

(69) 外ケーブルによる補強効果に対する測定と解析

福島県北建設事務所 道路課 折笠 晴海
 福島県北建設事務所 道路課 齊藤 雄一
 ドーピー建設工業(株) 東北支店 正会員 佐々木 徹
 ドーピー建設工業(株) 設計部 正会員 ○徳丸 晋

1. はじめに

近年、B活荷重への移行のため既設橋梁が耐力不足となり外ケーブルによる補強工法を採用するケースが増えている。しかしながら、外ケーブルによって主桁に導入されるプレストレスの算定にはいまだ不明な点があり、各種の測定および解析を行う事となった。そこで、実橋(日の倉橋)での外ケーブルによる補強の測定とトラック載荷試験、さらにこれらについての解析を行った。今回使用した解析方法は格子計算による内力法、立体骨組みによる部材評価法、薄肉シェル要素による有限要素法解析である。さらに、これらの解析と計測値との比較検討を行った。

2. 実橋載荷試験

日の倉橋は昭和44年に建設された5径間単純ポストテンション方式T桁橋である。外ケーブルによる補強後の断面図、側面図を図-1、図-2に示す。また、設計条件を表-1に材料強度と許容応力度を表-2に示す。また、測定時には橋面工は撤去された状態で主桁、横桁、床版のみの状態であった。

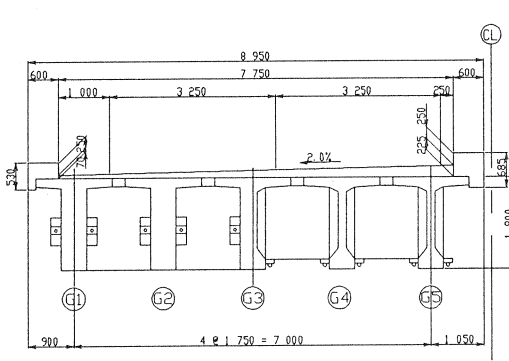


図-1 断面図

表-1 設計条件

橋梁形式	プレストレストコンクリート 道路橋
構造形式	5径間単純ポストテンション 単純T桁橋
活荷重	B活荷重
雪荷重	100kgf/cm ²
橋長	170.300m
桁長	34.000m
支間	33.200m
幅員	0.600+7.750+ 0.600m
斜角	右 77° 00' 00"

表-2 材料強度と許容応力度

コンクリート		
設計基準 強度	主桁	400kgf/cm ²
	場所打	300kgf/cm ²
弾性係数	主桁	3.1×10^5 kgf/cm ²
	場所打	2.8×10^5 kgf/cm ²
P C鋼材(外ケーブル:F100T)		
引張強度		183kgf/mm ²
降伏点応力度		160kgf/mm ²
許容 引張 応力度	設計時	110kgf/mm ²
	導入直後	128kgf/mm ²
	導入時	144kgf/mm ²
リラクゼーション率		5%
弾性係数		2.1×10^6 kgf/cm ²
断面積		519mm ²

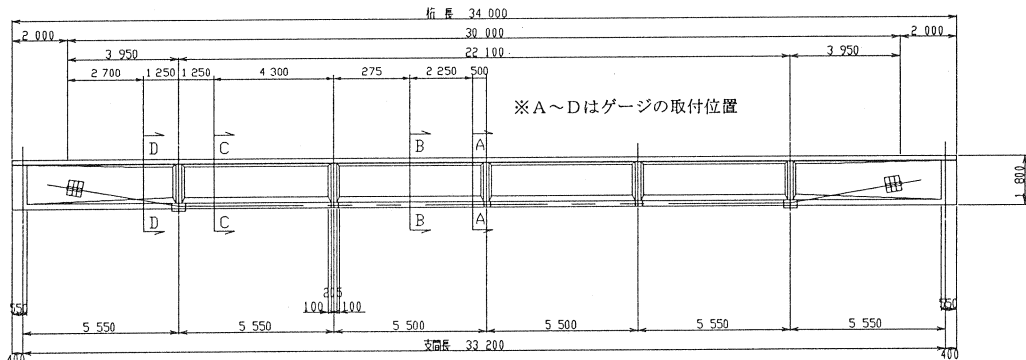


図-2 側面図

1) 測定概要

トラックによる載荷試験と緊張時の変化について主要点のひずみとたわみを計測した。載荷試験は20tトラックを最大4台載荷することにより行った。この載荷試験は想定した荷重が桁に与える影響を確認するために行うもので、B活荷重による最大荷重を載荷するのが目的ではない。なお、荷重分配の程度等についても検討するため、トラック1～4台の偏載荷のケースを設定した。

