

# 首都高速道路の鋼製橋脚隅角部の損傷と補修・補強

平 林 泰 明

首都高速道路は、最初の供用開始から42年が経過し、供用延長は、約283 km、1日あたりの通行台数は112万台に達している。平成9年に鋼製橋脚の隅角部に疲労損傷が発見され、一斉点検の結果、570基の隅角部にきれつ状の損傷が発見された。原因を検討の結果、大型車の交通量の増加、大型車の重量化だけでなく、橋脚構造、隅角部のせん断遅れ、建設当時の施工上避けられない溶接欠陥が影響していることがわかった。本報文では、その検討経緯および対策の概要について報告する。

キーワード：維持・管理，橋梁，補強，補修，鋼構造，橋脚，疲労，溶接

## 1. はじめに

首都高速道路は、首都圏の交通の円滑化を目的に、昭和37年には、京橋～芝浦間4.5 kmで最初の供用開始以来、昭和39年の東京オリンピック開催時には都心と羽田空港、都心と代々木および渋谷を結ぶ32 kmを完成させた。昭和40年代以降、日本経済の発展により一層の道路整備が必要になり、都市間高速道路からの交通量を都市内高速道路に吸収するため、放射線を延伸する整備の必要が生じた。

昭和46年には東名高速道路、昭和51年には、中央自動車道と接続し、その後も、都市間高速道路との接続、神奈川地区、湾岸線、中央環状線、埼玉地区の整備が進められた。供用延長は、昭和48年に100 km、昭和62年に200 kmを超え、現在は、都心環状線を中心とする放射状のネットワークを形成し、283 kmを供用している。平成15年度の1日あたりの通行台数は、112万台、平均大型車混入率は約9%である。

首都高速道路の構造は、総延長の約82%が高架橋であり、その内訳は、鋼桁が約69%、コンクリート桁が約13%である。最初の供用から40年以上経過し、近年、老朽化による損傷が発生し始めている。

## 2. これまでの経緯

首都高速道路では、路線毎に5年1回の頻度で主要な構造物の接近目視を主体とする定期点検を実施している。平成9年に、3号渋谷線の定期点検において、

鋼製橋脚の隅角部溶接部にきれつ状の損傷が発見された。発見された損傷に対し、平成10年、11年に追跡監視を行い、平成11年にきれつの進展が確認されたことから、損傷は、進行性の疲労きれつであることを確認した。

それを受けて、平成12年から、首都高速道路の隅角部を有する鋼製橋脚2,011基に対して、主に磁粉探傷試験による点検を実施し、570基にきれつ状の損傷を確認した。そのうち、30 mm以上のきれつ長さを有する257基の橋脚に対して常設足場等を設置して詳細調査を実施した。

その結果、30 mm以上のきれつを有する257基のうち、54基のきれつについては、表面の切削調査により消滅した。30基については、きれつ位置が主部材の溶接部以外であるなど、きれつの進展の危険性が低いことが確認できたため対策の優先順位を落とした。この結果、優先的に対策を実施する対象橋脚は173基となった。

## 3. 原因の推定

### (1) 首都高速道路の供用年数

首都高速道路では、30年以上経過した路線延長が107.8 km (38.0%)、20年以上30年未満の路線延長が53.0 km (18.7%)を占めており、長期間にわたり過酷な状況下で供用されている。

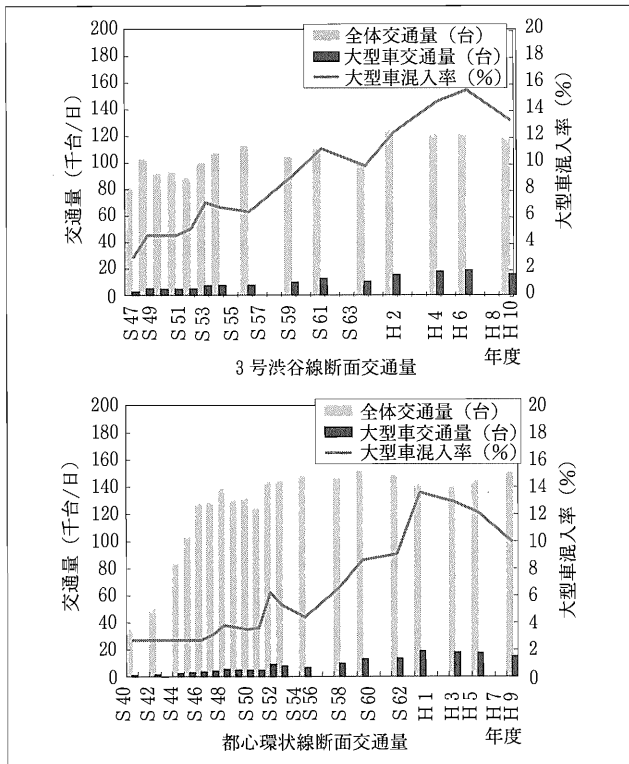
損傷が発見された橋脚は、30年以上経過しているものが398基 (70%)、20～30年経過しているものが133基 (23%)であり、20年以上経過した橋脚が全体

