

プレキャストPC合成桁橋の1/2模型試験による 橋梁の耐荷力評価

中村 武夫*

1. はじめに

近年英国においては、貨物自動車の大型化および交通量の増大に伴い自動車荷重が著しく増大してきている。そこで、英国交通省 (Department of Transport, 以下 DTp) では、その研究機関である交通道路研究所 (Transport and Road Research Laboratory, 以下 TRRL) で行われた自動車荷重の実態調査を基に、BS 5400 Part 2とは別に独自の橋梁設計基準による活荷重の見直しを行っている¹⁾。このような自動車荷重の増大に伴い、設計基準が整備される以前に建設された橋梁は勿論のこと、それ以降の橋梁についてもその耐荷力の評価が大きな問題となってきている。

現在 DTp においては、現行の BS 5400 を基本とした橋梁の耐荷力評価手法²⁾があるが、それによると耐荷力を過小評価する傾向にある。そこで DTp において橋梁の耐荷力手法の改善を図るべく、主として TRRL において実橋および2分の1模型の載荷試験 (破壊試験) を行いデータの収集を行うとともに、その評価手法の確立を図っているところである。

本文は、それを受けて1987年にTRRLにおいて行われた、高速道路のオーバブリッジを想定したプレキャストPC合成桁の2分の1模型の載荷試験結果と、それを踏まえて行われた耐荷力評価 (線形解析および非線形有限要素解析) の結果の一部について紹介するものである。

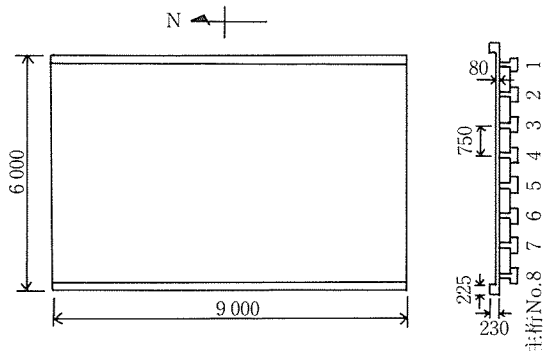
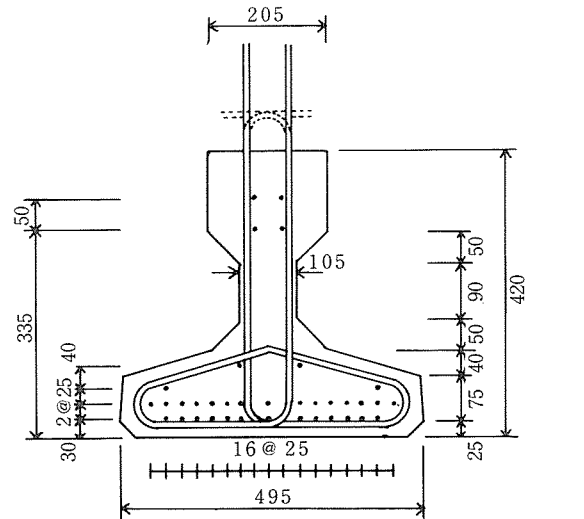


図-1 試験体形状

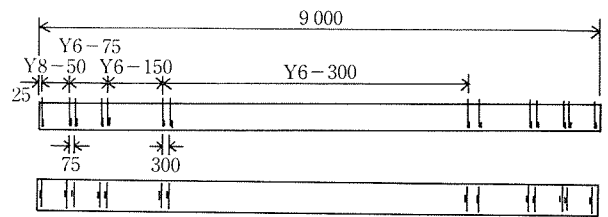
2. 2分の1模型試験

2.1 試験体および試験方法

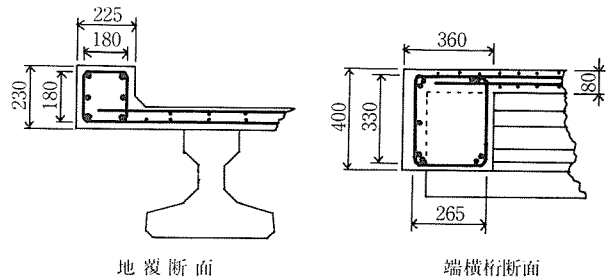
試験体の形状寸法および主桁の構造詳細を図-1 および図-2 に示す。試験体は BS 5400 PART 2 および



主桁断面 (1)



主桁断面 (2)



