

[2006] 打設リフトを考慮した橋脚の温度応力に関する研究

正会員○岩山 孝夫 (矢作建設工業土木本部)
 竹内 誠 (矢作建設工業土木本部)
 正会員 梅原 秀哲 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 吉田 弥智 (名古屋工業大学工学部)

1. まえがき

最近、温度ひびわれと思われるひびわれが、断面の大きなコンクリート構造物に限らずしばしば発生している。その温度ひびわれ対策を検討する上で、コンペンセーションライン法又はコンペンセーションプレーン法による応力解析は有効な手法である⁽¹⁾。

通常、構造物の施工にあたってはあらかじめ施工計画を立て、その施工順序にしたがっていくつかの打設リフトに分けて施工を行うのが一般的である。そのため温度応力を予測し温度ひびわれの検討を行う際にも、打設リフトを考慮した解析がより実際の施工に近く現実的と思われる。

筆者らは、2年間にわたり同形状、同規模の2基の橋脚を対象とし温度応力に関する計測の機会を得、研究を行ってきた。本報告は、それらの研究の成果をもとに新たに橋脚を施工する場合に、リフト分割を含むいくつかのパラメータを設定し温度応力解析を行った結果より、それぞれのパラメータの応力低減の効果について研究を行ったものである。

2. 対象構造物

本研究において対象となった構造物モデルを図-1に示す。全長30m、幅12m、高さ3mのフーチング部分と、全長23m、幅2.6m、高さ12mの壁状躯体部分からなる橋脚で、それぞれのコンクリート数量は約1000^mと700^mになる。またフーチング部分と躯体部分の最大分割回数を6回とし図中に示す様にA~Lリフトとした。このときA~Fリフトの1回の打上り高さは50cm、G~Lリフトで2mとなりコンクリート数量は約180^mと120^mに相当する。

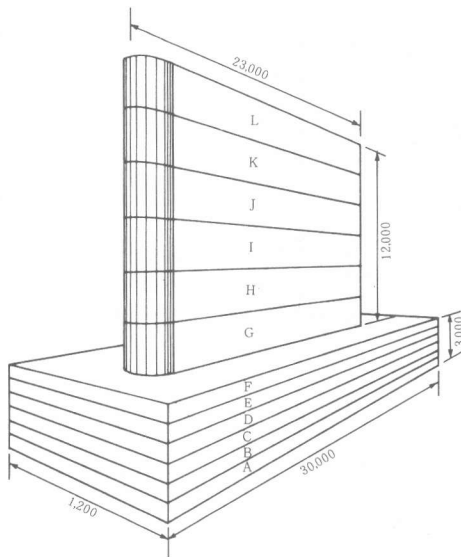


図-1 対象構造物

表-1 リフト分割と施工条件

ケース	リフト数(分割回数)		打設温度	フーチング		躯体		外気温	養生
	フーチング部	躯体部		K	α	K	α		
1,14,27	2	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
2,15,28	2	1	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
3,16,29	2	2	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
4,17,30	2	6	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
5,18,31	1	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
6,19,32	3	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
7,20,33	3	6	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠
8,21,34	2	3	10℃	50.3	-0.286	49.4	-0.398	5℃	合板型枠
9,22,35	2	3	30℃	47.1	-0.868	46.2	-1.209	25℃	合板型枠
10,23,36	2	3	15℃	49.5	-0.431	48.6	-0.601	25℃	合板型枠
11,24,37	2	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	上面エアークラッド
12,25,38	2	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	全体ビニールシート
13,26,39	6	3	20℃	48.5	-0.563	47.6	-0.784	15℃	合板型枠

3. 解析ケース

コンクリートの温度上昇を最も左右するのは、コンクリートの断熱温度上昇量であり、これは打設温度、施工時期に最も左右される。一方、施工計画時には鉄筋の継手、型枠、支保工、生コンの供給能力等を考慮して、コンクリートの打上りリフト高さを決定しなければならない。以上の点をふまえて、解析ケースの設定にあたっては、パラメータを打設リフト、打設温度と外気温、15℃のプレクーリング、通常の養生の他に、保温養生としてコンクリート上面のエアバックシート、全体をビニールシートでおおう方法の3通り設定し、地盤のヤング係数を0、50000、100000kg/cm²の3種類として組合せを考えた結果、表-1に示す39ケースとした。