の93%を占めており、損傷と供用年数に強い相関のあることがわかる。

(2) 荷重の観点

(a) 大型車交通量の推移

首都高速道路における路線別の損傷発生基数は、3号渋谷線と都心環状線で損傷の発生割合が高い。図一1に3号線と都心環状線の交通量の推移を示す。



図一1 交通量の推移

3号渋谷線では、昭和47年から平成10年にかけて、大型車日断面交通量が約6倍に増加し、大型車混入率は、約4倍となっている。また、都心環状線では、昭和40年から平成10年にかけて大型車日断面交通量が約16倍に増加し、大型車混入率は、約4倍の伸びとなっている。

(b) 車両荷重の実態

鋼溶接部が受ける荷重1回あたりの疲労損傷度は、応力範囲の3乗に比例する。応力範囲は、活荷重に概ね比例することから、車両重量が2倍になると、疲労損傷度は8倍となり、車両重量の大きさが疲労損傷度に大きな影響をあたえることがわかる。

昭和63年に3号線用賀本線料金所で実施した荷重実態調査をもとに、車両荷重の大きさが疲労に与える影響について検討した。

表一1に示す調査結果より、3号線における大型車

の等価荷重は、22.6 tfであり、当時の設計自動車荷重20 tfを上回っていることから、重量超過車両が相当台数通行していると推測される。また、最大自動車荷重として72.7 tfの車両も計測されており、設計自動車荷重を大きく超過した重量車両の通行していることがわかる。

表一1 車両荷重の実態調査結果

(昭和63年 3号渋谷線用賀本線料金所で実施)

車種	車両台数 N (台)	車種別等価荷重 $W_D$ (ton)	等価荷重 $W_D'$ (ton)	最大値 (ton)
乗用車	57,738	2.147	—	4.8
小型トラック	4,122	3.382	—	8.6
中型トラック	14,688	8.063	—	18.9
大型トラック	14,160	21.333	22.628	37.1
ダンプミキサ	210	27.020		42.9
タンクローリ	744	19.240		35.5
トレーラ	552	39.720		72.7
バス	576	14.036	—	20.0

$$W_D = \sqrt[3]{\frac{\sum W_i^3}{N}}, \quad W_D' = \sqrt[3]{\frac{\sum W_i^3}{N}}$$

ここで、 $W_i$ : 車両荷重、 $N$ : 車両台数  
ただし、 $W_D'$ は、大型トラック、ダンプミキサ、タンクローリ、トレーラの4車種の等価荷重を示す

(3) 設計製作上の観点

(a) 疲労設計基準の変遷

従来、道路橋示方書では、鋼道路橋に対し、鋼床版ならびに道路橋に軌道または鉄道を併用する場合などを除いて一般に疲労の影響を考慮しなくて良いとされてきた。しかし、近年の鋼道路橋での疲労損傷の発生を考慮し、平成13年度に改訂された道路橋示方書では、疲労設計を行うことが新たに規定された<sup>1)</sup>。

(b) 橋脚形状

首都高速道路には、都市内という立地条件の制約から、複雑な形状の橋脚が多数存在する。例えば、街路との関係で、橋脚柱が立つ位置が制限され、横梁の張出し部の長さが長く、車両の通行により大きな力が隅角部に繰返し作用する構造となっているものが数多く見られる。

