

イギリスにおけるプレキャスト・プレテンション桁の概要

杉江 功^{*1}・Leslie A. Clark^{*2}

はじめに

イギリスの橋梁では、プレストレストコンクリート構造、特にプレキャストプレテンション桁が最も多く利用されている。その規格は、英国プレストレストコンクリート協会 (PCA) によって設けられているが、ここ数年で新しいタイプが3つ開発されるなど、地道ではあるが日進月歩の感がある。一方、メンテナンスも重要な課題であり、橋梁ジョイント部からの漏水に起因する損傷が最も大きな問題となっている。そこで、橋台部も含めたノージョイント化、連続化は最近でも大きな研究対象となっている。

こうしたイギリスの、構造細目や連続化構造を含めたプレテンション桁の概要や、スパン 40 m クラスの最近の実績および長大桁の運搬などについて紹介する。特に連続化構造については、クリープにより中間支点部に生じる正の曲げモーメントに関する筆者らの研究の一部についても概説する。また、損傷と補修についても簡単に

述べる。

1. 英国プレテンション桁の概要

1.1 主 桁

イギリスのプレテンション桁には、主に桁断面の形から名付けられた T, TY, M, Y, U, BOX, SY (Super Y) 桁の7つのタイプがある。TY 桁には、後述する充実または中空の床版橋形式用と、桁橋形式用の二つのタイプがある。また、TY, M, Y 桁には、外桁の景観を配慮して、一方の側面を垂直になるよう配慮した桁 (TYE, UM, YE 桁) も用意されている。各桁には、最も小さい T 桁で 380~815 mm, 最大の SY 桁で 1 500~2 000 mm など、6~10 の桁高が用意され、スパン長や荷重条件などにより桁タイプと桁高の最も適切な組合せが選ばれる。各桁を用いた上部工の断面、TY, M, SY 桁シリーズの断面、および主要橋梁に用いた場合 (最も厳しい HB 45 荷重を考慮) の利用スパン長の範囲を図-1~5 に示す。写真-1 は U 桁の仮置き状況である。

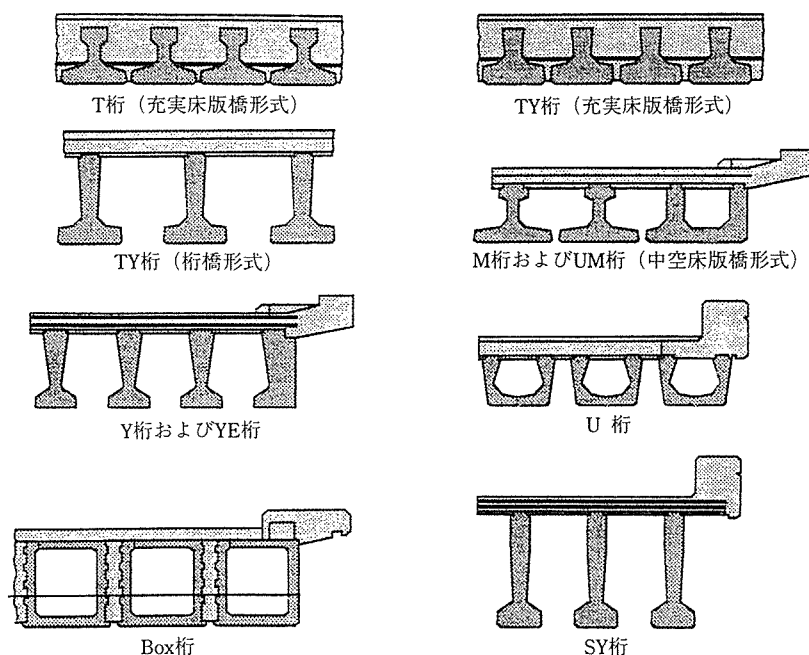


図-1 各桁の断面

*1 Isao SUGIE : 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課

*2 Leslie A. CLARK : バーミンガム大学 工学部 教授

Y桁とSY桁は1991年、TY桁は1994年開発と比較的新しい桁である¹⁾。TY桁とY桁は、設計条件の変化や荷重の増大に伴い、それぞれT桁とM桁を改良したものである。もともと、これらは充実または中空の床版橋形式を意識したものであり、下フランジが幅広で薄くなっている。ところが、最近の傾向として、かぶりを

大きくとり、床版や主桁ウェブを点検するための空間を確保し、かつより大きなプレレストが要求されるようになってきた。そこで、主に下フランジにおけるPC鋼材と鉄筋の配置を容易にし、隣り合うプレテンション桁の間に点検用の空間ができるよう、新しい桁では下フランジを厚くかつ幅を小さくしている。また、下フラン