また、外ケーブル緊張時に関してはケーブル緊張毎に計測を行った。

試験計測は以下の項目について行った。

①ひずみの計測

ひずみゲージ位置は図-2に示すように橋軸方向の4箇所（A～D）について、それぞれ耳桁、中央の桁には図-3に示すように上縁から下縁まで10点、それ以外の桁は下縁の2点にひずみゲージを貼り計測を行った。

②たわみの計測

橋梁中央でのたわみを各桁ごとに計測した。

2) トラックの載荷試験

砂利を満載した20tトラックを4台用意し、図-5に示す4ケースの載荷を行い計測した。この載荷試験は、緊張前と緊張後、さらに橋面施工完成後の3回行った。

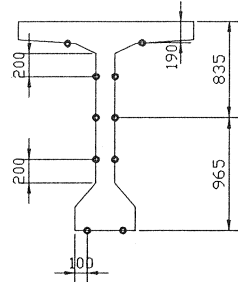


図-3 ゲージ位置断面図

表-3 トラック載荷ケース一覧

載荷ケース	載荷	トラック番号
TCASE-1	下流側1台	1
TCASE-2	下流側2台	1,2
TCASE-3	上流側2台、下流側2台	1～4
TCASE-4	下流側4台	1～4

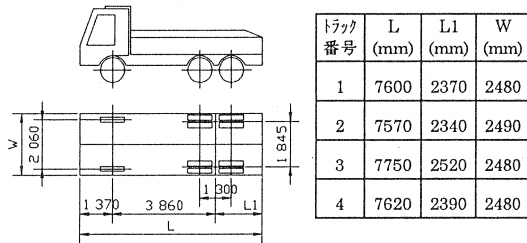
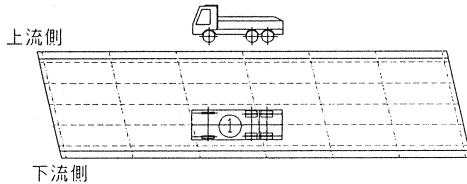
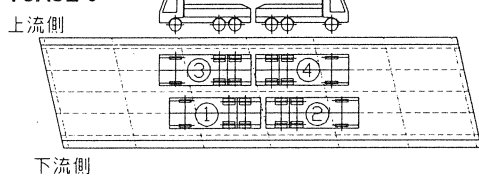


図-4 載荷トラック

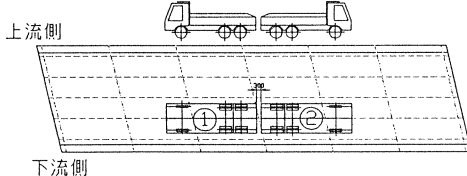
TCASE-1



TCASE-3



TCASE-2



TCASE-4

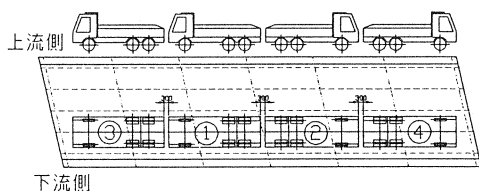


図-5 トラック載荷ケース図

3) 外ケーブルの緊張

外ケーブル緊張は始めに、中央の桁について試験緊張を行った。次にこのケーブルを一度解放して、下流側の桁(G5)から順次緊張定着した。始めの中央の桁(G3)での試験緊張は全体の挙動を確認するためのものである。緊張時の計測は、緊張の途中の変化の様子も分かるようにマンメーター示度が約50Kg/cm² 毎に行った。

