

(60) 鋼板を接着接合した鉄筋コンクリート はりの耐荷力

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PLATED REINFORCED CONCRETE BEAMS

横 田 弘*, Alan E Vardy**

Hiroshi YOKOTA

The conditions that must be satisfied at the end of a steel plate bonded externally to a reinforced concrete beam are determined experimentally. Tests were executed to investigate the effectiveness of various configurations involving tapers, holes and bolts at the ends of the plates to decrease stress concentrations. Experimental results obtained from the test programme are compared with analytical predictions. The effectiveness of various configurations is discussed and it is concluded that the plate ends should be anchored to a compression zone in the parent beam.

1. まえがき

鉄筋コンクリート桁や床版などの補修・補強工法の1つに鋼板接着工法がある。この工法は、鋼板を接着剤を用いてコンクリートの引張縁に接合し、断面剛性と耐荷力の上昇を期待するものである。施工が部材下部で行われるため施設の供用停止期間を短くできることや、補修・補強前後で部材の断面寸法が大きく変化しないため、特に橋梁では桁下のクリアランスが確保できるなどの利点がある。しかし、我が国をはじめヨーロッパ諸国や南アフリカですでにこの工法が採用されているにもかかわらず、補強効果に関して十分な信頼性が得られていない¹⁾。この工法では、鋼板端部付近のコンクリートへの応力集中によって比較的小さい荷重下で鋼板の剥離が生じ、補強の効果が十分に達成されない²⁾。また、長期間の耐久性に関する情報³⁾が十分ではないという技術的課題がある。これらのことから、現状では同工法がコンクリートの剥落防止程度に採用されているにすぎず、補修・補強を達成すべく設計・施工法の確立が望まれている。

本報告では前者の技術的課題に対して、鋼板の端部に各種の加工を施すことで鋼板の剥離を防止することを試みた。有限要素法による解析によってテーパやボルトなどの加工による応力集中低減効果を事前に検討し、実構造物に採用可能な手法を選択した。次に、鋼板を接着した鉄筋コンクリートはり試験体を作製し、曲げ載荷試験を実施して鋼板端部の形状のはりの力学特性への影響を把握した。さらに、耐荷力、鋼板の剥離荷重などの算定方法を検討した。

* 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部

** PhD Professor of the Department of Civil Engineering, University of Dundee (Scotland, UK)

2. 鋼板端部の形状の影響⁴⁾

鋼板接着工法での鋼板端部付近の応力集中の程度を調べ、有効な低減方策を事前に検討するために有限要素法による解析を実施した。

鋼板を引張縁（下縁）に接着接合したはりに一点集中荷重を載荷した場合のはり下縁での軸方向のひずみ分布の計算結果を図-1に示す。これは、線形有限要素法を用いて求めたものである。その結果、鋼板端部付近ではかなり大きなひずみ量が計算され、応力集中が生じていることがわかる。

鋼板端部でのこの応力集中を低減するあるいは鋼板の剝離を防止する方策としていくつかのものが考えられるが⁵⁾、ここでは鋼板端部を加工する方法について検討を行う。鋼板に鉛直方向テーパ加工を施したはり下縁でのひずみ分布を図-2に、鋼板に水平方向テーパ加工を施したはり下縁でのひずみ分布を図-3にそれぞれ示す。鉛直方向テーパは、鋼板の厚さ方向に断面を徐々に減少させていく方法で、応力集中を低減するために採用される一般的な方法である。また、水平方向テーパは、鋼板の幅方向に断面を徐々に減少させるもので、鋼板端部は3角形となる。両者とも図-1に示す矩形形状（無加工）の鋼板での結果と比べて最大ひずみ量が小さくなっている。また、水平方向テーパの方が鉛直方向テーパと比べて最大ひずみ量が小さくなっており、応力集中低減に対する効果が高い。テーパは長いほど応力集中低減効果が高いと考えられるが、実構造物では鋼板の鉛直方向に十分長いテーパを設ける加工は難しくなるおそれがある。

一方、実際にこの方法で補修・補強が行われた構造物では、鋼板の剝落を防止するためにボルトなどによって鋼板を固定する例が見られる。ボルトを設けたはり下縁でのひずみの分布を図-4に示す。実線で示す鉛直ボルトの場合には、ボルトのない矩形形状の鋼板での計算結果と比べてひずみ量ほとんど変わりがなく、応力集中を低減するという観点からは効果が少ない。破線で示す傾斜ボルト（45° 方向に配置）の場合には鋼板端部付近でのひずみ量が鉛直方向テーパでの結果程度まで小さくなり、応力集中の低減に効果があることがわかる。また、ボルトにあらかじめ軸力を導入しておけば、コンクリートの斜めひびわれの発生・伝播を防止できるという利点も考えられる。