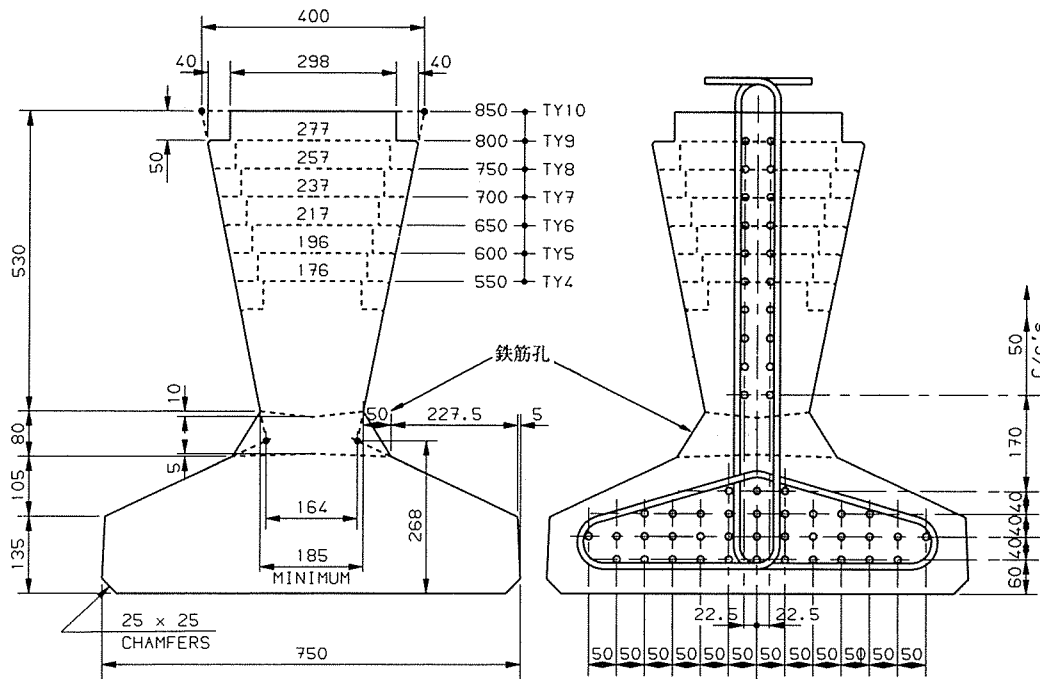
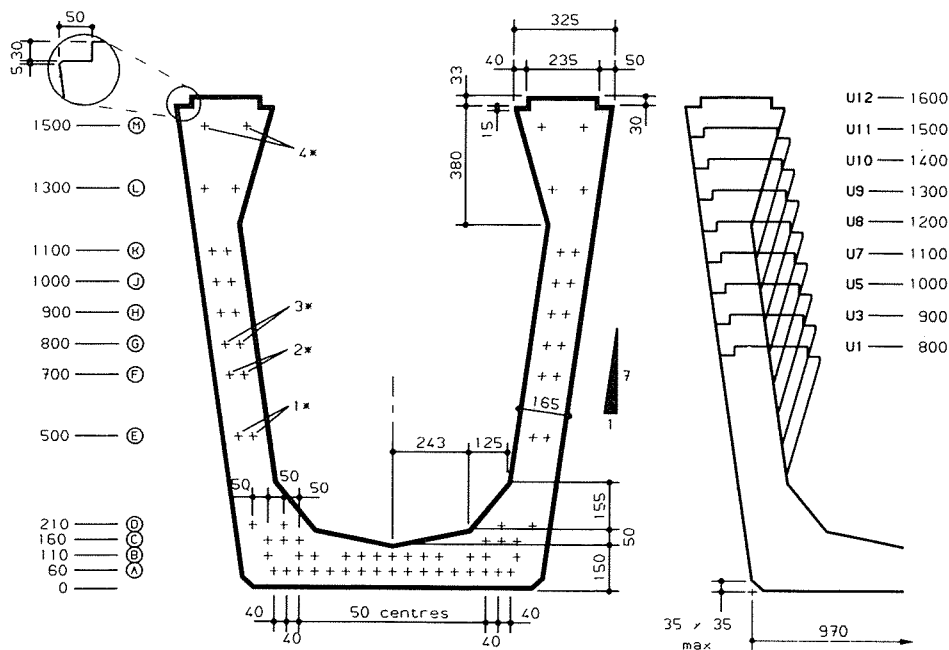


図-2 TY桁シリーズ (TY 4~TY 10) の断面 (PCAパンフレットより)



次のストランドは配置されるのが望ましい。
U1~U3: 1*, 4* U5~U8: 2*, 4* U9~U12: 3*, 4*

図-3 U桁シリーズ (U 1~U 12) の断面 (PCAパンフレットより)