4. 解析モデルと解析条件

表-1に示すリフト分割を設定した時点で実際に施工を行う事を前提に施工日程を検討した結果、表-2のようになった。表中のケース1を例にとって説明すれば、ケース1はフーチングを2回、躯体を3回に分けて打設を行うため図-1のA、B、Cリフトが第1リフトとなる。この第1リフトを0日目として2日目に第2リフトさらに12日目に躯体第1リフトのG、Hリフト、続けて19日目にJ、Iリフト、26日目にK、Lリフトを打設することになる。さらに各ケースの地盤のヤング係数とL/Hの関係を示したものが表-3である。なおケース1~13では $E_r = 0 \text{ kg/cm}^2$ のため、L/Hが変化しても R_N 、 R_M は一定で0となるため省略してある。この場合基礎地盤としてはベタ基礎の砂地盤を想定したものである。一方、 $E_r = 50000$ 、 $E_r = 100000 \text{ kg/cm}^2$ の場合は外部拘束が卓越する岩盤やコンクリート基礎を想定したものである。温度の解析にあたっては図-2に示す解析モデルを用いて、打設リフトを考慮したFEM温度解析を行った。その結果をもとにコンペンセションプレーン法により、図-3に示す解析モデルにより応力解析を行った。このときに用いるコンクリートの熱特性値、並びに力学的特性値は全て文献〔1〕に示されているものを用いた。

5. 各ケースにおける応力度の検討

一般に図-1の様な構造物に温度ひびわれが発生する

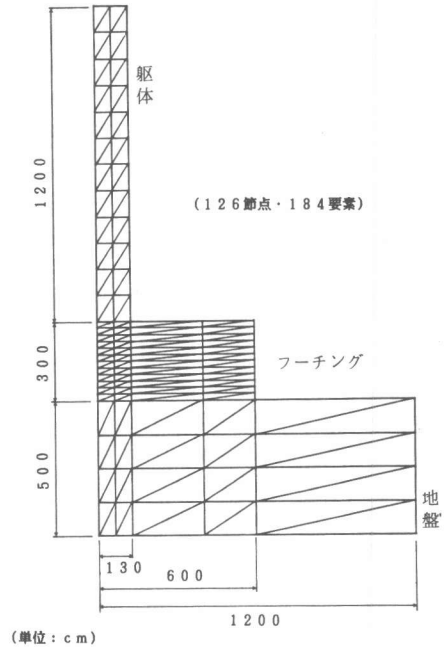


図-2 FEM温度解析モデル

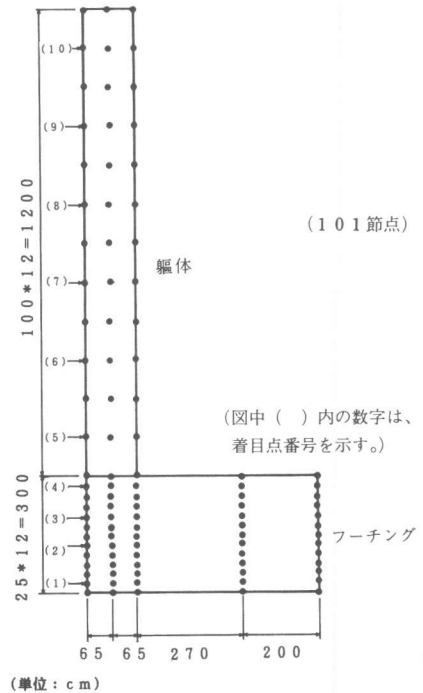


図-3 コンペンセションプレーン法応力解析モデル

場合、フーチング部では上面において短辺方向に平行に間隔をもったひびわれが発生し、躯体部ではフーチング部に対して鉛直方向に発生するが多い。この場合フーチング部のひびわれは表面部のみのひびわれ深さの浅い内部拘束ひびわれと、比較的ひびわれの深い外部拘束ひびわれが考えられる。一方躯体部に発生したひびわれは、フーチングの外部拘束を強く受け、ひびわれが躯体断面を貫通するが多いと言われている。