緊張ケースの一覧を表-4に示す。

表-4 緊張ケース一覧

緊張ケース	桁番号
PCASE-0	G3 (中央桁)
PCASE-1	G5 (下流側)
PCASE-2	G4
PCASE-3	G3
PCASE-4	G2
PCASE-5	G1 (上流側)

3. 解析

断面力の算定に際して外ケーブルの作用のモデル化としては、PC建協から示されたガイドラインによると次の3つの方法が提示されている。

- ・内力による方法
- ・外力による方法
- ・部材評価法

ここでは、一番簡易的で一般の設計でも用いられている内力による方法と外ケーブルを弦部材とする部材評価法の両方で解析する。部材評価法も立体骨組み要素と薄肉シェル要素の2通りの解析を行う。また、本橋は線支承及び支承板支承であり支承条件では橋軸直角方向の回転(RX)の拘束条件は固定と考えられるが、実際は支承の隙間等で微小ではあるが移動が可能であるとし、橋軸直角方向の回転(RX)は自由(FREE)であるとして解析を行った。比較のために、格子解析と薄肉シェル解析では、橋軸直角方向の回転(RX)を固定(FIX)とした場合の解析も行った。以下にそれぞれの解析方法に関して概要を示す。

1) 格子解析による確認(内力法)

断面力の算出には日本電子計算(株)のFRAMEZを使用してプレ二次を計算した。さらに、載荷試験に関してはGRIDを使用する。この方法は、現在一般に設計計算で使用しているプログラムによる解析である。図-6はその概念図である。

2) 立体骨組み解析による確認(部材評価法)

図-7の如く外ケーブルを弦部材として考慮し構造モデル化を行った。鋼材の導入力ケーブルに初期ひずみを与えることにより対応する。今回の解析では関係はないが、荷重による外ケーブルの張力変化やコンクリート部材のクリープ・乾燥収縮の影響を考慮できる点が内力法より優れている点である。尚、立体骨組み解析はCOSMOS/Mを使用する。

3) 薄肉シェル解析による確認(部材評価法)

図-8に示すように主桁、床版、横桁を薄肉シェル要素でモデル化を行い、外ケーブルはトラス要素として考慮するもので、今回の解析では、もっとも実際に近いモデルと考えられる。また、解析はCOSMOS/Mを使用する。

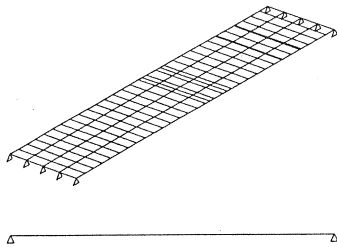


図-6 格子解析骨組み図

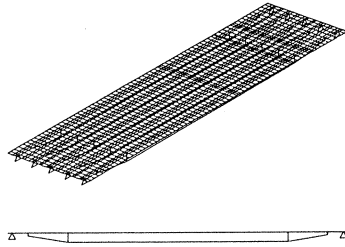


図-7 立体骨組み解析骨組み図

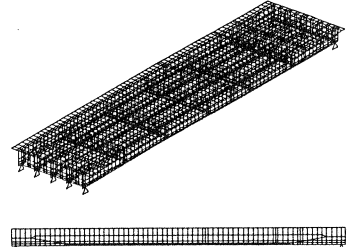


図-8 シェル解析骨組み図

解析は載荷試験緊張前(外ケーブルなし)と載荷試験緊張後(外ケーブルあり)、緊張時の3ケースに分けて行った。また、今回行った解析の種類は次の通りである。

- ①格子計算による解析(内力法) : GRID, FRAMEZ(RX-FREE)
- ②立体骨組みによる解析(部材評価法) : COSMOC/M BEAM3D(RX-FREE)
- ③薄肉シェルによる解析(部材評価法) : COSMOC/M SHELL(RX-FREE)
- ④格子計算による解析(内力法) : GRID, FRAMEZ(RX-FIX)
- ⑤薄肉シェルによる解析(部材評価法) : COSMOC/M SHELL(RX-FIX)