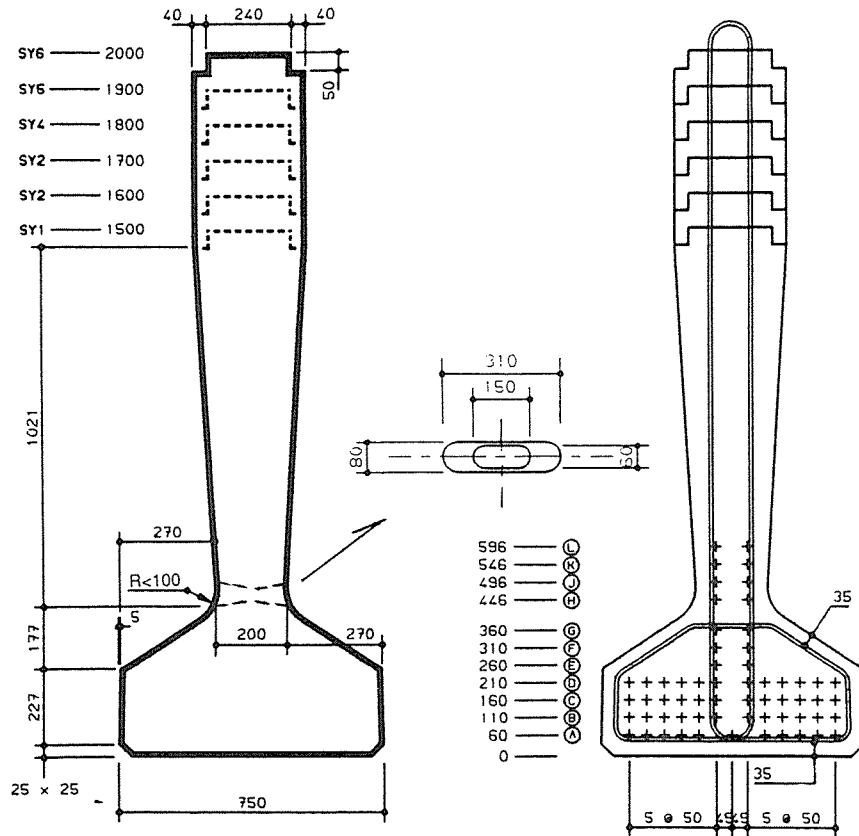


図-4 SY桁シリーズ (SY 1~SY 6) の断面
(PCAパンフレットより)

ジの上面の傾斜を大きくしたため、コンクリート打設が容易になり、ウェブ側面を桁上面まで直線としたため、ひとつの型枠をすべての桁高の桁に使用できるようになった。

SY桁はプレテンション桁のより長スパン化を目的に開発されたものである。また、BOX桁は横締めが必要なこと、制作に手間のかかる形状であることなどから、ほとんど使われていない。したがって、今後、各工場の型枠の減価償却を終えるにつれ、小スパンにTY桁、中から大スパンにYまたはU桁、大から長大スパンにSY桁という使用形態になる。すでに、Y桁はすべてのプレキャスト桁の50%以上を占めるに至っている。

コンクリートは、通常28日立方供試体強度で50 N/mm² (同円柱供試体強度で約80%の40 N/mm²) のものを用い、プレストレス導入時の強度は40 N/mm² を標準としている。最近では28日強度60 N/mm² のコンクリートも使われつつある。また、ストランドには径12.5または15.2 mmの低レラクセーションのものを用い、初期導入力を各々最大123 kN, 174 kNとしている。桁高を抑えたいときなどは、径12.7または15.2 mmのコンパクトストランド^{注)}を使うこともあり、初

注) ストランドを再度加工して断面を小さくしたもので、見かけの強度が増加し、鋼材表面がスムーズになる。

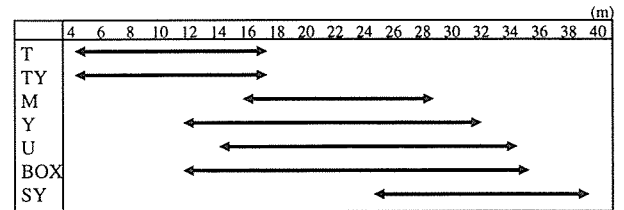


図-5 各桁の利用スパン範囲 (HB 45 載荷)

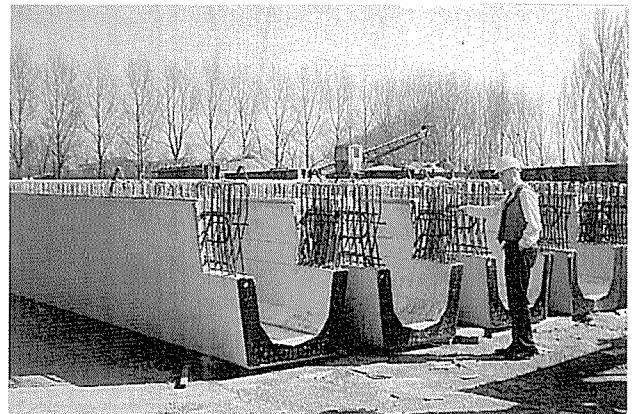


写真-1 U桁の仮置き状況

期導入力は最大156 kNと225 kNである。長い桁では橋軸方向の曲げモーメントの調整をするため、ポリエチレン管などを用いて桁端部の鋼材をbondコントロールするか、図-6のようにPC鋼材をベントアップ配置す