(c) 隅角部の設計

隅角部のフランジには、せん断遅れにより局部的に大きな応力が発生する。首都高速道路公団では、鋼製橋脚隅角部の設計方法として、昭和38年からせん断遅れを考慮した設計が行なわれており、昭和44年には奥村、石沢の方法<sup>2)</sup>を適用することが規定されている。

図一2は、試験体に対するFEM解析結果および実測された隅角部フランジ幅方向の応力分布であり、応

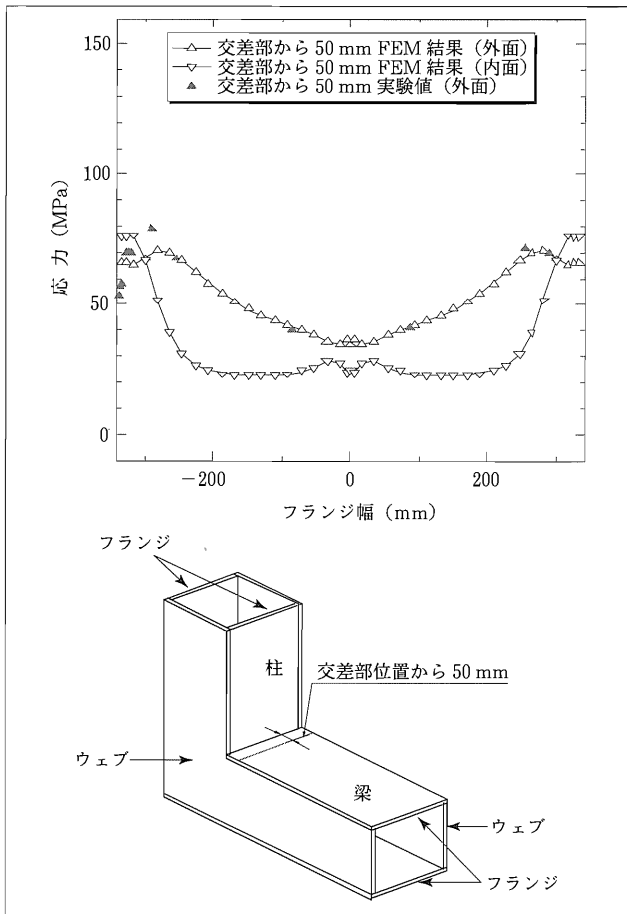


図-2 隅角部フランジ幅方向の応力分布

力はフランジ幅方向に一樣ではなく、両端部にせん断遅れによる局部的に高い応力が発生していることがわかる。実際の橋脚においても同様にせん断遅れによる高い応力が生じていることが幾つかの応力測定結果からわかっている。このような高い応力は、隅角部の形状、断面寸法などにより異なり、従来の設計式を用いても正確には評価できず、より高い応力が発生していることが考えられる。

(d) 隅角部の構造および溶接

隅角部の角部は梁および柱のフランジ、ウェブの鋼板が交差しているため、鋼板の組み合わせ方によっては溶接がしづらく、図-3に示すような不完全溶込み部が生じやすい構造となることがある。今回疲労損傷が発見された多くの鋼製橋脚では、不完全溶込み部が残されている可能性が高い。なお、きれつ削込み調査により、きれつは不完全溶込み部を起点としていることが判明している。このような溶接内部の不完全溶込み部を起点して発生しているため、早期発見が困難となっている<sup>3)</sup>。