地覆断面

端横桁断面

図-2 試験体構造詳細

* Takeo NAKAMURA : 日本道路公団東京第二建設局構造技術課

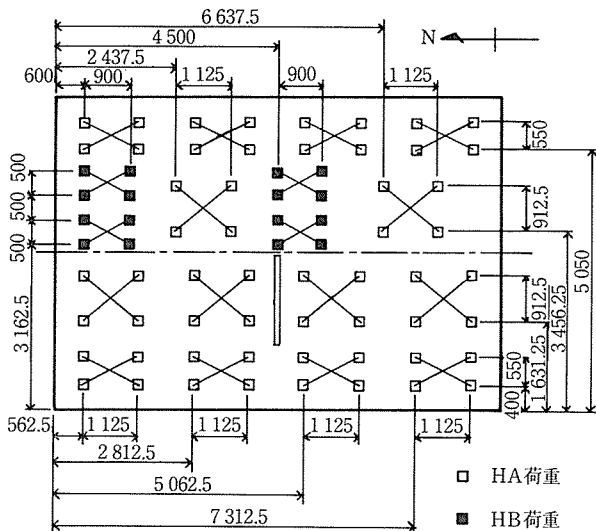


図-3 荷重載荷位置

PART 4 により設計されている^{3)~5)}。

荷重の載荷方法は HA 荷重（我が国の道路橋示方書における L 荷重に相当）および HB 荷重（特殊車両荷重）を終局限界状態で規定されている荷重強度まで上げ、その後は HB 荷重のみを破壊に至るまで増加させ、変位制御とした。荷重の載荷位置を図-3 に示す。

2.2 荷重試験結果

図-4 に主桁 No. 3 のスパン中央におけるたわみと荷重係数の関係を示す。ここで言う荷重係数とは、HB 荷重の終局限界状態における荷重強度に対する比率である。表-1 に破壊に至るまでの各荷重レベルでの試験体の状態を示す。

破壊形態としては主桁 No. 3 および No. 4 のせん断破壊であるが、本実験における特徴的な現象は、荷重係数 1.6 近傍で発生した主桁 No. 2 および No. 5 のウェブ外面（HB 荷重載荷位置から見て）の水平方向ひびわれである。これは HB 荷重による載荷点直下（主桁 No. 3 および No. 4）のたわみおよび両端桁と下フランジによる主桁 No. 2 と No. 5 のねじり変形に対する拘束効

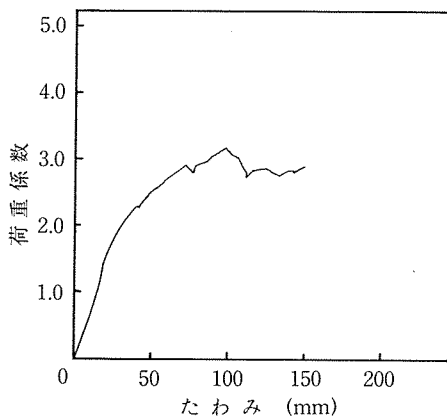


図-4 荷重～変位曲線

表-1 荷重試験結果

荷重係数	主桁の破壊状況
1.0	主桁 No. 3 両側の床版下面にひびわれ発生
1.3	主桁 No. 3 および No. 4 スパン中央付近の下フランジに曲げひびわれ発生
1.6	主桁 No. 2 および No. 5 のウェブ外側に全長にわたり水平方向（橋軸方向）のひびわれ発生
1.6~2.9	a) 主桁 No. 2 および No. 5 に曲げひびわれの発生および進行 b) 主桁 No. 3 および No. 4 の曲げひびわれの進行 c) 主桁 No. 3 および No. 4 の中央部 HB 荷重載荷位置の南側にせん断ひびわれの発生および進行
2.9~2.8	a) 主桁 No. 3 のスターラップ一部破断 b) 主桁 No. 2 および No. 5 の面外曲げ圧縮側ウェブコンクリートの圧壊
3.17	最大荷重
3.17~2.8	a) 主桁 No. 3 および No. 4 のスターラップ破断進行 b) 主桁 No. 2 と No. 3, No. 4 と No. 5 の間の両端横桁に多大なねじりひびわれを確認
2.89	破壊（以下の過程によると推測） a) 主桁 No. 3 および No. 4 のせん断ひびわれによるウェブの破壊 b) 主桁 No. 3 および No. 4 中央 HB 荷重南側 2 m の範囲のスターラップの破断により主桁の上下フランジが分離 c) 主桁 No. 5 沿いの床版のせん断 c) 中央 HB 荷重載荷位置における床版の押しぬきせん断
試験終了後、主桁 No. 2 および No. 5 の下フランジ両端部付近に多大なねじりひびわれを確認	