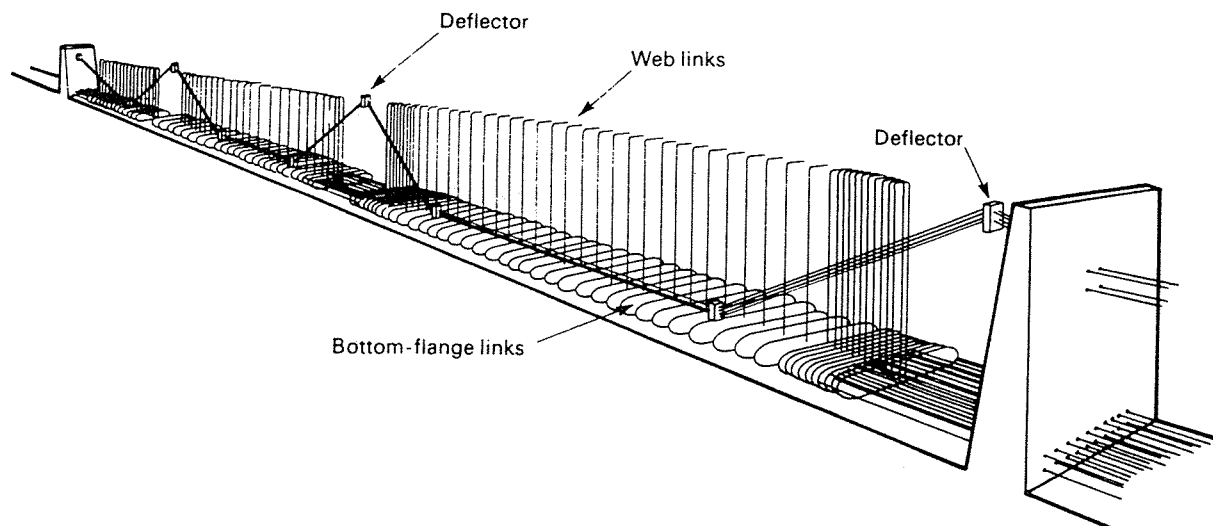


図-6 M桁のスターラップと鋼材のベントアップ配置例²⁾

るなどしている²⁾。スターラップには径 8~16 mm の高強度鉄筋が、50~400 mm 間隔で配置される。かぶりは通常 35 mm である。

クリープ係数やレラクセーション率などの設計常数は、コンクリートの弾性係数など一部を除いて規定されておらず、設計者が自ら算定するか設定しなければならない。

桁間隔は T, TY 桁 (床版橋形式) で 0.5~0.75 m, U 桁で 2 m, SY 桁で 1.4 または 1.6 m, その他は 1 m が標準である。また、斜角は橋台線に対して基本的に 45 度までとしている。

1.2 横 桁

主桁のたわみ差による曲げモーメントを積極的に床版の設計で考慮するなど、設計の考え方の違いから、イギリスでは鋼橋も含めて中小橋梁には、桁端にのみ横桁・横構を設けるのが一般的である。したがってプレテンション桁でも、横桁は各桁端にのみに設けられ、中間支点上の床版にあわせてコンクリート打設される。また、横締めはなく、桁の下フランジ付近に設けられた鉄筋孔を使って鉄筋で補強される。従来、連結部の過密な鉄筋配置を避けるために、横締めされたこともあったが、経済的でないことから現在は採用されていない。横桁は後述のように、連結構造の役割も果たし、その形式、仮ベントを用いるか、床版の施工順序などによって、大きく構造や設計内容が異なってくる。

床版も含めて場所打ちコンクリートには、28 日立方供試体強度 40 N/mm² のものが使われる。また、橋脚と桁を結ぶアンカーバーは設置されない。

T, TY または M 桁を用いて、中空あるいは充実の床版橋形式とする場合には、上述の鉄筋孔が 600~750 mm 程度の間隔で桁全長にわたって設けられ、鉄筋等而下床版または床版下部が主桁と一体化される。また、

BOX 桁を用いる場合には PC 鋼材により横締めされるのが一般的である。

1.3 連続化構造

橋梁ジョイント部からの漏水による構造物の劣化、損傷は、イギリスで最も深刻な問題である。イングランドの高速道路を管轄する交通局では、設計にあたって橋台部も含めた連続化構造、つまりノージョイント化を推奨している。現在用いられている構造形式は以下の 5 種類である (図-7)。