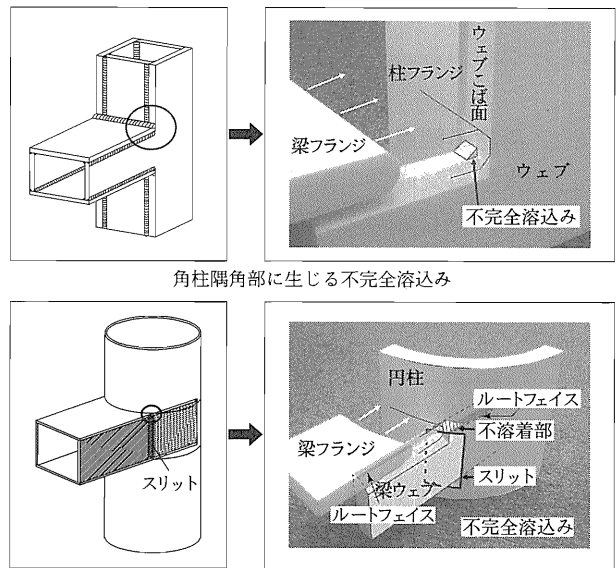


図-3 隅角部の角部に生じる不完全溶込みの例

4. 補強およびきれつ除去方法

(1) 基本方針および対策

対策を実施するにあたって、以下の三つを基本方針とした。

- ① 疲労きれつを除去する。
- ② 疲労きれつ発生の主原因の一つである、隅角部のフランジ端部に存在する不完全溶込み溶接部を除去する。
- ③ 疲労きれつ発生の原因の一つである、隅角部のフランジ端部に発生するせん断遅れによる高い応力を補強部材の設置により低減する。

対策は、以下の4段階で実施した。

- ① 詳細調査
- ② 補強材の設置
- ③ 疲労きれつ除去
- ④ 疲労耐久性の評価

(2) 詳細調査

疲労きれつが発見された個別橋脚ごとに、

- ① 書類調査
- ② きれつ切削調査
- ③ 板組み調査
- ④ 溶接状態調査
- ⑤ 実働応力調査
- ⑥ 鋼材調査

を実施して疲労きれつ発生の原因を調べた。

### (3) 補強材の設置

補強材は、

- ・隅角部に発生する活荷重応力範囲が補強前の50%程度以下になること、
- ・補強材設置後の橋脚全体において、道路橋示方書に示される中規模な地震動に対し健全性を損なわないこと、
- ・大規模な地震動に対しては限定的な損傷にとどまること、

を目標とした。

角柱で、応力状態が一般的な隅角部に対しては、梁および柱の寸法、板厚に応じてあて板の標準構造を決めて適用した。角柱で複雑な構造の橋脚、丸柱は、標準構造の適用範囲外として、FEM解析を用いて設計した。補強材を橋脚に取付けるボルトは、既設隅角部によく見られる鋼材の溶接変形のために生じる補強材との隙間や、交通開放下で大きな力が作用する隅角部において、1本ずつボルトを施工することを考慮し、より確実な施工と補強効果を得るために、支圧接合用のものとしている。

### (4) 疲労きれつ除去方法

疲労きれつが発生している橋脚の大半は、1960～1970年代に建設されており、当時の鋼材は硫黄量が多く、鋼板の板厚方向の引張性能を示すZ方向搾り値が1980年代以降の鋼材に比較して一般に低い。また、隅角部は、非常に高い拘束状態にあり、きれつ除去後に溶接補修を行うと鋼板が板厚方向に裂けるラメラティアの発生する可能性が高い<sup>4)</sup>。したがって、隅角部のきれつ処理方法は、

- ① 疲労きれつと疲労きれつの発生源であるフランジ端部の不完全溶込み部を機械施工により所定の形状(円孔を基本とする)で除去する。また、除去後の円孔内の仕上げおよび面取りを丁寧に行う。
- ② 疲労きれつが所定のきれつ除去形状の範囲外に進展している場合は、きれつ先端から一定の距離(150mm程度)を離してストップホールを設け、きれつがストップホールより先に進展するのを防止する。

として実施する。

角柱のきれつ除去のための削孔の形状は、図-4に示すように、隅角部の板組みにより、スカーラップ形式または大コア形式とした。これらの疲労耐久性向上の効果を確認するために実物の橋脚に近い大きさの供試体を用いた疲労試験を実施し、隅角部の疲労強度を大幅に改善できることを確認した。なお、丸柱におけ