果の影響により、主桁 No.2 および No. 5 に面外曲げが働いた結果である。このひびわれにより、主桁 No. 2 および No. 5 の剛性が著しく低下した結果、隣接する HB 荷重直下の主桁 No. 3 および No. 4 に力が集中し、最終的な破壊に至ったものと考えられる。

3. 線形解析

線形解析においては、当該形式の橋梁の構造解析に最も一般的に用いられる格子計算によって断面力を算出している。この断面力を基に BS 5400 PART 4 に示されている計算方法により、曲げ、せん断等の各ケースについて、その耐荷力を計算している。また、材料強度について BS 5400 に規定されている強度と実測値、材料係数の有無についてもそれぞれ検討している。

3.1 解析結果

解析結果を表-2 に示す。BS 5400 の強度を使用したもの、および材料係数を考慮したものについては、その耐荷力は各ケースとも試験結果を下回っている。これは、BS 5400 で規定されている材料強度が低めに抑えられていることと、材料係数を導入することによってやはり材料強度が低く評価されるためである。

実験値を基にした材料強度を使用したものについても、大部分のケースにおいて荷重試験における最終耐荷力（荷重係数 3.17）を下回っている。唯一曲げ破壊につ

表-2 解析結果

破壊形態	BS 5400 による材料強度		実験による材料強度		
	材料係数	有	無	有	無
主桁曲げ	1.76	2.65	2.55	3.51	
V_{cr} -北側支点付近	1.6	2.1	1.6	2.1	
V_{cr} -支間 1/3 点付近	2.0	2.7	2.1	2.8	
V_{cr} -支間 1/3 点付近	2.2	3.0	2.3	3.0	
主桁ねじり	—	—	0.40	2.07	
端横桁ねじり	—	—	0.80	1.56	
主桁ウェブ圧壊	1.12	1.47	1.19	1.56	
床版曲げ	0.99	1.18	1.18	1.76	
主桁と床版結合部せん断	0.84	1.57	0.97	1.70	
ねじり・せん断相互作用 主桁 No. 3 南端部付近	0.95	1.26	1.02	1.35	
主桁 No. 4 南端部付近	2.01	2.59	2.13	2.74	

V_{cr} : 曲げひびわれの無い状態でのせん断耐力

V_{cr} : 曲げひびわれ存在下におけるせん断耐力

いて 3.51 という結果が出ているが、載荷試験においては、下フランジにひびわれの発生が見られただけで、曲げに関しては特に破壊に結びつくような挙動は観察されなかった。ねじり、ウェブ圧壊、主桁と床版の結合面のせん断破壊等については、破壊荷重係数が 2.0 以下という小さな値となっているが、載荷試験ではこれらの破壊モードは観察されなかった。しかし、実際の破壊モードであるせん断破壊については、主桁 No. 3, No. 4 の南側 3 分の 1 点付近における V_{cr} が、3.0 という破壊荷重を示しており、載荷試験の結果とよく一致している。

4. 非線形有限要素解析 (板-梁要素解析)

本解析には TRRL で開発された構造物用有限要素法プログラム NFES を使用した。当該プログラムにおいては、材料非線形性は、コンクリートと鋼材の応力～ひずみ曲線によって表現される。コンクリートのひびわれについては、板要素内の主応力が各荷重段階における主引張応力がコンクリートのひびわれ発生応力に達したときにその直角方向に発生するとした (主応力方向と主ひずみ方向が一致している) ものである。したがって、各荷重段階においてひびわれ方向が変化するという非現実的な面はあるが、ひびわれ方向を固定したモデルにおいては、初期の載荷ステップがひびわれ方向に大きく影響し、かつ全体の剛性も高めに評価してしまう場合があるために当該モデルが採用されている⁶⁾。コンクリートの圧壊についても同様の考え方である。

4.1 解析モデル

図-5 に板-梁要素解析における解析モデルを示す。試験体の床版については 8 節点 4 角形の板要素、主桁は 3 節点の梁要素でモデル化されている。板要素は面内および面外方向の剛性を有し、折板理論を導入することにより隅角部節点においては 6 自由度、中間節点においては 5 自由度を有するものである。梁要素については、主

