

(18) プレキャストセグメントの接合方法に関する研究

日本鋼弦コンクリート(株) 正会員 ○東山 博明
 同 上 正会員 中條 友義
 同 上 正会員 宮本 基行
 同 上 田中浩一郎

1. はじめに

近年PCセグメント工法による構造物が急速に普及し、土木建築をとわず施工例が急増している。高架橋等の橋桁においても、スパンが長いもので百数十メートルにもおよぶに至った。PCセグメント工法による構造物の急激な伸びは、施工性、耐久性、品質管理等に要因がある。しかしながら、RC構造物より経済性に乏しいため、その中間に位置するPRC構造物に要点をおく傾向にある。

過去PCセグメント工法の弱点とされたセグメントの継ぎ目においても、接合方法の研究がすすみ、今日では施工性優位の観点から尊重視さえされ、近未来の展望も明るくなってきた。

現段階でのPCプレキャストセグメント工法の考え方は以下にある。

- ①接合部において鉄筋が連続していないため、破壊時に近い状態では接合部のない部分よりも連続性が弱いといえる。このためプレキャストセグメント工法による構造体系の安全性は、セグメント継ぎ目の耐荷性能に大きく影響され、プレキャストセグメントの継ぎ目は鉄筋が連続していないため、継ぎ目が構造物の力学的挙動に関してひびわれが発生した場合構造上の弱点となりうる。
- ②設計においては、プレキャストセグメントの継ぎ目を照査断面に含めて継ぎ目のない通常の部材としての設計を行うとともに、継ぎ目のセグメントとしての曲げ応力度、並びにせん断応力度などについて安全性を照査しなければならない。プレキャストセグメントの継ぎ目には、軸方向の鉄筋が連続して配置されていないので設計荷重作用時には、部材に引張応力が生じないように設計しなければいけない。プレストレス直後に置いても、継ぎ目では接着剤が完全硬化していないことから、引張応力が生じないように設計する。更に、設計荷重を越える大きな活荷重が作用した場合でも継ぎ目に有害なひびわれが発生しないよう継ぎ目に生じるコンクリートの引張応力度を制限している。
- ③プレキャストセグメント相互の連続性をもつようにエポキシ樹脂系の接着剤を使用し、コンクリートあるいは鋼製の接合キーを配置する。

こういう見方を今後更に改善するために、新たにプレキャストセグメントの接合方法を研究した。

2. プレキャストセグメントの接合方法

プレキャストセグメント工法での着目点は軸方向の鉄筋の不連続性である。今回の接合方法は、軸方向鉄筋に重ね継ぎ手を要し、連続させる方法とした。(図-1、2)

プレキャストセグメントの接合面に対向させて、小穴を形成するとともに、その中に継ぎ手鉄筋を配して、グラウトすることにより一体化する。あらかじめプレキャストセグメント内に配置された鉄筋と小穴の中に配置された鉄筋が、十分な重ね継ぎ手長を有するように、接合鉄筋をプレキャストセグメントの接合部に埋設することにより、軸方向鉄筋が連続である桁と同等の効果を発揮し得るプレキャストセグメントの接合方法を提供することにある。

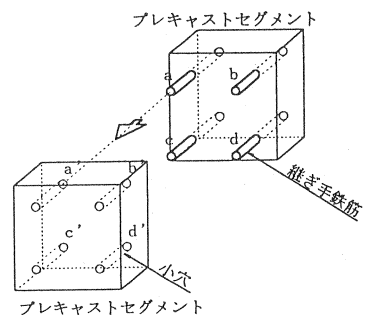


図-1 接合法概念図

接合鉄筋を、相対する接合面の埋設鉄筋に応力を伝え得る位置に設ける。応力を充分伝達し得る様に、その断面を決定するとともに、鉄筋の付着長も確保する。プレキャストセグメント間と接合鉄筋に付着力のない状態でPC鋼材に引張力を導入するとプレキャストセグメントの接合面には圧縮応力度 σ_c が生ずる。その状態においてプレキャストセグメントと接合鉄筋に付着力を発生させプレキャストセグメントの長手方向に外力を作用させると、プレキャストセグメントと接合鉄筋間に引張応力度 σ_t が発生する。プレキャストセグメントの断面積を A_c 、接合鉄筋の断面積を A_s 、プレキャストセグメントと接合鉄筋のヤング係数比を n とすれば σ_c 、 σ_t の関係は以下の式で表される。