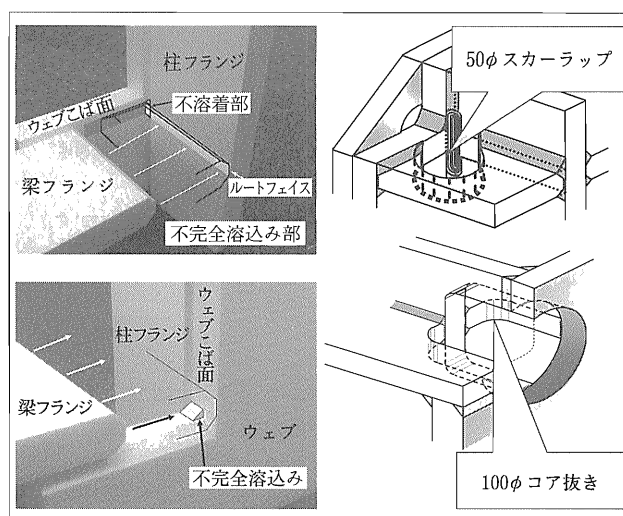


図-4 きれつ除去形状

るきれつ除去方法については、現在検討中である。

## 5. 補修・補強事例

3号渋谷線渋谷区池尻付近の橋脚に対して、隅角部の応力の低減を目的として、平成12年に図-5に示す支圧接合用高力ボルトを用いたあて板補強を実施した。あて板を支圧ボルトにより取付ける際、先行して打込んだボルトに力が集中しないよう、FEM解析を適用してボルトの施工順序を設定した。

補強実施後、あて板補強の効果を確認するために、現地で25t荷重車2台連行による試験走行を行い、対策前後で応力を測定した。その結果、きれつが発生しているフランジ端部の応力が約50%に低減したことから、あて板補強が応力の低減に有効であることを確認した。また、一般交通下での応力頻度測定でも、応力が半減していること確認した。あて板補強後、きれつの発生起点である不完全溶込み部の除去を行なった。除去方法としては、大コア形式により行なった。また、この橋脚のきれつは、フランジ端部から400mmの範囲まで、溶接内部にきれつが存在していた。これは、梁幅の約1/2に相当するため、大規模地震時に対する安全対策として、梁フランジに補強材を設置し、対策を完了した<sup>5)</sup>。

## 6. 今後の検討課題

平成16年8月末現在、優先的に対策を実施する対象橋脚は173基のうち、158基については、補強部材取付けが終了し、きれつ除去は、角柱で鋭意実施している。さらに、表面のきれつ長さが30mm以下の橋脚についても対策を実施する予定である。