(1) 広い幅の場所打ち連結部による連結

仮ベント上にプレテンション桁を設置し、連結部の配筋、コンクリート打設、床版制作、本支承設置などを行い、仮ベントを撤去して連続化させる工法。連結部の橋軸方向の長さは 5 m 程度、桁とのラップは 1 m 程度で、橋軸方向の連続化では床版鉄筋が引張り部材となる。また、桁からでている鉄筋や PC 鋼材で補強されることもある。連結部の施工性、本支承の数、橋脚を小さくできる、平面・縦断線形の変化に対応できる、排水管を連結部に埋め込めるなどの利点がある反面、仮ベントの設置が必要となる。

イギリスではこの形式が最も一般的で、20 例が報告されている。スパン長は 12~35 m, 斜角は 0~48° で、U または M 桁が用いられている。また、曲線桁の例もある。

(2) 狭い幅の場所打ち連結部による連結

構造は (1) と同じであるが、プレテン桁を最初から橋脚上の本支承に設置する形式。したがって、仮ベントを設ける必要はないが、向かい合う桁と桁の空間が狭く、施工性が悪くなるなど、(1) の利点が失われる。本支承の数を少なくするために、プレテン桁を仮支承に置く場合もある。

イギリスでは 7 例あり、スパン長は 10~20 m, 斜角

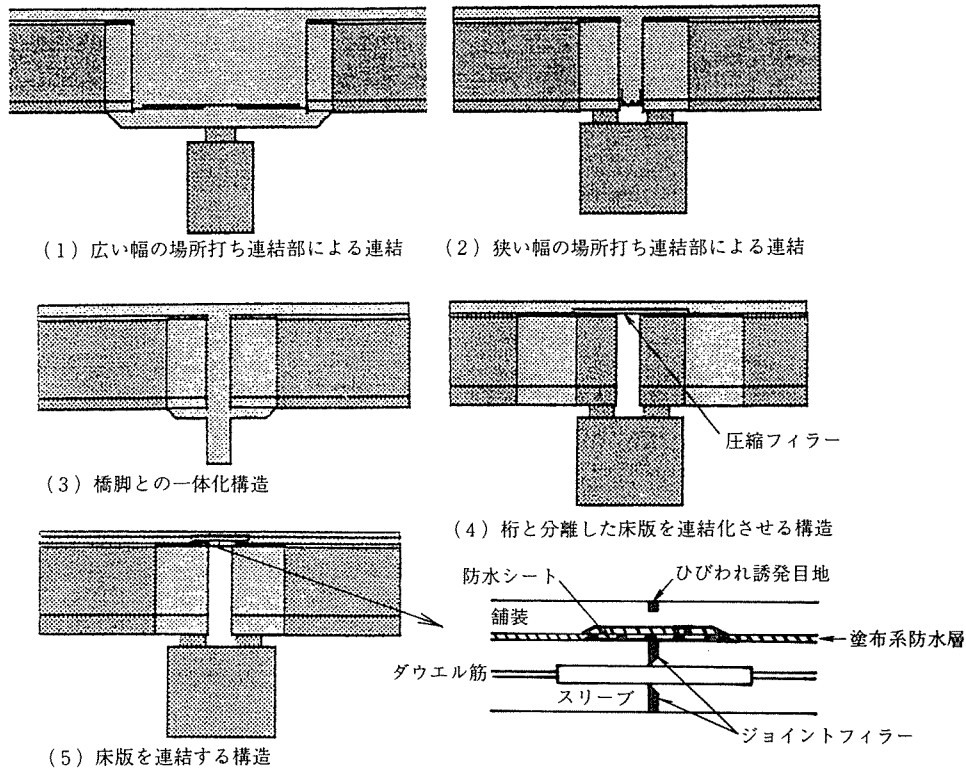


図-7 連続化構造

は30°までで、UまたはM桁が用いられている。曲線桁はない。

(3) 橋脚との一体化構造

橋脚の連結部(柱頭部)を最初にプレテンション桁を設置する薄い部分と、桁の連結部と分けて施工するもので、活荷重やクリープに対してはラーメン構造となる。

イギリスでは4例あり、スパン長は13~31 m、斜角は18°までで、MまたはU桁が用いられている。このうち、1橋は小さい曲線が入っている。

(4) 桁と分離した床版を連続化させる構造

プレテンション桁を各々の支承に設置したあと、床版コンクリートを一括打設して、床版鉄筋も橋脚上で切れ目なく通っている連続構造とする。ただし、単純桁の桁端の回転に追従できるように、桁と床版の間には長さ1.5 mほどの圧縮ファイラーをはさみ、両者を分離させている。横桁はこの圧縮ファイラーの両側に設けられ、これよりスパン中央側の桁と床版は合成構造となる。