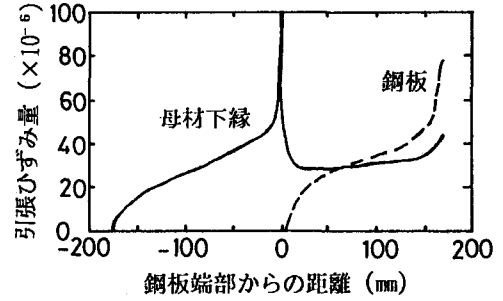


図-1 ひずみ分布（矩形）

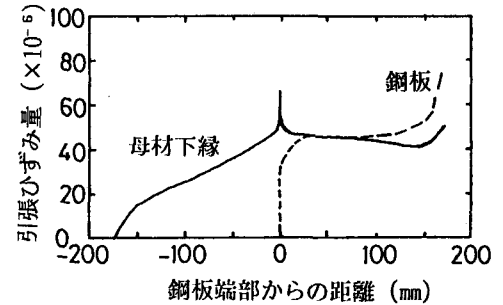


図-2 ひずみ分布（鉛直方向テーパ）

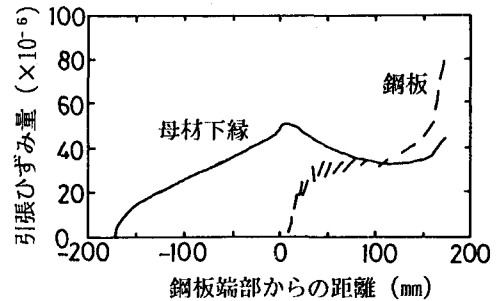


図-3 ひずみ分布（水平方向テーパ）

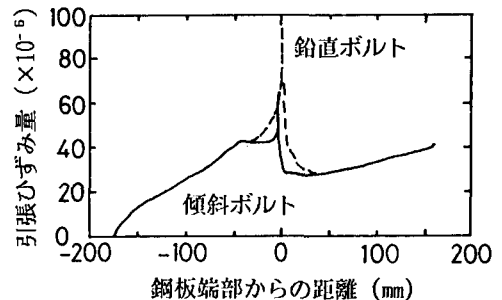


図-4 ひずみ分布（ボルト）

これらのテーパおよびボルトの効果に関しては、破壊力学手法で得られた応力集中係数によっても評価されている⁴⁾。それによると、傾斜ボルトを用いて初期応力を導入する方法が、応力集中係数の低減に効果の高いことがわかった。

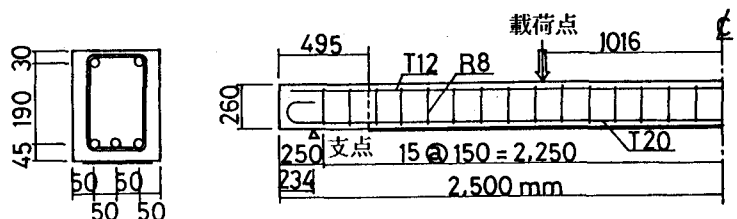


図-5 はり試験体の形状・寸法

3. 載荷試験の概要

2. で述べた検討は、いずれも構成材料を弾性体と仮定して行われたものであり、実際のコンクリート構造物への適用に当たっては載荷試験を通しての検証が必要である。そこで、鋼板を接着した鉄筋コンクリートはりを製作し、載荷試験を行った。

(1)試験体

試験体の総数は6体で、そのうち1体は鋼板を接着しない鉄筋コンクリート母材である。すべての試験体の基本寸法は同一で幅 200mm、高さ 260mm、長さ5000mmの矩形断面はりである。試験体は図-5に示すように直径が20mmの異形鉄筋3本を引張側に、直径が12mmの異形鉄筋2本を圧縮側に、および直径が8mmの丸鋼をスターラップとして 150mm間隔に配筋した。鋼板は厚さ6mm、幅 150mmで、はりの端部より 495mm中央に入った位置から接着した。これらの鋼材の機械的性質を表-1にまとめる。使用したコンクリートは、骨材最大寸法が10mm、水・セメント比が56.7%である。載荷試験時の圧縮強度は49~56N/mm²（辺長10cmの立方体供試体による試験結果）であった。