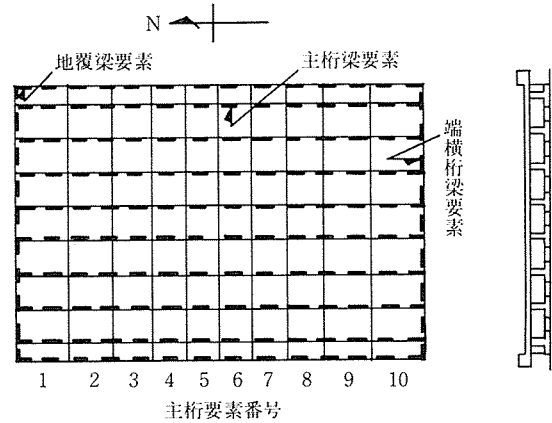


図-5 解析モデル

桁鉛直方向の平面保持を仮定することによって、新たな変数を導入することなく板要素に連結されている。

床版の主鉄筋および配力鉄筋は板要素内に 4 つの層として考慮されている。主桁のコンクリートは 5 分割、PC 鋼材は 3 分割されて各々梁要素として取り扱われている。また、主桁のせん断補強筋については、これらを考慮した主桁のせん断およびねじり剛性のみを有する梁要素を採用することにより、その効果を反映させている (次節参照)。両端横桁および地覆についても同様に梁要素でモデル化されている。

4.2 材料特性

図-6～図-8 に解析で用いたコンクリート・鉄筋・PC 鋼材の応力～ひずみ曲線を示す。これらの値は実験値を基に設定している。図-9 および図-10 にねじりおよび

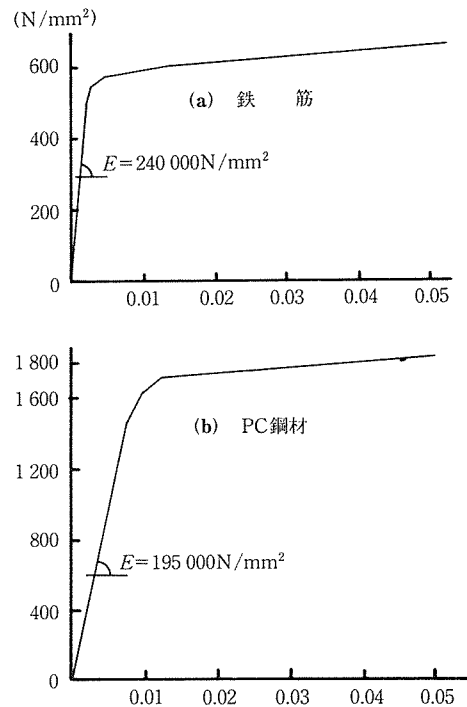


図-6 鋼材 応力～ひずみ曲線

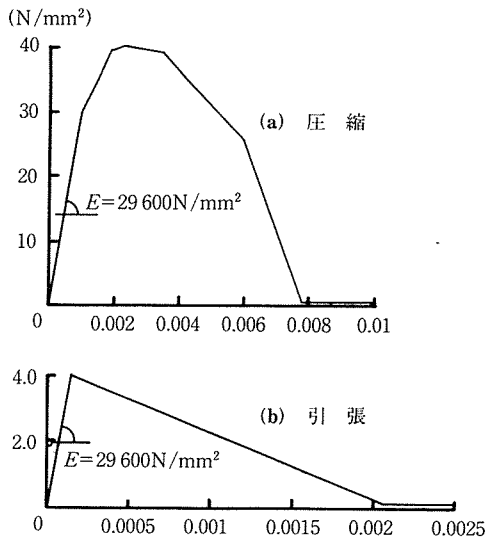


図-7 床版コンクリート 応力～ひずみ曲線

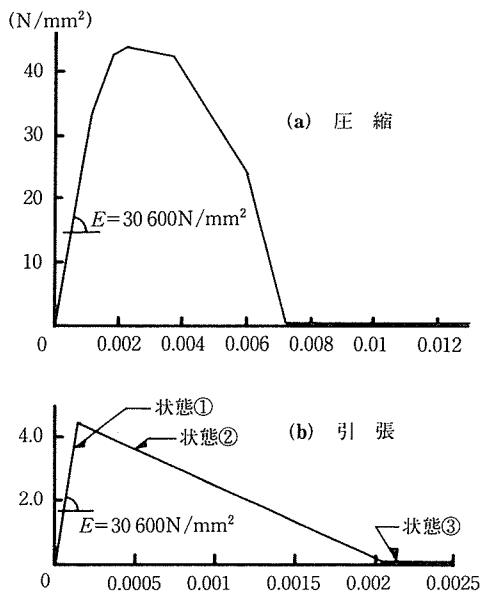


図-8 主桁コンクリート 応力～ひずみ曲線

せん断に関する応力～ひずみ曲線を示す。これらは、主桁のせん断補強筋がせん断およびねじりに対してそれぞれ独立に抵抗するという仮定の基に BS 5400 より求められたものであるが、数値計算上の問題により、せん断、ねじり（破線で示す）共に完全弾塑性体と仮定した。また、抵抗断面としては、ねじりについては主桁の全断面、せん断についてはウェブ部分のみとしている。この際、安全係数等はすべて 1.0 としている。