詳細は未確認であるが4例ほどがあり、うち2例はスパン長が21 m程度で、ひとつは31°の斜橋である。

(5) 床版を連結する構造

床版鉄筋が連続しておらず、構造的には分離した床版を長さ2~3 mほどのダウエル筋で連結し、埋設ジョイントを併用してジョイント部の伸縮・回転を吸収している。床版が桁の回転に追従できるように、ジョイントを挟んで60 cmほどは、スリーブによりダウエル筋とま

わりのコンクリートの付着を切っている。また、連結部はボルトネック状になるように、ダウエル筋の上下にジョイントファイラーをはさみ、連結部の床版厚を薄くしている。

埋設ジョイントは、床版ジョイント部に防水シート(ゴムアスファルト系)を張り、床版全体に施される塗布系防水層、舗装およびゴムアスファルトでシールされたひびわれ誘発目地で構成される。

イギリスではこの形式が70年代の典型であり、数多く建設された。ただ判明している構造詳細は、スパン長21 m、斜角25°の1橋のみである。

このほか、連結部に橋軸方向のプレストレスを導入して、連続化を図る構造も研究されており、今後は施工例もでてくるものと考えられている。

イングランドの交通局などは、現在(1)または(2)のいわゆる連結連続桁構造を奨励している。この場合、中間支点部は単純な鉄筋コンクリート構造となるため、床版用の鉄筋が橋梁主部材として考慮されなければならない。また、プレテンション桁の端に近い一部は負の曲げモーメントを受け、フルプレレスト構造でありながら、プレテンション桁の上縁応力がコンクリートの引張り応力より大きくなることもある。

1.4 床版

日本のようにいわゆる間詰め床版という構造はない。

床版形式は、図-1のように充実または中空の床版橋形式か、桁橋形式に分類される。床版打設後の荷重に対してはBOX桁を除いて合成構造とし、スターラップ筋をプレテンション桁から突出させて床版と一体化させている。コンクリート強度は28日立方供試体強度で40 N/mm²、鉄筋は径16~25 mmの高強度鉄筋が使用される。鉄筋のかぶり、通常下面が35 mm、上面が30 mmである。

中空床版橋形式と、桁橋形式の床版は高さ160~225 mmで、型枠にはGRPやコンクリート製の永久型枠を用いる。設計にあたっては、スパン中間部に横桁がないため、桁の不等沈下による影響を考慮している。鋼橋の場合は桁の剛性が小さく、床版スパンが大きいため、主桁の不等沈下による曲げモーメントが全体の50%前後になるのが普通であり、格子剛度の高い日本のプレートガーダー橋と大きく異なる。ただし、プレテンション桁の場合はこの影響はかなり小さい。

なお、基本的に床版には塗布系の防水工を施しており、その上に100 mm程度の舗装が敷設されている。

1.5 最近の施工例

スコットランドの首都エジンバラ市のバイパスの一部として、現在スパン35.5 mの高速道路橋が建設中である。主な主桁の緒元を表-1に示す。

桁高2 mのSY6桁は最大のプレテンション桁であり、1径間の単純支持のため桁自体の長さは36.6 mである。53本のPC鋼材のうち10本は桁下から1.2~1.6 mのウェブ内に配置され、また、下フランジ内に配置されたもののうち各々10本は、桁端から0.6 mおよび8.6 mまでの範囲で、コンクリートとの付着が切られている。横桁は桁端部のみで、支承から370 mmの位置に設けられた鉄筋孔を利用した鉄筋コンクリート構造となっている。架設前には、スパンの1/3の位置に各々50 t、計100 tを載荷し、主桁の性能を確認する載荷試験を行っている。

イングランド北部のマンチェスターの近くでは、9径間連続、スパン長27.25 m、橋長243 mのShard New Bridgeが、81本のY桁を用いて1993年に完成してい

表-1 主桁の緒元

スパン長	35.5 m
桁長	36.6 m
斜角	45°
桁種別	SY 6桁
桁高	2 000 mm
コンクリート強度	60 N/mm ²
PC鋼材	コンパクトストランド 53×φ15.2 mm
導入張力	207.5 kN/本
スターラップ	中央：φ12@200 mm 端部：φ12@100 mm



写真-2 SY桁の運搬状況

る。

1.6 長大桁の運搬

上述のような長大スパンにプレテンション桁を採用するには、その運搬に関する法的あるいは安全性などの問題を考慮しなければならない。橋梁の設計上考慮される最大の想定車両(HB45)は、車幅3.5 m、車長30 m、輪荷重112.5 kN、軸重450 kN(4輪)、総重量1800 kN(4軸)(すべて衝撃を含む)である⁴⁾。このほか、道路幅などでもイギリスの道路事情および大型トレーラーのサイズや普及の状況は、日本より数段進んでいると言えるが、40 mクラスの桁の運搬ではさらに特別な配慮が必要となってくる。