鋼板の両端（A端およびB端とする）は、各試験体毎にそれぞれ表-2に示すように加工を行った。鉛直方向テーパは鋼板厚さの6倍の長さにわたって加工した。水平方向テーパは鋼板幅の3倍を設定した。ボルトは直径20mmのものを2本使用した。傾斜ボルトははりの支点方向に向かって45°の方向に挿入した。各ボルトはネジを設け、試験体の上縁および下縁でナットによって定着した。その際、ボルト1本当たりにつき35kN程度の初期軸力を導入した。

接着剤は、2剤混合式常温硬化型のエポキシ系⁶⁾のものを用いた。接着剤の曲げ弾性係数、せん断強度およびdouble-lap-jointでのせん断強度⁷⁾はそれぞれ8.1kN/mm²、36.3N/mm² および18.2N/mm² であった。鋼板の接着直前に鋼板およびコンクリートの表面処理を行った。表面処理は、洗浄などで表面の汚れを取り除いた後、グリットブラस्टイングを行った。鋼板のコンクリートへの接着は、接着剤層の厚さが1mmとなるように行った。また、実構造物の状況を再現するために、接着前に15kNの集中荷重を載荷し、曲げひびわれを発生させた。

表-1 使用鋼材の機械的性質

名 称	寸 法 (mm)	降 伏 強 度 (N/mm ²)	引 張 強 度 (N/mm ²)	伸 び (%)
鋼 板	板厚 6	333	483	欠 測
鉄 筋	直径 20	532	630	21
鉄 筋	直径 12	505	605	26
鉄 筋	直径 8	371	519	35

表-2 鋼板端部の加工の状況

	A 側	B 側
No.1	矩形（無加工）	鉛直方向テーパ
No.2	鉛直方向テーパ	水平方向テーパ
No.3	水平方向テーパ	傾斜ボルト
No.4	鉛直ボルト	傾斜ボルト
No.5	鉛直ボルト	矩形（無加工）
No.6	鋼板なし	鋼板なし

鉛直方向テーパ

水平方向テーパ

ボルト

(2) 載荷方法

試験は載荷スパンを4532mmとする単純ばりとして、図-5に示す位置に集中荷重を静的に載荷した。その際、1体の試験体でA、B両端の2種類の鋼板形状に関する実験結果を得ること目的として、両載荷点に交互に集中荷重を作用させる方法を採用した。すなわち、①A端側の載荷点に50kNまで載荷し除荷する、②B端側の載荷点に破壊時まで載荷し除荷する、③再度A端側の載荷点に破壊時まで載荷するという手順で載荷した。また、鋼板の剥離が反対側の実験結果に影響を及ぼさないように、試験体スパンの中央をクランプで保持した。試験中、鋼材のひずみ量は長さ6mmのひずみゲージで、試験体のたわみは変位計で測定した。

4. 試験結果と考察

(1) 破壊の形式と破壊荷重

載荷試験終了後の試験体のひびわれ状況を図-6に示す。鋼板を接着しない鉄筋コンクリート母材では曲げひびわれが卓越した。一方鋼板接着ばりでは当初は曲げひびわれが優勢であったが、ボルトを設けない試験体では荷重が70~80kNを越えた頃から鋼板端部のコンクリート部分にひびわれが見られ、その後鋼板に沿った水平ひびわれが生じた。最大荷重の5kN程度前になって鋼板が端部より剥離し、破壊に至る現象が観察された。ボルトを設けた試験体では、鋼板端部でひびわれが90kN程度の荷重下で生じたが、水平ひびわれが進展せず、鋼板の剥離が顕著に観察されなかった。

試験結果の一覧を表-3に示す。限界状態設計法⁸⁾により求めた鉄筋コンクリート母材の終局荷重は105kNで、試験結果とほぼ等しかった。鋼板接着ばりの終局荷重は完全合成である場合に166kNと算定される。ボルトを用いない試験体では、この計算値の85%程度の耐力しか得られなかった。母材の耐力と比較してもわずかしかな耐力が上昇せず、水平方向テーパーでは2割程度下回った。しかし、鉛直ボルトを用いた試験体では、計算値