4. 結果と考察

ここでは、たわみと桁中央付近(A断面)の下縁応力度についての計測値と先に示した5つの解析値を比較する。載荷試験に関しては偏載荷が最大となるTCASE4の上流側(G5桁側)に4台のトラック載荷したケースを抜きだした。緊張時に関してはすべての外ケーブルを緊張後のPCASE5について比較する。尚、表-5に計測値を1.0とした場合のたわみの比率集計表、表-6に計測値を1.0とした場合の下縁応力度の比率集計表を以降に示す。さらに、たわみの比較グラフを図-9~11、下縁応力度は図-12~14に示す。

表-5 たわみ比率(計測値を1.00とする)

載荷緊張前(TCASE4B)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	1.486	1.430	1.402	1.299	1.301
②BEAM3D-FREE	1.501	1.436	1.405	1.299	1.298
③SHELL-FREE	1.925	1.586	1.431	1.257	1.210
④GRID-FIX	0.131	0.382	0.499	0.530	0.574
⑤SHELL-FIX	1.821	1.517	1.377	1.215	1.173

載荷緊張後(TCASE4A)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	1.696	1.637	1.503	1.429	1.422
②BEAM3D-FREE	1.676	1.619	1.486	1.413	1.404
③SHELL-FREE	1.081	1.013	0.920	0.867	0.854
④GRID-FIX	0.149	0.437	0.535	0.583	0.628
⑤SHELL-FIX	1.051	0.993	0.905	0.855	0.843

緊張(PCASE5)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	0.968	1.043	1.109	1.045	1.037
②BEAM3D-FREE	0.939	1.011	1.073	1.008	0.999
③SHELL-FREE	0.607	0.659	0.706	0.669	0.668
④GRID-FIX	0.297	0.321	0.341	0.321	0.319
⑤SHELL-FIX	0.598	0.648	0.693	0.656	0.655

表-6 下縁応力度比率(計測値を1.00とする)

載荷緊張前(TCASE4B)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	1.490	1.393	1.312	1.263	1.363
②BEAM3D-FREE	1.509	1.407	1.313	1.253	1.361
③SHELL-FREE	2.145	1.571	1.317	1.177	1.245
④GRID-FIX	0.203	0.517	0.604	0.648	0.758
⑤SHELL-FIX	2.050	1.514	1.275	1.143	1.212

載荷緊張後(TCASE4A)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	1.683	1.584	1.530	1.451	1.512
②BEAM3D-FREE	1.661	1.572	1.509	1.422	1.494
③SHELL-FREE	1.260	1.088	1.007	0.931	0.996
④GRID-FIX	0.230	0.588	0.704	0.745	0.841
⑤SHELL-FIX	1.235	1.072	0.994	0.920	0.986

緊張(PCASE5)					
	G1	G2	G3	G4	G5
計測	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
①GRID-FREE	1.161	1.106	1.093	1.028	1.168
②BEAM3D-FREE	1.129	1.082	1.068	1.003	1.130
③SHELL-FREE	0.858	0.810	0.806	0.765	0.889
④GRID-FIX	0.608	0.579	0.572	0.539	0.612
⑤SHELL-FIX	0.850	0.802	0.798	0.756	0.878

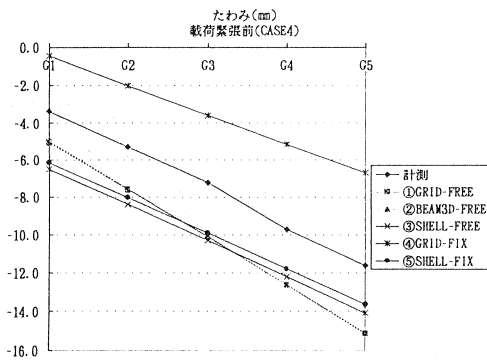


図-9 たわみ比較図(載荷緊張前)