従来、イギリスでは35 m程度までのプレキャストブロックの運搬実績があった²⁾。交通局は、長さが29 mまでの車両と運搬物の通行を認めており、プレテンション桁については慣例的に27.5 mまでの運搬には特別な許可を必要としない。これ以上長い桁については、運搬者、交通局および警察の間で調整が必要になる。

1.5で紹介したSY桁には、クレーンで吊り上げるためのフレームが用意されている。運搬時には、これに補強鋼材を取り付け、写真-2に示すように全体としてトラス構造で桁の安定性を確保している。運搬に先立っては、桁または桁を載せたトレーラーを傾斜させて、その安定性を確認している。

2. 連結部の設計

連結部に1.3(1)~(3)の構造を用いると、設計は単純な鉄筋コンクリートの計算をしているものの、施工中と完成後に構造系が変わること、PCとRC構造を併用することなどから、設計上いくつか問題が生じる。筆者らはPCAの会員会社からの委託により、これらに対して検討を行い、いくつかの提言を行っている⁵⁾。中間支点上のクリープによる正の曲げモーメントに対する検討はそのひとつである。

プレキャスト桁に導入されたプレストレスにより、桁は導入直後からクリープによって曲げ上げ変形を進行さ

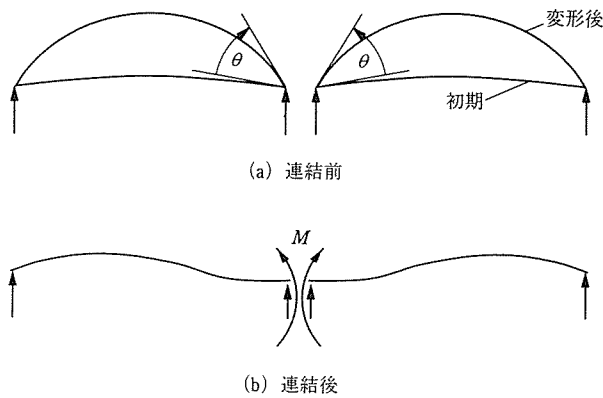


図-8 クリープ変形による曲げモーメント

せる(図-8(a))。このような状態にある2つの桁が、中間支点上で連結されて互いに拘束すると、連結部には次第に正の曲げモーメントが作用し始め、活荷重無載荷の場合には連結部下のひびわれの原因となる(図-8(b))。カナダやアメリカではこれによるひびわれの発生例も報告されており、使用限界状態に対して問題があると言うほどではないにせよ、よく注意すべき事柄としてとらえられている。

Mattock および Clark はこの曲げモーメントが、当初から拘束されていたとした場合の値の $(1-e^{-\phi})$ 倍になるという結論を見いだしている⁶⁾。これは、桁の自重や床版による負の曲げモーメントについても同様であり、最終的な正の曲げモーメントはこれらに一体化構造となってから施される舗装などの死荷重や、床版と桁と

の乾燥収縮差による影響などを加味して算出される。

実際に設計・製作された5種類のY, SY桁について、イギリスの設計基準BS5400⁷⁾により試算にすると、最終の正の曲げモーメント[3])は図-9のようにスパン長、つまり初期の導入プレストレスの大きさにあまり影響なく一定傾向にある。これは、スパン長が長くなるとプレストレスと同様、桁自重によるクリープ変形や舗装、床版等の死荷重による負の曲げモーメントも大きくなり、ちょうど両者が相殺されるためである。したがって、結果的には桁高が小さく連結部構造の断面積の小さい小スパンのものに、より多くの鉄筋が必要となり、Y6より小さい桁では最小鉄筋量以上が必要となる。ただし、クリープ係数の算出次第では、曲げモーメントは図-9の最小値の値[4])まで減少する。また、仮ベントの使用いかんなど施工手順も大きく影響するため、実際の設計にあたっては注意を要する。

3. プレテンション桁橋梁の損傷の概要

グラウト不良による鋼材腐食の問題から、イングランドでポストテンション桁が禁止されているのはよく知られている。しかし、プレテンション桁を用いた橋梁では、凍結防止剤を含んだ漏水による橋梁ジョイントとその下の橋脚の損傷を除いて、大きな構造的問題はないといえる。

桁自体は車両の衝突による損傷が深刻ではあるが、設計ミス、施工不良等も含めて、耐久性、耐荷性など構造的な損傷の例はほとんどない。また、間詰め床版形式がないこと、通常防水工が施工されること、舗装厚が大きいことなどから、床版における漏水・遊離石灰などもほとんどなく、凍結防止剤をよく使う割りには上部構造は極めて健全なようである。車両重量や軸重などの制限が、日本に比べるとかなりよく守られているのも大きな要因といえる。