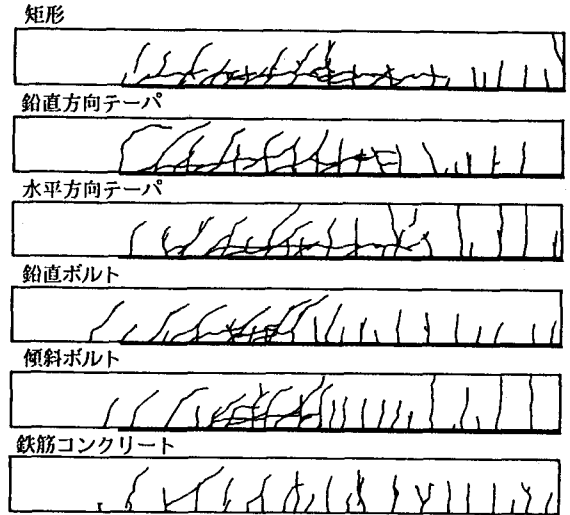


図-6 ひびわれ発生状況

表-3 試験結果

鋼板の種類	耐力 (kN)	破壊の主形態	鋼板の平均剥離荷重 (kN)	鋼板の平均剥離長さ (mm)	鋼板端部での平均ひびわれ荷重 (kN)
矩形 (無加工)	115、100	鋼板の剥離	102	950	70
鉛直方向テーパー	110、110	鋼板の剥離	102	920	70
水平方向テーパー	85、90	鋼板の剥離	87	650	80
鉛直ボルト	166、150	せん断破壊	...	...	90
傾斜ボルト	155、115	せん断破壊	...	...	90
鋼板なし	102、104	曲げ圧縮破壊	-	-	-

：他端での破壊が進行して載荷不能となったもの

...：測定ができなかったもの

と同程度の耐荷力が得られ、終局に至るまで鋼板とコンクリートとの合成が確保された。傾斜ボルトでは、鉛直ボルトに比べて若干耐荷力が小さかったが、これは傾斜ボルトでは定着や初期応力の導入が十分行えなかったためであると考えられる。水平方向テーパの場合は、耐荷力がかなり小さかったが、これは接着面積が少ないので鋼板の剥離が速く生じたためである。今回の载荷試験の範囲では、ボルトによる定着が最も有効であり、数値計算による予備検討結果と若干異なる傾向を示した。

鋼板端部での応力状態は複雑である。ここでのせん断応力が接着剤のdouble-lap-jointのせん断強度に等しいときに鋼板剥離が始まると仮定して、弾性計算でその際の荷重を計算すると、水平方向テーパの場合には87kN、矩形および鉛直方向テーパの場合には102kNとなり、剥離荷重の試験結果と良く一致した。

(2) 鋼板のひずみ

図-7に矩形鋼板の軸方向のひずみ分布を、図-8に傾斜ボルトを設けた鋼板のひずみ分布を示す。鋼板剥離前では、試験で得られたひずみ分布は弾性理論によって求めたひずみ分布とほぼ等しくなった。しかし、その後の鋼板の剥離の発生・進展によってひずみの分布が乱れてきた。鋼板の剥離長さは図-7より約950mm程度と推定できる。同様に鉛直方向テーパでは約920mm、水平方向テーパでは約650mmの剥離長さが得られた。鋼板の剥離は母材の耐荷力に等しい断面力が発生する位置まで発生すると仮定すると、荷重が110kNのとき剥離長は約1190mmとなり、試験結果と一応の対応が認められた。ボルトを設けた試験体では、鋼板のひずみの分布に大きな乱れが生じず、鋼板と母材との一体性が確認できた。

(3) たわみ

図-9に傾斜ボルト試験体での荷重とスパン中央のたわみとの関係を示す。荷重-たわみ関係は最大荷重付近まではほぼ直線で、最大荷重以後は急激に荷重が低下し、じん性がほとんど認められなかった。たわみ量は、鋼板端部の形状にほとんど関係なく全試験体でほとんど同じ傾向を示し

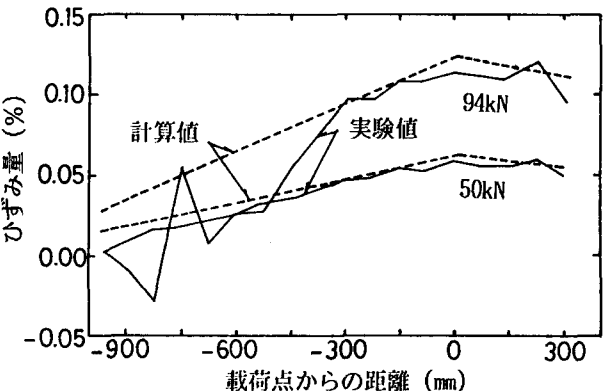


図-7 鋼板のひずみ分布 (矩形)

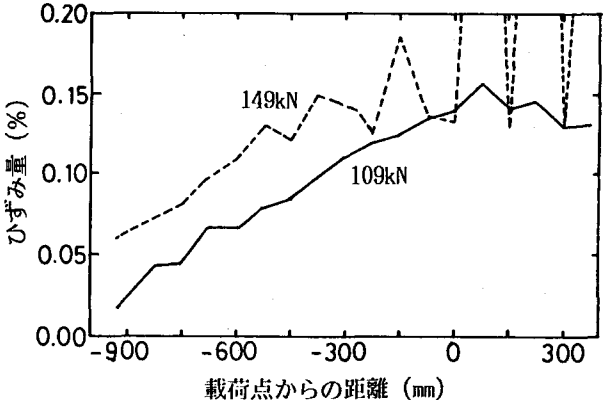


図-8 鋼板のひずみ分布 (傾斜ボルト)