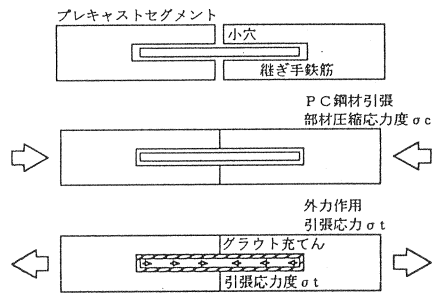


図-2 接合法概念図

プレキャストセグメントと接合鉄筋間に引張応力度 σ_t が発生する。プレキャストセグメントの断面積を A_c 、接合鉄筋の断面積を A_s 、プレキャストセグメントと接合鉄筋のヤング係数比を n とすれば σ_c 、 σ_t の関係は以下の式で表される。

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \quad \sigma_t = \frac{P}{A_c + nA_s}$$

$$\sigma_c - \sigma_t = \frac{P}{A_c} - \frac{P}{A_c + nA_s} = \frac{P(A_c + nA_s - A_c)}{A_c(A_c + nA_s)} = \frac{PnA_s}{A_c(A_c + nA_s)} > 0$$

$\sigma_c > \sigma_t$ となる。

すなわち、この接合法によればプレキャストセグメント間に、あらかじめ作用させた圧縮力 P に等しい引張力 P を外力として作用させても、プレキャストセグメント接合面には $\sigma_c - \sigma_t$ の圧縮応力が余力として存在する。

プレキャストセグメント相互を応力・変形の両面で連続性をもつように接合することができ接合部の強度を高めることができる。

3. 接合鉄筋の付着長および重ね継手長

軸方向鉄筋の重ね継手長を「コンクリート標準示方書(土木学会)'¹」より算出する。同示方書によると鉄筋の重ね継手は、配置する鉄筋量が計算上必要な鉄筋量の2倍以上、かつ同一断面での継ぎ手の割合が1/2以下の場合には重ね継手の重ね合わせ長さは、基本定着長 l_d 以上としなければならない。ただし上記条件のうち一方が満たされない場合には、重ね継手の重ね合わせ長さは、基本定着長 l_d の1.3倍とし、継手部を横方向鉄筋等で補強しなければならない。今回の実験に当てはめると重ね合わせ長さは、セグメントの鉄筋挿入長さになり次式により算出した。

$$l_d = \alpha \frac{f_{yd}}{4 f_{b0d}} \cdot \phi = 0.6 \times \frac{345}{4 \times 1.94} \times 1.59 = 422 \text{mm}$$

$$l = 1.3 \cdot l_d = 1.3 \times 422 = 549 \text{mm} = 54.9 \text{cm}$$

軸方向鉄筋 D16 とすることにより $\therefore l \geq 35D$ となる。

ただし、式中の各値は以下による。

算出上の使用鉄筋：軸方向鉄筋 D16 (公称径 15.9mm、断面積 199mm²)

横方向鉄筋 D13 (公称径 12.7mm、断面積 127mm²)

f_{yd} : 鉄筋の設計引張幸福強度 SD345 しようにより 345N/mm^2

f_{bod} : コンクリートの設計付着強度

$$f_{bod} = \gamma_c \cdot f_{bok} = 1.3 \times 1.49 = 1.94\text{N/mm}^2 (\leq 3.2\text{N/mm}^2)$$

$$\gamma_c \text{ は } 1.3 \text{ として、} f_{bok} = 0.28 \cdot f_{tk}^{2/3} = 0.28 \times 400^{2/3}$$

$$= 1.49\text{N/mm}^2 (\leq 4.2\text{N/mm}^2)$$

ここに、

$$k_c = \frac{C}{\phi} + \frac{15 A_t}{s \phi} = \frac{30}{15.9} + \frac{15 \times 254}{3.5 \times 15.9} = 7.25$$

$$k_c > 2.5 \text{ より } \alpha = 0.6$$

C: 主鉄筋の下側のかぶりの値と定着する鉄筋のあきの半分の値のうち小さい方 30mm とする。

A_t: 仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

D13-2 本 254mm^2 とする。

s: 横方向鉄筋の中心間隔 35mm とする

また、鉄筋の付着強度は、「コンクリート工学年次論文報告集^{*)}」によれば、鉄筋とシースの間が狭いときには鉄筋の付着強度は低い値を示し、ある程度大きくなると一定値になると考えられるとある。このことより、鉄筋の重ね継手長を、計算値と確認をする意味で鉄筋の引き抜き試験を行った。