4.3 プレストレッシングおよび載荷方法

荷重の載荷は、試験体作成工程も考慮して 4 段階に分けて行った。第 1 段階はプレストレスおよび主桁自重、第 2 段階は床版打設荷重、第 3 段階は終局限界状態に至るまでの HA および HB 荷重増分、第 4 段階は HB 荷重増分を順次載荷した。ここで第 3 段階開始時には、床

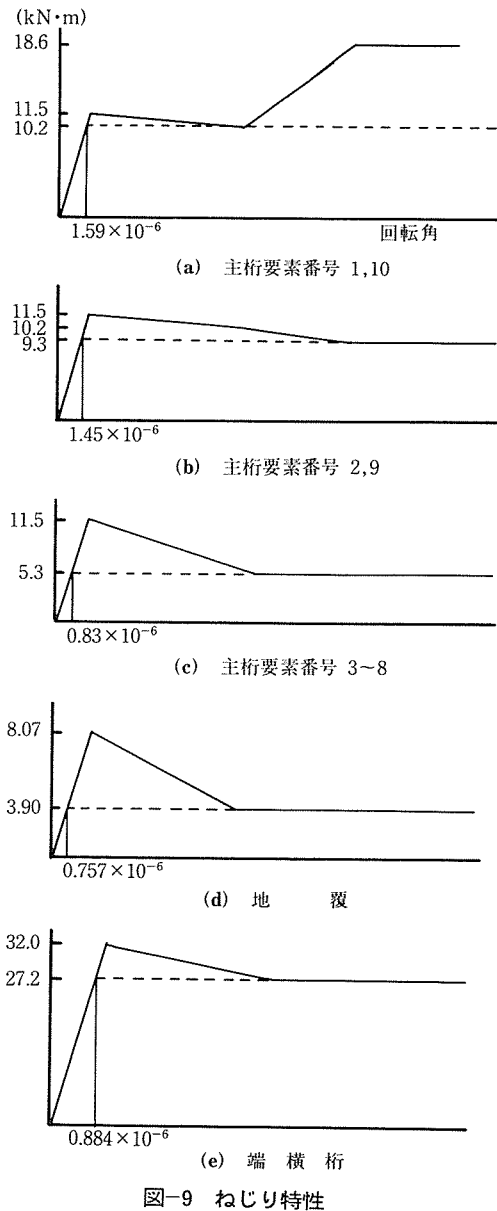


図-9 ねじり特性

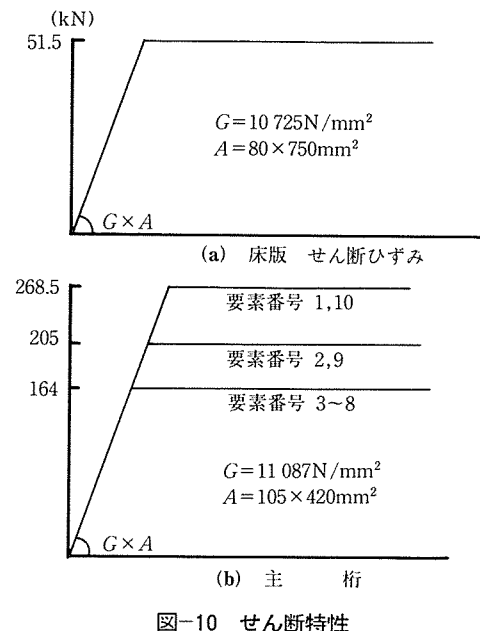


図-10 せん断特性

◇論文報告◇

版は無応力状態となっている。活荷重等は、試験においてはジャッキにより多数の集中荷重として載荷されるが(図-3 参照)、解析上は各載荷点の荷重を各節点に分配して載荷している。

4.4 解析結果

図-11 に主桁 No. 3 の荷重～変位曲線を、表-3 に解析上の試験体の状態を示す。ここで、解析上は計算不能となった時点をもって破壊時とみなしている。また、図に示すように主桁のねじり・せん断特性の影響に着目し、その特性を種々変化させたパラメトリックスタディーを行っているが、ここでは非線形ねじり・せん断解析結果(図中④)のみについて述べる。荷重係数 2.3 付近までは実験結果と解析結果はよく一致している。それ以降は、解析上剛性をかなり低めに評価しているが、最終耐荷力は 9% 程度の誤差に収まっている。この高荷重係数域における剛性の低下は、表-3 に示すように、実験結果に比べてかなり低い荷重係数で発生している主桁および両端横桁のねじりひびわれの影響であると考えられる。せん断破壊は荷重係数 2.0 以降で主桁 No. 3 に生じており、実験結果とよく一致している。図-12