そこで当構造物の各部位の応力度を検討するにあたり図-3のモデルに示すような、(1)~(10)の着目ポイントを設定した。そこで、表-1~表-3に示す解析条件をもとに39ケースにおけるポイント(1)から、ポイント(10)の応力度の経時変化について調べた。そして各ポイント毎に、引張応力の発生の有無および急激に圧縮応力域から引張応力域へと変化するものについて調べたところ、フーチング部ではポイント(4)、躯体部ではポイント(6)、(8)においてその傾向が顕著に見られることがわかった。

6. フーチング部分における応力

初めに、ポイント(4)に着目して、地盤のヤング係数を0、50000、100000kg/cm²に変化させた場合を考える。図-4にその場合のケース1、14、27の各ポイント(4)における温度応力の履歴を示す。なお、この図はすべてのリフトについて打設時を材令0日として材令と応力度の関係を示したものである。図-4においてケース1は、内部拘束が卓越し、打設直後から引張応力が増大してやがて圧縮応力へ転じる傾向を示している。逆にケース14、27では、打設後圧縮応力が増大し7日頃から引張応力へ転じる傾向を示している。このことはケース1では、打設後から内部拘束応力によるフーチング上面のひびわれの発生の可能性を示していると考えられる。またいずれのケースにおいても材令10日頃に急激に再び圧縮応力が増加している。これは、ポイント(4)が躯体部第1リフトに接近しており、そのリフトの発熱の影響を強く受けるためである。さらに、ポイント(4)に着目して他の36個のケースについて調べたところほぼ図-4と同様の傾向を示していることがわかった。以上よりフーチング上面付近の応力の経時変化は、地盤のヤング係数が大きい場合とそうでない場合では非常に異なることがわかった。

表-2 フーチング第1リフトを基準にした打設日程

リフト ケース	フーチング部						躯体部					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1. 14. 27	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
2. 15. 28	0	0	0	2	2	2	16	16	16	16	16	16
3. 16. 29	0	0	0	2	2	2	12	12	12	22	22	22
4. 17. 30	0	0	0	2	2	2	12	14	21	23	30	32
5. 18. 31	0	0	0	0	0	0	10	10	17	17	24	24
6. 19. 32	0	0	2	2	4	4	14	14	21	21	28	28
7. 20. 33	0	0	2	2	4	4	14	16	23	25	32	34
8. 21. 34	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
9. 22. 35	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
10. 23. 36	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
11. 24. 37	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
12. 25. 38	0	0	0	2	2	2	12	12	19	19	26	26
13. 26. 39	0	2	4	6	8	10	20	20	27	27	34	34

表-3 各ケースの地盤のヤング係数とL/Hの関係

ケース	Ec (kg/cm ²)	Er (kg/cm ²)	Ec/Er	L(m)	H(m)	L/H
1~13	300,000	0	0			
14, 21, 22, 23, 24, 25	300,000	50,000	6.0	30.0	1.5, 3.0, 7.0, 11.0	20, 10, 4.29, 2.72
27, 34, 35, 36, 37, 38	300,000	100,000	3.0		15.0	2
15	300,000	50,000	6.0	30.0	1.5, 3.0, 15.0	20, 10, 2
28	300,000	100,000	3.0			
16	300,000	50,000	6.0	30.0	1.5, 3.0, 9.0, 15.0	20, 10, 3.33, 2
29	300,000	100,000	3.0			
17	300,000	50,000	6.0	30.0	1.5, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0	20, 10, 6, 4.29, 3.33, 2.72, 2.31, 2
30	300,000	50,000	3.0			
18	300,000	50,000		30.0	3.0, 7.0, 11.0, 15.0	10, 4.29, 2.72, 2
31	300,000	100,000	3.0			
19	300,000	50,000	6.0	30.0	1.0, 2.0, 3.0, 7.0, 11.0, 15.0	30, 15, 10, 4.29, 2.72, 2
32	300,000	100,000	3.0			
20	300,000	50,000	6.0	30.0	1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0	30, 15, 10, 6, 4.29, 3.33, 2.72, 2.31, 2
33	300,000	100,000	3.0			
26	300,000	50,000	6.0	30.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 7.0, 11.0, 15.0	60, 30, 20, 15, 12, 10, 4.29, 2.72, 2
39	300,000	100,000	3.0			