実験におけるパラメーター、および引き抜き試験結果を表-1に、試験図を図-3に示す。

表-1 接合鉄筋の重ね継手長(付着長)実験諸元

| 鉄筋 | 孔径 | 重ね継ぎ (付着) 長さ | 引き抜き試験結果 | | |
|-----|-----|--------------------|----------|-------|------|
| | | | 最大荷重 | 破壊形態 | |
| D13 | なし | 35 φ | 49.5N | 鉄筋破断 | |
| | | 2 φ | 35 φ | 47.7N | 鉄筋破断 |
| | | | 40 φ | 48.9N | 鉄筋破断 |
| | 3 φ | 45 φ | 46.0N | 鉄筋破断 | |
| | | 35 φ | 51.0N | 鉄筋破断 | |
| | | 40 φ | 46.9N | 鉄筋破断 | |
| | | 45 φ | 51.8N | 鉄筋破断 | |

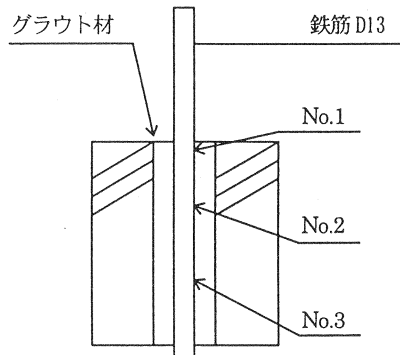


図-3 接合鉄筋の重ね継手長(付着長)実験

引張荷重グラフ

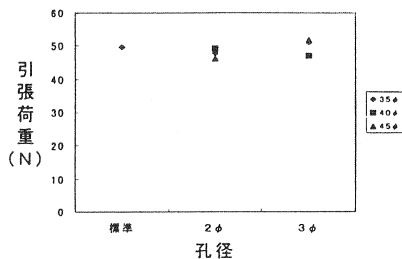


図-4 孔径、継手長さ-荷重曲線

引張荷重-ひずみ曲線

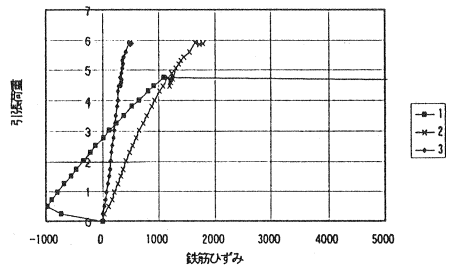


図-5 孔径2φ-継手長さ35φの荷重ひずみ曲線

3. 結合部における鉄筋重ね継手法

接合部における鉄筋の重ね継ぎ方法は

1) 1方向のプレキャストセグメント内で重ね合わせる方法

2) 双方のプレキャストセグメント内でそれぞれ重ね合わせる方法

3) 接合鉄筋を設け双方ともプレキャストセグメント内でそれぞれ重ね合わせる方法が考えられた。

(図-6)

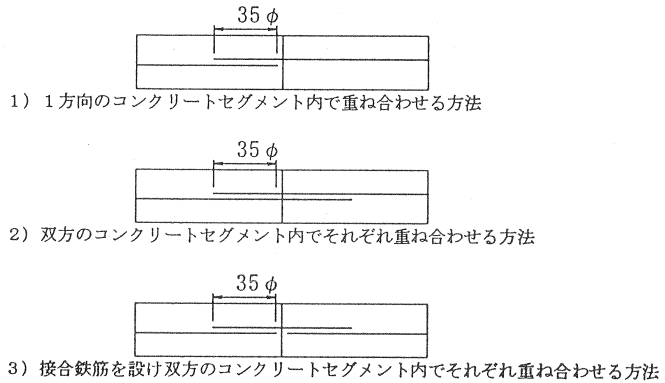


図-6 プレキャストセグメント接合部の鉄筋の重ね継ぎ方法

4. 試験体の製作

試験体の製作はそれぞれ小穴径2φ、継ぎ手鉄筋長さを35φとし、試験体としては、1体型PC梁1体、従来PCセグメント梁1体、片鉄筋付着型PCセグメント梁3体、両鉄筋付着型PCセグメント梁3体、接合鉄筋使用型PCセグメント梁3体の計11体製作した。