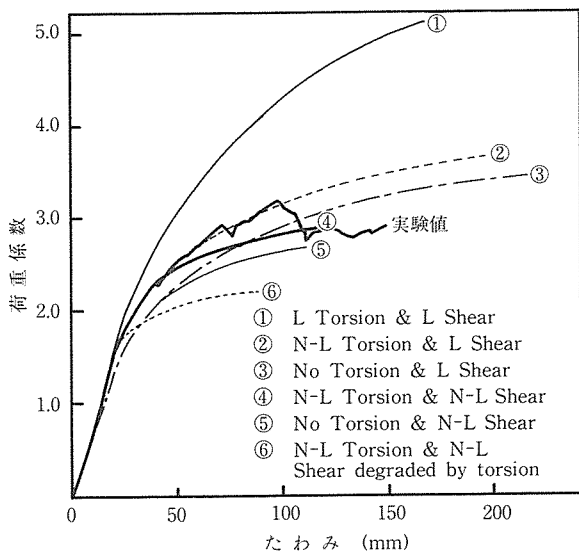


図-11 荷重～変位曲線

表-3 解析結果

荷重係数	主桁の破壊状況
0.75	主桁 No. 3 両側の床版下面にひびわれ発生
0.9~1.3	a) 主桁 No. 1 と No. 2 の間の北側端横桁にねじりひびわれ発生 b) 主桁 No. 1, No. 2 および No. 5 の南端付近にねじりひびわれ発生
1.4	主桁 No. 3 のスパン中央付近に曲げひびわれ発生
2.0	最大せん断力
2.2~2.8	主桁 No. 3 南側 HB 荷重直下におけるせん断ひびわれの発生および進行
2.89	最大荷重

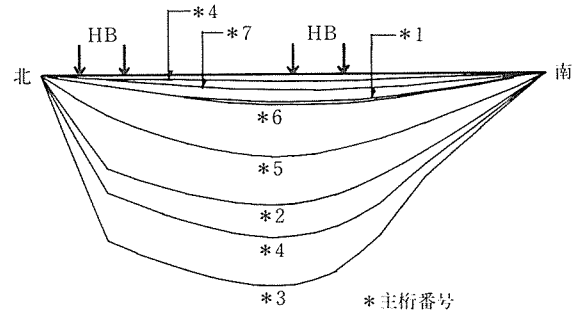


図-12 主桁～たわみ曲線

には荷重係数 2.87 における各主桁のたわみの解析結果を示しているが、主桁 No. 3, No. 4 の北側 HB 荷重下において大きなせん断変形が生じているのが確認される。また、解析上ねじり変形は主桁 No. 2, No. 4, No. 5 の北側端部付近が最も大きくなっている。

5. 非線形有限要素解析(折板モデル解析)

3. 線形解析の項で述べた板-梁要素解析においては、構造物の挙動および最終耐荷力は、ある程度の精度をもって推定できた。しかし、今回の載荷試験において最も特徴的な挙動である主桁 No. 2 および No. 5 の面外曲げ破壊については、板-梁要素解析におけるモデルでは再現不可能である。そこで、次に主桁についても板要素でモデル化することによって、この面外曲げ作用を再現することを試みた。

当該解析においては、梁-板要素解析と解析モデルに相違があるのみで、使用プログラム・コンクリートの構成則・材料特性・載荷方法については同様である。ただし、使用プログラムの問題上、当該モデルでの板要素の面外方向せん断特性については、線形としてしか取り扱えなかった。

5.1 解析モデル

図-13 に折板モデル解析における解析モデルを示す。ここでは、主桁の上フランジおよびウェブを板要素で、下フランジおよび下フランジ内の PC 鋼材を梁要素でモデル化しており、他は板-梁要素解析と同様である。