次にリフトの分割によってポイント(4)における引張応力度がどの程度低減できるかの検討をおこなった。リフト分割の回数は1回、2回、3回、6回とし地盤のヤング係数を0とした場合を図-5、100000とした場合を図-6に示す。図-5において分割回数1回と2回の場合は、ほぼ応力度は同じであり3回で非常に低減され6回では引張応力は発生しなくなっている。一方、図-6でも同様の傾向を示し3分割以上が効果の大きいことがわかる。このことは本研究における構造体モデルの場合、フーチングの1回当りのリフト高さ1m以下が良好であることを示していると考えられる。なお、フーチングにおける各リフトの打設間隔は表-2に示すように2日間であることに注意されたい。

7. 軀体部分における応力

軀体部分においても初めに地盤のヤング係数を変化させて応力の比較を行った。ポイント(6)、ポイント(8)

における応力の履歴を図-7、図-8に示す。まず図-7のポイント(6)を見ると材令7日頃急激に圧縮から引張へと変化する材令9日頃最大となっている。また、 $E_r = 50000$ と 100000 の場合は $E_r = 0$ の場合より材令3日頃の圧縮応力の最大値が小さく逆にならば材令9日頃の引張応力のピーク値は若干 $E_r = 0$ の場合が大きくなっている。材令14日以後は再び $E_r = 100000 \text{ kg/cm}^2$ の方が大きくなっているのがわかる。次にポイント(8)では圧縮域ではほぼポイント(6)と同様の傾向を示しているが、引張応力へ転じる頃から地盤のヤング係数の違いが現れ材令が進むごとにその差が顕著になっている。材令14日までで比較すれば、温度ひびわれ指数1は、 $E_r = 0$ の場合1.3 $E_r = 50000$ の場合1.1、 $E_r = 100000$ の場合1.0であった。