各種別断面図および接合部側面図をそれぞれ図-7に示した。

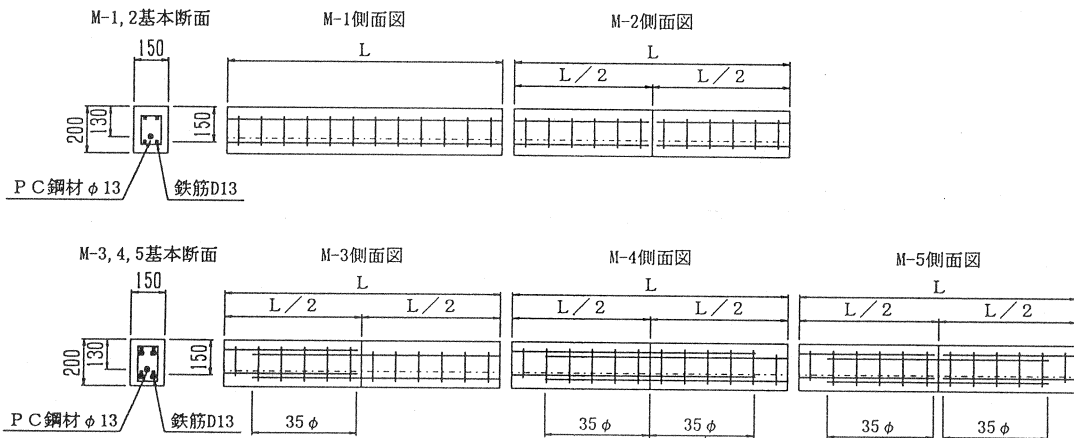


図-7 試験体構造図

5. 荷重実験

今回は接合部での挙動を静的曲げ荷重実験で追跡した。実験方法は、梁中央にセグメント接合面を配し 荷重スパン600mm、支間2000mmとして行った。(図-8)

測定項目は、接合鉄筋のひずみ、PC鋼材のひずみ、梁のたわみ、ひびわれ状況およびひびわれ幅の観測とした。荷重方法は、荷重スパン内のひびわれ発生およびセグメント接合部の離れの一方を確認するまで0.1tf・mピッチ、確認後は設計破壊荷重まで0.5tf・mピッチ、その後は1.0tf・mとした。

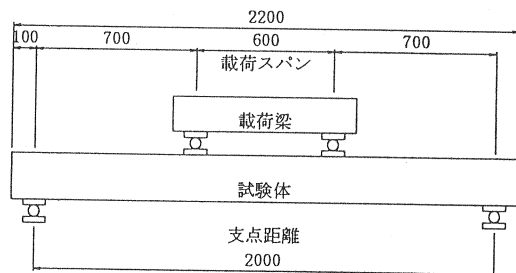


図-8 荷重試験方法

6. 実験結果と考察

6. 1. たわみ

試験桁のたわみは、M-1とそれぞれを比較すると、M-2は中央接合部において縁切れが発生し急激に増加した。一方、M-3, 4, 5はモーメント最大区間においてひびわれが発生し、ついで中央接合部において縁切れが発生した。しかし接合部の縁切れ幅は、M-2のように大きく発展せず、他のひびわれとほぼ同様に進んだ。たわみはM-1と同様に緩やかであった。(図-9)

6. 2. 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみにおいても、たわみ同様にM-1とそれぞれを比較する。

中央断面を横断する引張鉄筋ひずみは一様に大きい。

今回注目するセグメントと付着長のみの鉄筋においては、M-1とM-3, 4, 5を比較すると同様に中央断面部、載荷位置部の順にほぼ同様のチャートを示した。(図-10)

6. 3. PC鋼材ひずみ

PC鋼材ひずみを観ると、M-2を除く試験体はほぼ同一線上にあり、鉄筋ひずみ同様PC鋼材の負担する応力は一様と考える。このことは桁内部に配置された接合鉄筋の付着切れを起こしていないことを示している。(図-11)