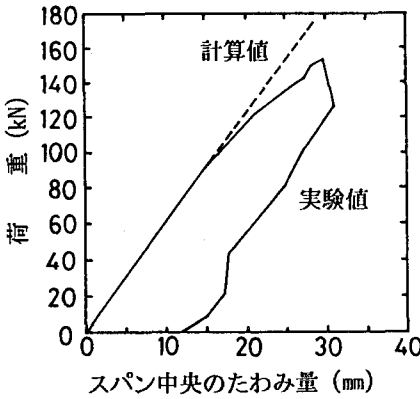


図-9 荷重とたわみとの関係

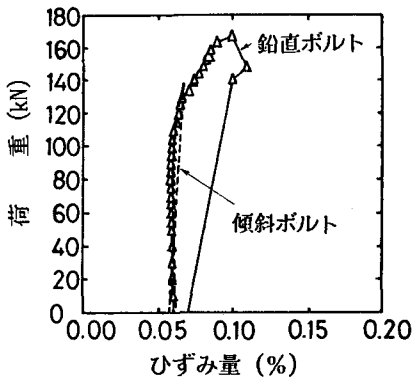


図-10 ボルトに生じたひずみ

た。また試験体のたわみ量は、鉄筋コンクリートはりのたわみの計算式⁸⁾により求めた値と良く一致した。

(4)ボルトのひずみ

図-10にボルトに生じたひずみと荷重との関係を示す。鋼板の剥離が生じるまではボルトに発生したひずみ量は小さく、初期軸力分からの変化がほとんどなかった。鉛直ボルトでは、載荷荷重が 140kN 程度を超えてから若干のひずみ量が測定された。一方傾斜ボルトでは、試験体が破壊に至るまでひずみの変化がほとんどなかった。

5. まとめ

載荷試験の結果得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- ①鋼板端部の加工処理は、はりの破壊形式および破壊荷重に大きな影響を与えたが、鋼板の剥離が生じるまでははりの剛性やたわみなどにほとんど影響を与えなかった。
- ②鋼板接着はりはコンクリートの曲げひびわれの発生、水平ひびわれの発生、鋼板の剥離、コンクリートのせん断破壊という順で破壊に至った。いったん鋼板の剥離が生じた場合には、急速に剥離が進展し、はり全体の破壊に至った。
- ③ボルトによる定着を施したはりでは鋼板の剥離が防止でき、最も大きな耐荷力が得られた。すなわち、鋼板をコンクリートの圧縮域に定着することが最も有効な方法であることがわかった。その場合、完全合成を仮定した計算式ではりの耐荷力を求めることができた。
- ④鋼板の剥離荷重および剥離長さは、弾性解析によって精度よく求めることができた。

載荷試験の実施に当たっては、Dundee 大学職員の御協力を得ました。また、本稿の取りまとめの際には、港湾技術研究所構造部・清宮 理室長の御助言を賜りましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之, 栗田章光, 中井 博, 黒山泰弘: 鋼板接着工法により補強した RC 床版の疲労性状, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1986年9月, pp.247-254
- 2) Johnson, R P and Tait, C J. The strength in combined bending and tension of concrete beams with externally bonded reinforcing plates. Building and Environment, 16-4, 1981. pp 287-299.
- 3) 大橋 猛, 佐伯 昇, 根本任宏: 鋼板接着したコンクリート桁の補強効果と耐久性について, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1986年9月, pp.255-260
- 4) Vardy, A E and Anandarajah, A. Bonded joint end conditions: a laboratory specimen. Proc 3rd international conference on Structural Faults and Repair, London, 1987.
- 5) Jones, R, Swamy, R N and Charif, A. Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates. The Structural Engineer 65-5, 1988.
- 6) Mays, G C and Hutchinson, A R. Engineering property requirements for structural adhesives. Proceedings of the Institution Civil Engineers, Part 2, Vol 85, 1988.
- 7) Agobiani, H A. Behaviour of precast open sandwich slabs in hogging moment regions of continuous bridge decks. MSc thesis, University of Dundee, 1987.
- 8) BS8110, Structural use of concrete, Part 1 Code of practice for design and construction. British Standard Institution, London, 1985.