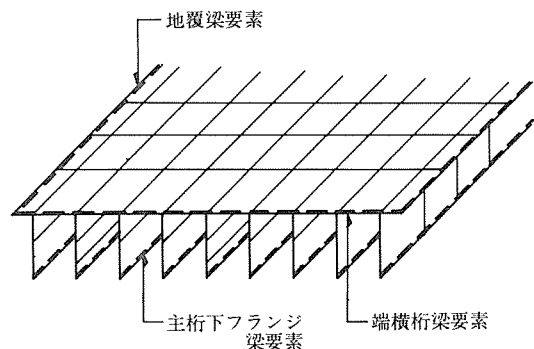


図-13 解析モデル

5.2 解析結果

図-14 に主桁 No. 3 の荷重～変位曲線、表-4 に解析上の試験体の状態を示す。

表-4 に示すように、実験で観察された現象をほぼ再現できてはいるが、図-14 から明らかなように全体の剛性をかなり高めに評価してしまっているため、計算は途中で打ち切られている。これは、先にも述べたように、板要素における面外方向せん断特性を線形として取り扱っているため、主桁 No. 2 および No. 5 の全体のねじりおよび面外曲げ剛性、床版のせん断剛性を高めに評価しているためと考えられる。また、図-15 に HB 荷重直下のスターラップの応力の一例を示すが、これから判断できるように、コンクリートの引張軟化領域における応力～ひずみ曲線の勾配が数値解析上の都合により緩やかに設定されているため、コンクリートにひびわれが生じた後も鉄筋への応力の移行が緩慢にしか行われないことも原因の一つと考えられる。

今回着目している主桁 No. 2 および No. 5 におけるウェブの水平方向ひびわれは、実験結果を大幅に上回る

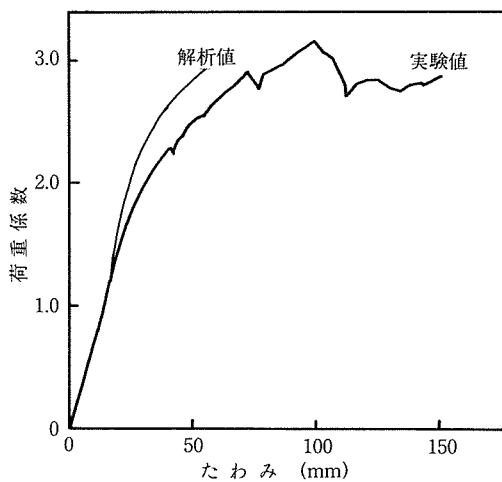


図-14 荷重～変位曲線

表-4 解析結果

荷重係数	主桁の破壊状況
1.0	主桁 No. 3 両側の床版下面にひびわれ発生
1.6～1.9	a) 主桁 No. 3 および No. 4 スパン中央付近の下フランジに曲げひびわれ発生 b) 主桁 No. 2 および No. 5 下フランジの両端桁付近にねじりひびわれ発生 c) 主桁 No. 2, No. 4 および No. 5 の両端桁付近にせん断ひびわれ発生
1.9～2.2	a) 主桁 No. 2 および No. 5 下フランジのねじりひびわれ進行 b) 主桁 No. 2, No. 3, No. 4 および No. 5 のせん断ひびわれ進行
2.2～2.5	a) 主桁 No. 2 のウェブに水平方向ひびわれ発生 b) 主桁 No. 2 および No. 5 付近の両端桁にねじりひびわれ発生 c) 主桁 No. 5 のウェブに水平方向ひびわれ発生

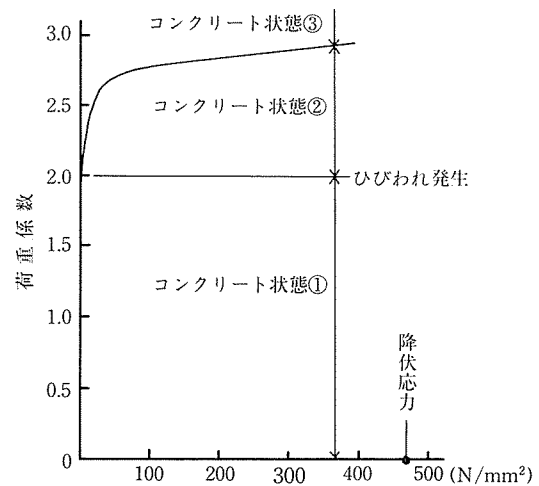


図-15 スターラップ応力

荷重係数 (2.2～2.5) で発生している。これは、上述したように床版のせん断剛性が高くなっているために主桁 No. 3・No. 4 と No. 2・No. 5 との間の相対変位が小さくなったためと、実験でかなり高い荷重係数で発生している主桁下フランジのねじりひびわれが早期 (荷重係数 1.3) に発生してしまったために主桁の面外方向の拘束力が減少し、水平方向ひびわれを発生させるのに十分な面外曲げが生じるのに時間がかかったためである。これは別途行った主桁下フランジのねじり特性を線形とした解析において、水平方向ひびわれがより低い荷重係数 2.0 で発生していることから推測できる。