6. 4. ひびわれ状況

ひびわれ状況を図-12~16に示す。

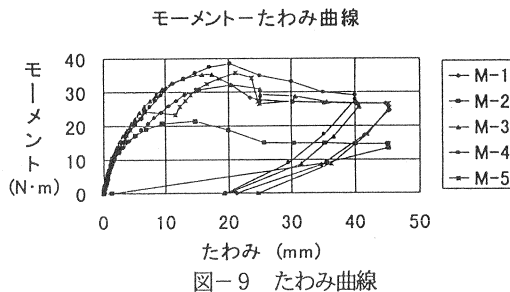


図-9 たわみ曲線

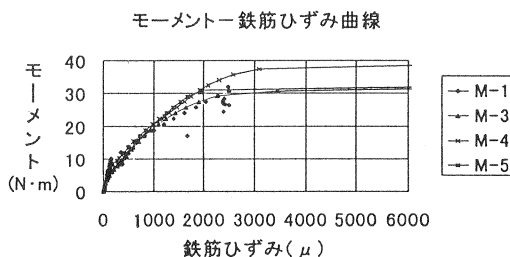


図-10 鉄筋ひずみ曲線

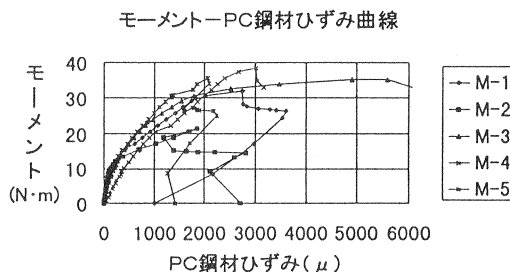


図-11 PC鋼材ひずみ曲線



図-12 M-1 ひび割れ状況図



図-13 M-2 ひび割れ状況図



図-14 M-3 ひび割れ状況図

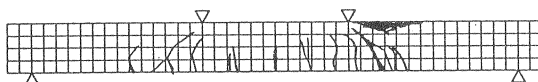


図-15 M-4 ひび割れ状況図



図-16 M-5 ひび割れ状況図

6. 5. 結果一覧表

静的曲げ載荷実験結果を表-4に示す。

表-4 載荷試験結果

| 試験体番号 | 種別 | ひびわれ発生モーメント(N・m) | 破壊モーメント(N・m) | 破壊形態 |
|-------|------------|------------------|--------------|----------|
| M-1 | 1体型PC梁 | 10.3 | 32.6 | コンクリート圧壊 |
| M-2 | 従来PCセグメント梁 | 9.4 | 20.9 | コンクリート圧壊 |
| M-3-1 | 片鉄筋付着型 | 12.9 | 36.1 | コンクリート圧壊 |
| M-3-2 | | 9.4 | 38.1 | コンクリート圧壊 |
| M-3-3 | | 10.3 | 36.5 | コンクリート圧壊 |
| M-4-1 | 両鉄筋付着型 | 9.4 | 39.5 | コンクリート圧壊 |
| M-4-2 | | - | - | - |
| M-4-3 | | 8.6 | 38.3 | コンクリート圧壊 |
| M-5-1 | 接合鉄筋使用型 | 12.9 | 36.8 | コンクリート圧壊 |
| M-5-2 | | 10.3 | 36.6 | コンクリート圧壊 |
| M-5-3 | | 11.2 | 36.1 | コンクリート圧壊 |

6. 6. 考察

プレキャストセグメントの接合部における継ぎ手鉄筋は、軸方向鉄筋同様に、引張鉄筋として機能を成していると考えられる。そのことは鉄筋ひずみ曲線より明らかである。

また、たわみについても、従来のプレキャストセグメント梁より1体型PC梁と同様の挙動が観測できた。

部材におけるひびわれ状況は、接合部の縁切れが接合鉄筋の付着により防がれている。しかし接合面の縁切れ幅は、他のひびわれ幅より明らかに大きい。このことは、今回の試験体の大きさによるものかどうか、更に研究を進めなければ不明な点も多い。

7. まとめ

プレキャストセグメントの接合法の開発に関し、今回の2つの実験で以下の点が確認された。

- 1) 接合鉄筋の重ね継手長(付着長)は、「コンクリート標準示方書(土木学会)」に準じ算出できた。
- 2) 載荷実験における試験体M-2とM-3, 4, 5の比較より、セグメント接合面での残留応力を確認した。
- 3) 接合面は接着剤による完全硬化が、ひびわれ状況から判断できた。
- 4) プレキャストセグメント工法において、接合鉄筋を用いて接合し、軸方向鉄筋に連続性をもたせることで、1体型PC梁同様とみなすことができる。

ここに実験結果をもとに、今後は大供試体による曲げ、ねじり、せん断抵抗性の確認を行う。今後のPCセグメント工法の一案となれば幸いです。

参考文献

- [1] コンクリート標準示方書(土木学会)
- [2] 多田孔充、島 弘、久野公徳: プレキャスト部材のシース孔にグラウトで定着した鉄筋の付着性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 2-2092