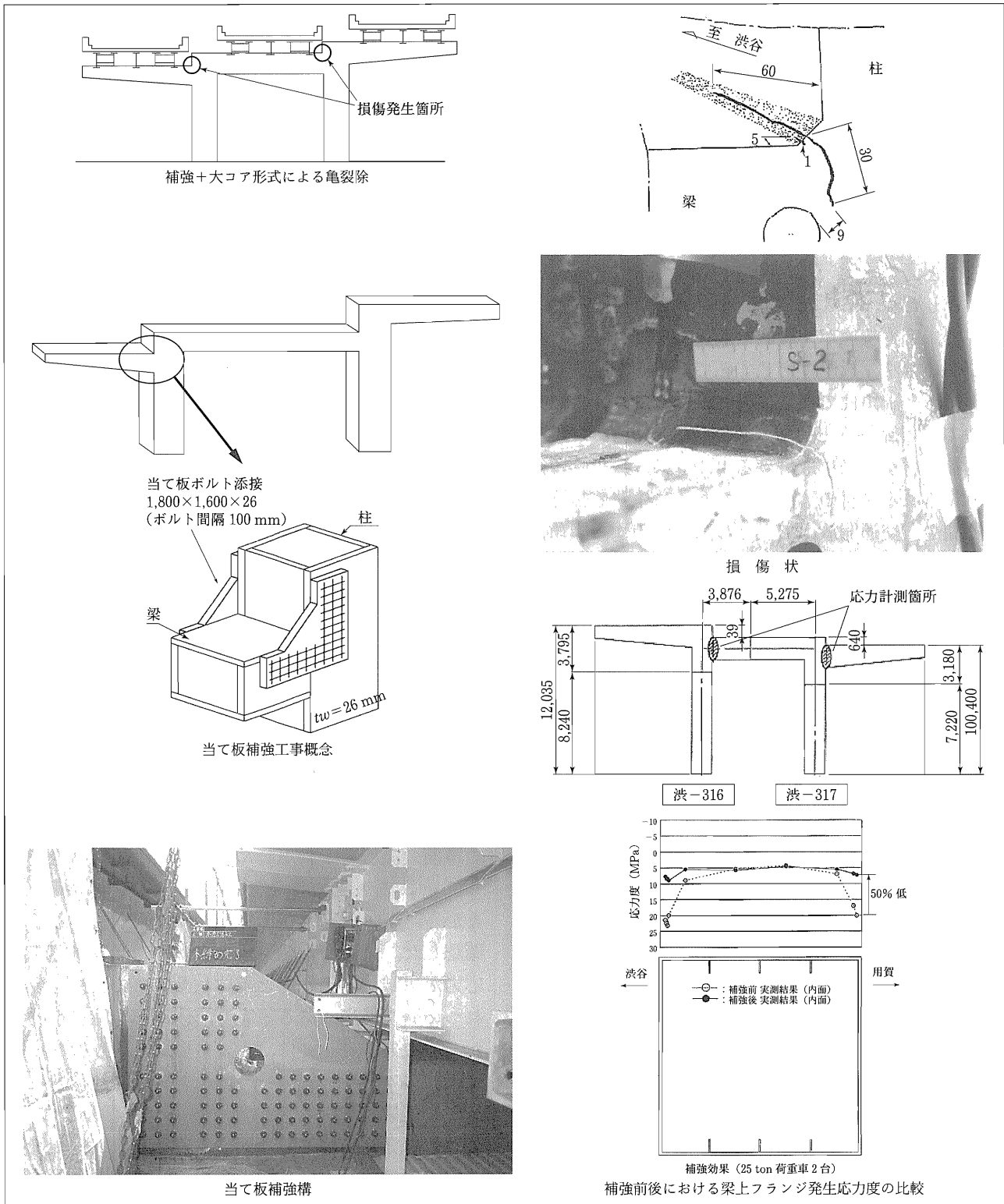


図-5 3号渋谷線池尻付近

今後の検討課題としてつぎのようなことがある。

① 特殊な条件を有する橋脚の対策

首都高速道路は、都市内の限られた立地条件に建設されていることから、街路と一体構造で隅角部の補強空間が制限されたり、隅角部を構成する板組み構造が複雑な橋脚等があり、補強材の設計に時間を要している。これらについては、FEM解析等により、限られ

た空間に設置可能で、十分な効果を有する補強材の検討を実施中である。

② 丸形橋脚のきれつ除去形状の検討

丸柱橋脚は、損傷発生原因が3溶接線の交差部の不完全溶込み部に加えて、柱と梁ウェブとの交差により生じる固有傷が存在することから、角柱のようにきれつ除去の形状が一様に定まらない。現在、個々の橋脚

毎にきれつ発生位置，溶接状態および応力性状を総合的に評価し，きれつ除去形状を設計し，その形状に関して，疲労試験などで疲労性状を確認する。

### ③ 疲労耐久性の評価

きれつ除去後，応力発生状態を調査し，疲労耐久性の評価を行う。

### ④ 維持管理手法

きれつ除去後の疲労耐久性評価を踏まえて，点検頻度，点検部位および点検手法などの今後の維持管理手法の検討を行う。

## おわりに

鋼製橋脚隅角部の補修・補強は，首都高速道路公団が設置した，鋼製橋脚補修検討委員会（委員長：森猛法政大学教授；前任，三木千壽東京工業大学教授）の検討に基づき実施した。委員会で熱心に討議いただ

た委員長をはじめ，各委員にこの場を借りて感謝の意を表す。本報告は，委員会報告書に基づきその概要をまとめたものである。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書（Ⅱ）鋼橋編，p184，2002.3
- 2) 奥村敏恵，石沢成夫：薄肉構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集，No.153，pp.1-18，1968.5
- 3) 三木千壽，ほか：鋼製橋脚隅角部の板組鋼製と疲労きれつモード，土木学会論文集，No.745，pp.105-119，2003.10
- 4) 三木千壽，ほか：既設鋼橋脚の補修溶接におけるラメラティアの発生の可能性検討，土木学会論文集，No.759，pp.66-77，2004.4
- 5) 森河久，ほか：箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策，土木学会論文集，No.703，pp.177-183，2002.4

### 【筆者紹介】

平林 泰明（ひらばやし やすあき）  
首都高速道路公団  
保全施設部  
調査役

# 大深度地下空間を拓く 建設機械と施工技術

最近の大深度空間施工技術について取りまとめました。  
主な内容は鉛直掘削工，単円水平掘削工，複心円水平掘削工，曲線掘削工等の実施例を解説，分類，整理したものです。  
工事の調査，計画，施工管理にご利用ください。

定価 2,310円（本体2,200円） 送料500円

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289