6. まとめ

格子計算による線形解析における曲げひびわれ発生後のせん断耐力 V_{cr} は、破壊形態、耐力とも試験結果とよく一致している。しかし、想定される破壊形態によっては BS 5400 による計算手法がかなり安全側となっており、その耐力を大幅に過小評価する結果となる。当該形式の橋梁の場合、最終的にせん断破壊することが明らかとなり、耐力評価の結果も良好であった。しかし、橋梁の破壊形態は、形式はもちろんのこと、当初設計における各断面の余裕量によっても異なってくると考えられるため、その最終破壊形態の推定が重要となってくる。

非線形有限要素解析については、それをを用いることによって、当該形式の橋梁の場合、耐力のみならず破壊に至るまでの挙動を推定することの可能性が示された。ここで重要なのは、部材のねじり特性を適切に設定することと、コンクリートの軟化領域における数値計算上の問題を克服することであり、この点を解決すれば、橋梁の耐力のみならず破壊に至るまでの挙動や破壊形態についても良い精度で推定できるものと思われる。

現在 TRRL において引き続きこれらの問題に関する

◇論文報告◇

解析検討が行われている。また同時に鋼合成桁橋の2分の1模型載荷試験結果に関する解析も行われており、その結果が待ち望まれる。

参 考 文 献

- 1) THE DEPARTMENT OF TRANSPORT. Department of Transport Highways and Traffic : Departmental Standard BD 37/88; Loads for Highway Bridges. The Department of Transport, London, U.K.
- 2) THE DEPARTMENT OF TRANSPORT. Department of Transport Roads and Local Transport Directorate : Departmental Standard BD 21/84; The Assessment of Highway Bridges and Structures. The Department of Transport, London, U.K.
- 3) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Part 2 : 1978; steel, concrete and composite bridges. Specification for loads. British Standard BS 5400. British Standards Institution, London, U.K.
- 4) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Part 4 : 1984; steel, concrete and composite bridges. Code of Practice for Design of Concrete Bridges. British Standard BS 5400. British Standards Institution, London, U.K.
- 5) HAMBLY, EC (1986). Design and calculations for single-span half-scale model bridge to BS 5400. Department of Transport TRRL Report CR 25. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- 6) CRISFIELD, MA and WILLS, J (1989). Analysis of R/C Panels Using Different Concrete Models. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115 No. 3, March, 1989. ASCE.

【1991年6月26日受付】

◀刊行物案内▶

Prestressed Concrete in JAPAN

—1990—

(FIP Hamburg, 1990)

[日本のプレストレストコンクリート (1990年 FIP ハンブルグ大会)]

<英・和文併記>

本書は、1990年のFIPハンブルグ大会に提供するために本協会において編纂・発行したもので、最近の日本の代表的なPC構造物28件についての設計・施工概要を英文・和文併記の形で、報告しています。写真・図も豊富で、海外において好評を博しました。

体 裁 : A4判140頁

定 価 : 3000円 (送料 : 350円)

内 容 : 鉄筋コンクリート固定アーチ—別府明礬橋—バイプレ工法による中央公園橋—PCラーメン橋—東名阪高架橋—本州四国連絡橋 児島・坂出ルート—PC橋梁群—PC・V脚ラーメン橋—常磐自動車道 十王川橋—CLCA工法により施工されたコンクリートアーチ橋—城址橋—PCケーブルを用いた曲線桁の片持ち張出し工法—万江川橋 (下り線)—逆ランガーコンクリートアーチ橋—中谷川橋—PC斜張橋—新綾部大橋—PC5径間連続ラーメン箱桁橋—岡谷高架橋—複線3主PC下路式鉄道橋—大北川橋梁—北陸自動車道“親不知海岸高架橋”の施工—新素材によるPC橋—新宮橋—人工軽量骨材コンクリートを使用した鉄道橋—汐見川橋—PC斜張橋における新しい片持ち張出し工法—衝原大橋—架設アウトケーブルを用いた不等径間Tラーメン橋—筒石川橋 (上部工)—大型移動吊り支保工により施工した都市内PC高架線—PC斜張橋—呼子大橋—FC合成床工法による人工地盤—プレキャストPC高層建物—日立物流ハイテクセンター—出雲大社神楽殿—LNG地上式タンク用PC製防液堤—横浜市におけるPC卵形消化タンク—PCタンク—大名調整池—PCプレキャスト版による供用中の滑走路の改修舗装工事—横浜博覧会「海のパビリオン」—H.M.S. (多角形浮体構造物)—PCスノーシェルター—正善寺シェルター—プレストレストコンクリート構造ウエーブジェット