものと考えられる。

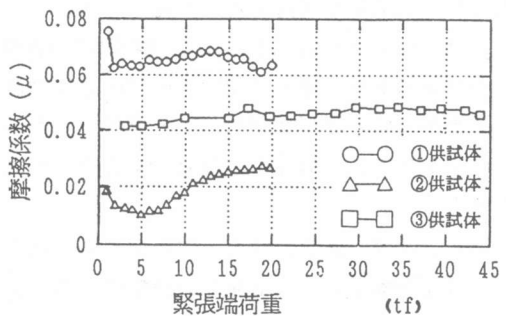


図13 摩擦係数の変化

(2)コンクリートのひずみ分布

供試体コンクリートのひずみ分布の一例を図14に示す。FEM解析値に対して80~90%のプレストレスが導入されており、ひずみ分布形状も解析値とよく近似している。

(3)ひびわれ発生荷重

供試体にひびわれが発生したのは、緊張力を45tfまで載荷した供試体③のみであった。このひびわれは、緊張力が40tfに達した段階で、コーナー部内面にPC鋼材の配置方向に沿って発生しており、PC鋼材の内側への抜出しによる曲げ応力が原因と考えられる。

また、この時の抜出し防止アンカー筋のひずみは図15のようであり、緊張力が30tfを越えてから顕著な増加を示し始めており、ひびわれの発生に対応しているものと考えられる。

以上のことから、緊張力30tf程度まではコーナー部の補強鉄筋は不要と考えられる。また、45tf載荷時のひびわれ幅は約0.05mmと小さく、補強筋を配置すれば50tf程度の緊張力導入が可能と考えられる。

(4)シースの破損状況

除荷後、供試体よりシースをはつり出して観察した結果、ポリエチレン被覆はコーナー部内側にPC鋼材の食い込みによる亀裂が生じていた。ただしエポキシ塗装により防錆効果は確保されている。またステンレスシースは写真3のようにPC鋼材の痕跡は残るが45tf載荷でも破損は見られなかった。

5. まとめ

プレストレスによる信頼性の高いボックスラーメン補強技術の基礎的検討を行ない、比較的容易な方法で補強が可能であることが確認できた。今後さらに次のような課題が残されていると考えられ、順次取り組んで行く予定である。

- 1)ウォータージェットによる切削効率の改善
- 2)プレストレス導入作業の溝内での施工性確認
- 3)土水圧等の載荷状態において溝切削した場合のボックスラーメンの耐荷力の検討
- 4)プレストレス補強をひびわれを許容した限界状態レベルとした場合の耐久性の確認

参考文献

- 1) 円谷、伊藤、本田、熊坂：プレストレスによるボックスラーメンの補強技術に関する基礎研究 第47回土木学会年次講演会概要集第5部、pp.176-179、1992.9

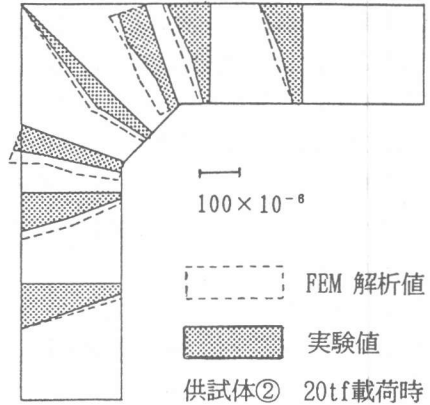


図14 コンクリートのひずみ分布

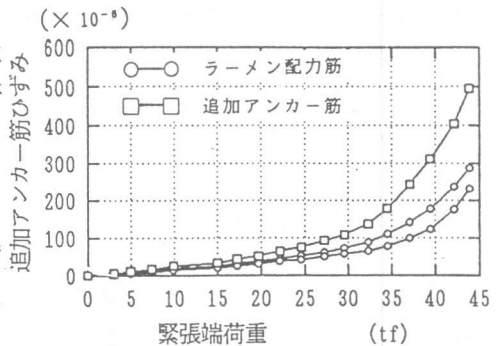


図15 補強鉄筋のひずみ変化 (供試体③)

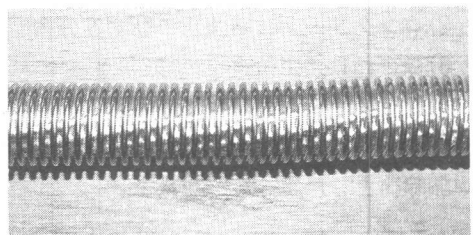


写真3 ステンレスシースの痕跡