さらにリフト分割の影響を調べるために、軀体部を1回、2回、3回、6回に分割した場合に

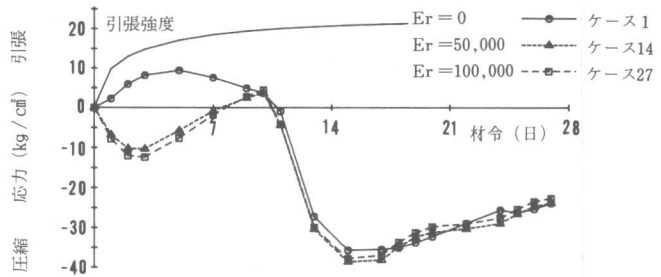


図-4 ポイント(4)での地盤のヤング係数の違いによる応力履歴の比較

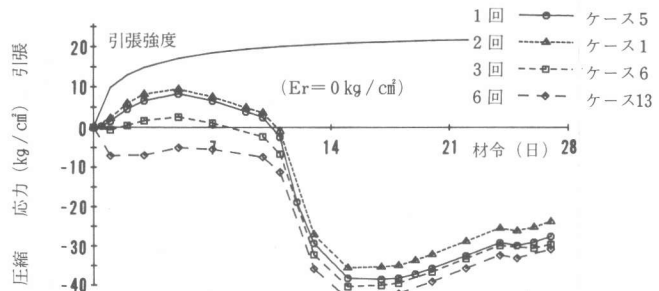


図-5 ポイント(4)でのリフト分割による応力履歴の比較

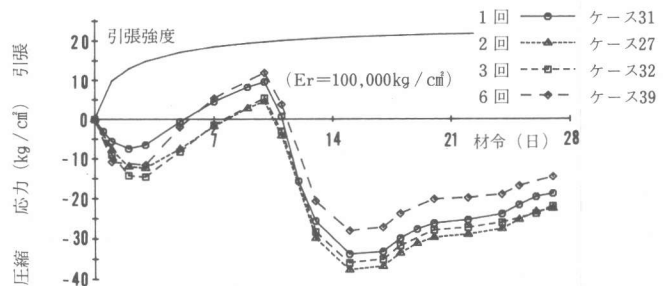


図-6 ポイント(4)でのリフト分割による応力履歴の比較

ついて $E_r = 0$ の場合にポイント(8)に着目したものを図-9に $E_r = 100000$ の場合にポイント(6)に着目したものを図-10に示す。リフト分割を行う場合、各リフトの時間間隔の違いは応力に対しての影響が大きい。たとえば、表-2に示すケース2の場合、図-1のG~Lリフトを一度に打設を行うことを表しているが、G~Iリフトを打設し7日後に残りのリフトを打設した場合がケース3になる。一方、躯体部を3分割し、7日ずつの打設間隔をおいたものがケース1である。さらに3分割したリフトを2日ずつの打設間隔を加えて合計6分割したものが

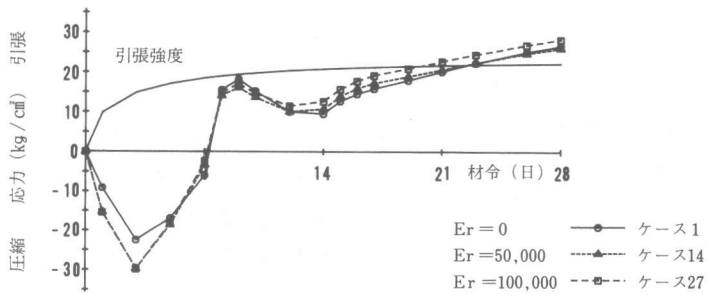


図-7 ポイント(6)での地盤のヤング係数の違いによる応力履歴の比較

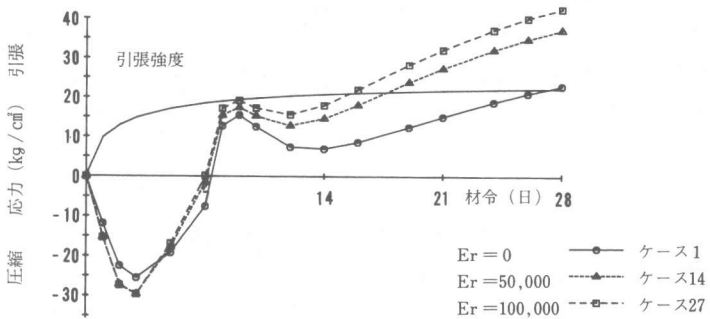


図-8 ポイント(8)での地盤のヤング係数の違いによる応力履歴の比較

がケース4である。したがって、ケース2からケース3、ケース1からケース4というように別々に考える必要がある。図-9において、ケース2とケース3を比べた場合、圧縮から引張へ転じる材令がケース2の方が3日程おそくなっている。またケース1とケース4を比べた場合、前者は材令9日で引張応力のピークとなり、温度ひびわれ指数は1.3であり、後者は材令10日で1.5になりリフト分割による応力の低減がここに現れていると考えられる。次に図-10に示す $E_r = 100000$ の場合について検討する。ケース28とケース29を比較した場合、図-9と同様に圧縮から引張へ転じる材令が3日程遅くなっている。ケース27とケース30を比べると材令9日の引張応力のピーク時は同じ材令であるが、温度ひびわれ指数は、前者が1.1、後者が0.9となり、ここでもリフト分割による応力の低減が見られている。以上よりリフト分割後の打設時間間隔は2日程度が効果があるものと考えられる。したがって、当モデルのような躯体部分のコンクリート打設の検討を行う場合は、温度応力を低減させる目的で、いくつかにリフト分割を行っても、打設時間間隔を十分考慮しなければ、必ずしも応力低減に結びつかないということである。このことは、コンクリート打設の際の温度応力の検討には、リフト間の相互の応力の影響を考慮した温度応力解析⁽²⁾の必要性を示していると言えよう。