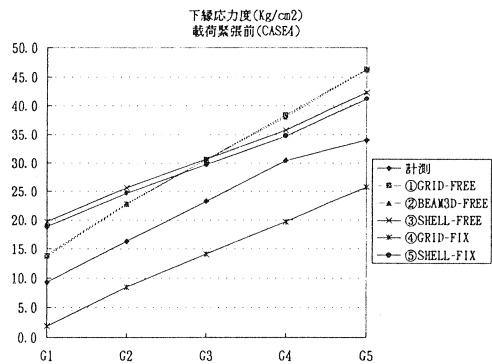


図-12 下縁応力度比較図(載荷緊張前)

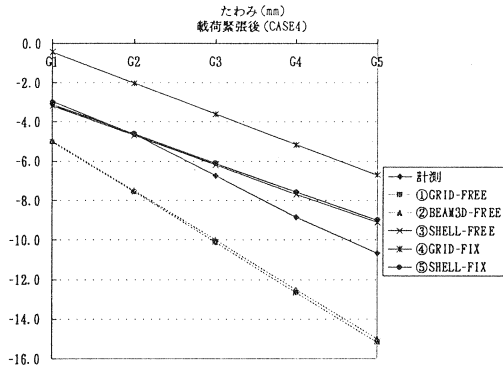


図-10 たわみ比較図(載荷緊張後)

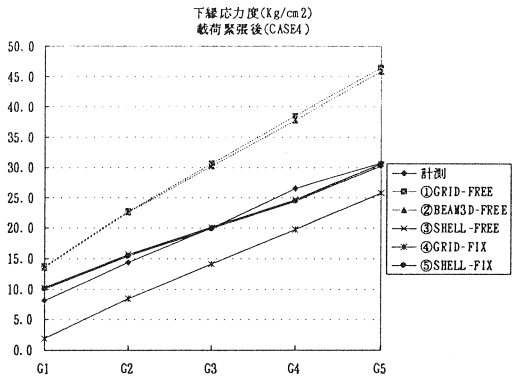


図-13 下縁応力度比較図(載荷緊張後)

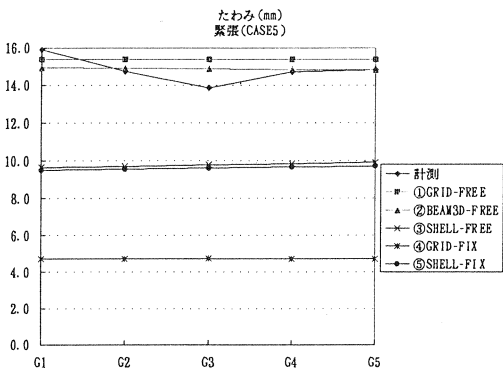


図-11 たわみ比較図(緊張)

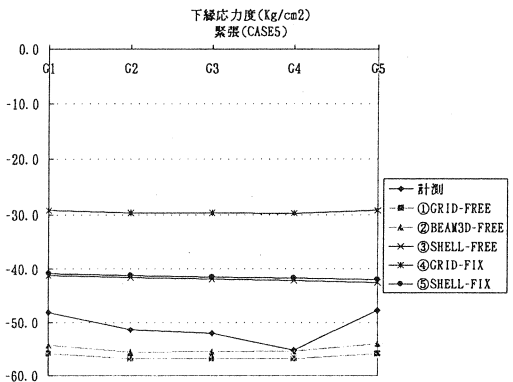


図-14 下縁応力度比較図(緊張)

以上の結果より次のことが言える。

①格子計算(内力法)と立体骨組み(部材評価法)の結果はほぼ同じとなった。

立体骨組みによる部材評価法は荷重による外ケーブルの張力変化やクリープ、乾燥収縮による減少など考慮する際に有効であるが、今回の解析のように既設橋でありクリープ・乾燥収縮が終了している状態では、立体骨組みによる部材評価法の有効性は見出せなかった。今回の計測の範囲内では格子計算(GRID)と立体骨組み解析では同じ結果となるため、一般の設計計算で用いられている格子計算(内力法)で十分の精度があると言える。