したがって、問題は橋梁ジョイント付近に絞られ、これらに対する設計上の対処として、先に挙げた連続化構造の採用やかぶりを大きくするなどが考えられてきた。先に挙げた連続化構造のタイプ(1)~(5)をそれぞれ2橋から7橋、合計20橋調査した結果⁸⁾では、桁端のジョイント部での漏水が9橋で見つかったが、中間支点部での漏水は全くなかった。タイプ(1)~(3)の端横桁では、2~3橋で上下面それぞれに微細なひびわれが見られたが、全体の評価はすべて健全であった。ただし、最も古い桁でも供用後27年であるので、今後の損傷の進展を見る必要があるとしている。

維持管理は主に損傷の多い橋脚に対して行われており、日本と同様なひびわれ注入、コンクリートの打換えなど耐久性の改善を目的とした補修が行われている。た

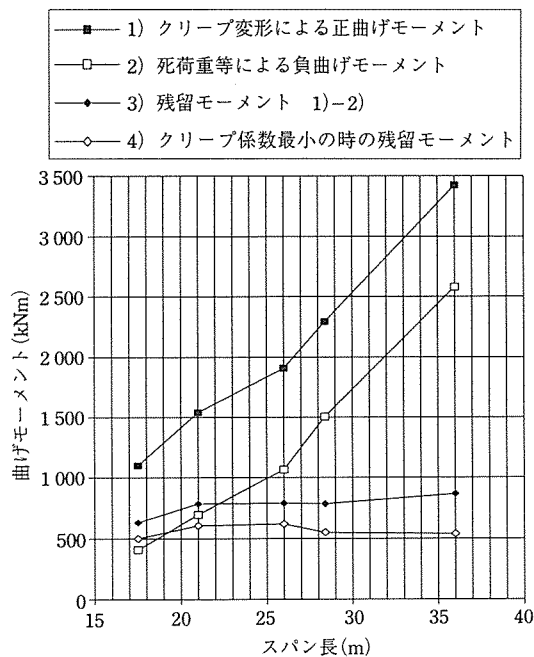


図-9 プレストレスによるクリープ変形にともなう連結部の正曲げモーメント

だし、高速道路を中心に電気防食の施工例の多いこと、コンクリート塗装があまり使われていないことなどは違いといえる。電気防食の人気や防水工の原則使用は、イギリスの腐食問題が海浜部云々というより、凍結防止剤の使用に技術者が危機感を持っていることをあらわれである。

また、外ケーブルや鋼板接着による補強は、工法としては確立されているが施工例は少ないようである。

あとがき

イギリスはイングランド、スコットランド、ウェールズ、北アイルランドの連合王国である。文中のイングランドの交通局とは日本の建設省や運輸省にあたり、イギリスの道路行政の中心ではあるが、基準などが他の3国とすべて統一されているわけではないので注意していただきたい。たとえば、北アイルランドは独自の設計基準を持っているし、スコットランドでは禁止令後もポストテンション桁の建設例がある。

プレテンション桁の概要については、なるべく日本と比較することなく述べている。読者諸兄なりに比較し、長所・短所を見ていただければ幸いである。損傷については、ごく簡単な記述にとどめており、日本との比較も詳細な調査をしたわけではなく、日本では地域でかなりの違いがあるため、筆者らの印象という程度にとどめるべきかもしれない。また、アルカリ骨材反応による主に下部工の損傷については、特殊な問題であるのでここではあえて記述していない。上部工の耐久性に大きく影響する防水工、舗装とその打換えの方法、および交通荷重の実態などについては、別の紙面で報告したいと考えている。

最後に、情報提供などご協力いただいた Tarmac 社の H. Taylor 氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Taylor H.P.J., Clark L.A., Banks C.C. : The Y-beam : a replacement for the M-beam in beam and slab bridge decks, Structural Engineer, Vol. 68, No. 23, pp. 459-465, 1990.12
- 2) Kumar A. : Composite concrete bridge superstructures, British Cement Association, 1988
- 3) Pritchard B.P., Smith A.J. : Investigation of methods of achieving continuity in composite concrete bridge decks, TRRL Contractor Report 247, 1991
- 4) British Standards Institution : BS 5400 : Part 2, Steel, concrete and composite bridges. Part 2. Specification for loads, 1978
- 5) Clark L.A., Sugie I. : Serviceability limit state aspects of continuous bridges using precast concrete beams, Structural Engineer, 1996 (投稿中)
- 6) Clark L.A. 著, 関西道路研究会 コンクリート橋専門委員会 訳 : 新しい英国規準 BS 5400 によるコンクリート橋の設計, 国民科学社, 1984.6
- 7) British Standards Institution : BS 5400 : Part 4. Steel, concrete and composite bridges. Part 4. Code of practice for design of concrete bridge, 1990
- 8) Pritchard B.P., Smith A.J. : A survey of composite concrete bridge decks made continuous, TRRL Contractor Report 294, 1991

【1996年5月10日受付】