8. 打設温度、養生方法、プレクーリングの影響

本研究では、リフト分割の他に①施工時期の違いによる打設温度の違いがもたらす応力への影響②養生方法の違いによる影響③プレクーリングの効果について検討を行った。①については、施工時期の違いによる外気温度の違いは、打設温度を最も左右する。そこで、一年間を大きく春と秋、冬と夏の3つの季節に分け、打設温度と外気温度を設定し表-1に示すケース1、14、27、

とケース 8、21、34とケース 9、22、35とした。②については、ケース 1、14、27を通常の養生とし、さらにコンクリート仕上げ面にエアバックシートを用いた場合をケース11、24、37、通常の養生方法に加えビニールシートで構造物全体を覆って養生を行った場合をケース12、25、38とした。

③については、夏場施工を想定し、ケース 9、22、35の打設温度を30℃の場合と15℃までプレクーリングを行った場合について比較した。①では、施工時期において冬、春と秋、夏の順に引張応力が大きくなり、地盤のヤング係数が大きい程その差が大きくなった。また

フーチング部分と躯体部分では後者の方が特に影響があった。②では、応力低減の効果の大きいもの順にビニールシート、エアバック、一般の養生となった。また養生の違いは、躯体部分の方がフーチング部分より顕著であった。③では、地盤のヤング係数の大小にかかわらずプレクーリングによる応力の低減効果は顕著である。フーチング部分では、ほとんどのケースにおいて引張応力は発生しなくなった。また躯体部分では圧縮から引張へと転じる材令が7日ほど遅れており、その後の引張応力も著しく低減されている。これは、打設温度が低いとコンクリート温度が上昇して最高温度になった時点での外気温度との差が小さくなるためと考えられる。

9. 結論

本研究により、以下のことが明らかになった。

1. 本研究に用いたモデルでは、フーチング部分において1回当たりのリフト高さは1m程度以下、打設時間間隔は2日程度が良いことがわかった。
2. 躯体部分では、各リフトの打設時間間隔の長さによって応力が影響を受けるため、温度応力の解析には打設リフトを考慮した検討を行い最適なりフト分割と打設時間間隔を決定する必要がある。

参考文献〔1〕 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」

P.P.119 ~ 134, 1986

〔2〕 吉田、梅原、田中、岩山：コンクリート橋脚の温度応力に関する研究、第8回コンクリート工学年次講演会論文集

P.P.29 ~ 32, 1986

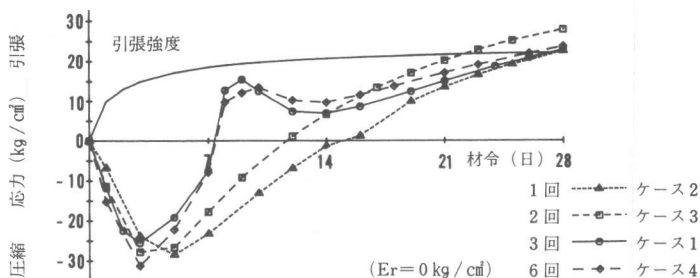


図-9 ポイント(8)でのリフト分割による
応力履歴の比較

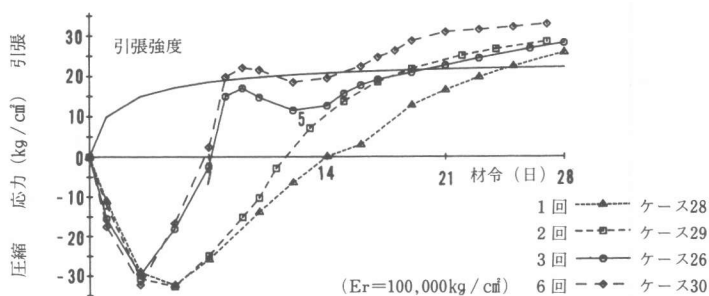


図-10 ポイント(6)でのリフト分割による
応力履歴の比較