②格子計算はスキューの影響により支承の橋軸直角方向回転(RX)の自由、固定で結果が大きく変わる。

本橋は7.7°の斜角を有しており、支承部の橋軸直角方向回転(RX)を固定すると変形適合ねじりを拘束し、自由とした状態と比べると断面力の発生状態が大きく変わる。支間中央では断面力もたわみも固定にした方が小さくなる。そして、支点部では負のモーメントが発生している。

この拘束条件を実橋にあてはめると、固定側は線支承、可動側は支承板支承であり、橋軸直角方向回転(RX)は拘束されているが、横方向、上下の若干のすきまがあり、この微小の移動可能部分により完全ではないが、自由状態に近いと考えられる。また、格子計算では構造線が図心にあり桁下縁の支承部との距離があることなどにより、横桁との関係が厳密に固定するのとは異なるものと考えられる。

さらに、計測結果がこの両者の間にあることから、支承条件のモデル化による影響が大きいと言える。

③格子計算は抵抗部材として外ケーブルを考慮できない。

格子計算は当然、部材として外ケーブルを考慮できない。しかし、今回の解析では、部材評価法として立体骨組み解析を行ったが、載荷試験において、外ケーブルの有り無しの違いはほとんど現れなかった。計測結果では外ケーブルの抵抗は若干見られるが、それほど大きいものではなく、たわみで 1 mm 、下縁応力度で 3 Kg/cm^2 程度の差であった。

④格子計算は安全側の値となる。

格子計算の橋軸直角方向回転(RX)の自由の場合にはトラック載荷による結果は20~50%ほど計測値より大きい値となっている。緊張に関しては10~20%程度大きい値となる。この両方を合わせてみると設計上は安全側になると言える。

⑤薄肉シェル解析は支承の橋軸直角方向回転(RX)の自由、固定の影響はほとんどない。

格子計算では大きく影響の出た橋軸直角方向回転(RX)の拘束であるが薄肉シェル解析では、その影響はほとんど現れなかった。これは、薄肉シェルでは主桁部、横桁部、床版部をそれぞれシェル要素として指定し、支承部は桁下縁にしているため、実際の状態とかなり近いモデルとなっているためであると思われる。

⑥薄肉シェル解析は今回の解析のなかでは計測値と近いものとなり、すべてに安全側の結果を得た。

トラック載荷は緊張前(外ケーブルなし)が20%ほど計測値より大きい応力度となっている。緊張後(外ケーブルあり)はほぼ計測値と同じ応力度。緊張に関しては20%程度小さい値となる。両方とも設計上は安全側となる。

5. おわりに

外ケーブルによる補強という条件下では、既設の主桁は架設されてから十分に年数を経ており、クリープ・乾燥収縮は終了していると考えられる。よって、今回の各種の解析結果の比較からも分かるように、一般の設計計算で用いられている格子計算(GRID、FRAMEZ等)による内力法で十分な設計を行うことが可能である。今後、外ケーブルによる補強の解析には格子計算(GRID、FRAMEZ等)による内力法で十分であるといえる。

今回の実橋による測定と解析では全体の傾向を把握することは十分にできたと思える。しかし、測定結果と今回解析した中で最も実際に近いと考えた薄肉シェル解析の値は完全に一致するものではなかった。これに関しては、対象となった橋梁が竣工から20数年経過しており、モデル化において正確に考慮できない部分も影響があったためと考えられる。また、この影響以外にも薄肉シェル解析では、外ケーブルの影響が顕著に現れたが、計測ではそれほど大きく現れなかった。このように、外ケーブルのモデル化等を含め全体的により適切なモデル化をさらに検討すべきである。

さらに、今回の解析の仮定の上で省略した部分を挙げると、

- ・ 立体骨組み、薄肉シェルではデビエータ部の摩擦を無視した。
- ・ 遅れ弾性ひずみの影響は無視した。
- ・ 支承部の滑り摩擦を無視した。

これらの影響は少ないと考えたが、より厳密な解析の際には必要となるかと思われる。

最後に本稿が今後の既設橋梁の外ケーブルによる補強の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC橋の新しい構造事例に関する研究報告、平成5年3月