研　究

ケミカルプレストレスの長期持続性の検討

中花　洋介*　木村　充**　細見　雅生***

著者らは連続合成桁のプレストレス導入方法として膨張コンクリートを用いたケミカルプレストレスに着目し，継続して研究を行っている。ケミカルプレストレスの長期的な持続性を確認するために 1999 年 10 月に 3 体の実験桁を製作した。2001 年 1 月に打設後 420 日で 3 体のうちの 1 体について載荷実験を行いケミカルプレストレスの持続性を確認した [1)]。今回，打設後 5 年経過した残りの 2 体の実験桁について載荷実験を実施した。実験から得られた初期ひび割れ荷重と過去に行った実験値との比較，また予測値と比較することでプレストレスの持続性を確認した。ここでは，今回実施した実験の内容と実験結果について報告する。

キーワード：ケミカルプレストレス，長期計測実験

まえがき

少数主桁連続合成桁が注目され，日本道路公団を中心に設計，施工が行われている。その理由として，少数主桁を用いた鈑桁が経済的であることと，合成桁形式を用いることで床版を主構部材の一部として扱うため，鋼桁の上フランジの断面を小さくでき経済的であるからである。しかし，連続合成桁の設計法は一般的に橋軸方向にプレストレスしない設計を使用され，中間支点のみ鋼桁と鉄筋とで外力に抵抗する部分合成桁として設計される場合が多い。これに対し，さらに経済的な設計法として橋軸方向にプレストレスを導入し，橋梁の全区間にわたって床版を有効にする設計法が考えられる。

プレストレスを導入する方法としては，支点のジャッキダウン，PC 鋼材での軸力導入などがある。著者らは膨張コンクリートを用いたケミカルプレストレスによるプレストレス導入に着目し検討を行った。この方法により，初期ひび割れ荷重が普通コンクリートと比較して増加していることを確認している。しかし，打設時にケミカルプレストレスが導入されたのち，経年変化することでクリープ，乾燥収縮ひずみの進行の影響によりケミカルプレストレスが低減する。著者らは 1 体目の 420 日経過後の載荷実験で長期間経過後もケミカルプレストレスは低減はしているものの，膨張の効果は残っており十分期待できるという結果が得られた。今回，5 年経過した合成桁の載荷実験を行い，さらにケミカルプレストレスの効果についての検討を行うものとした。

本実験では 5 年前(1999 年 10 月)に実験桁を 3 体製作している。3 体のうち 1 体はケミカルプレストレスの導入のみ，他の 2 体はケミカルプレストレスの導入と支間中央へのジャッキ操作によりプレストレスを導入した。そのうちのケミカル+ジャッキの 1 体は打設後 420 日で載荷実験を行っており結果は構造工学シンポジウムなどで報告している。今回はケミカルプレストレスのみとケミカル+ジャッキの 5 年経過した場合の初期ひび割れ荷重とケミカルプレストレスの持続性などについて確認を行った。またジャッキ操作を行った場合の効果についても検討を行った。

１．実験概要

実験桁の一般図と載荷時の概要を図-1 および図-2 に示す。膨張コンクリートを使用してケミカルプレストレスを導入した C0 桁，ケミカルプレ

＊長岡技術科学大学実務訓練生　＊＊技術研究室　＊＊＊技術研究室室長

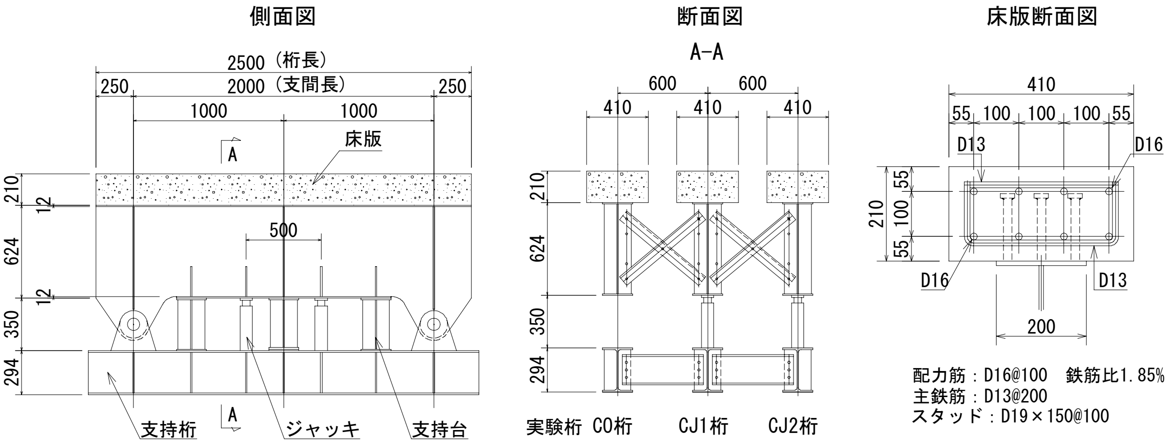


図-1 実験桁

表-1 載荷ステップ

段階	繰返し回数	載荷 STEP (tf)	除荷 STEP (tf)	ピッチ (tf)	目標状態
1	2	0-20	20-0	2	-
2	1	0-40,60	40,60-0	2,4	初期ひび割れ
3	3,4	0-80	80-0	2-20	安定ひび割れ
4	1	0-160	160-0	2-20	桁降伏

ストレスとジャッキ操作によりプレストレスを併用して導入したCJ1桁とCJ2桁の3体が実験桁である。3体のうちの1体(CJ2桁)は打設後1年(420日)に載荷実験を実施した[1)]。今回は新たに残りの2体(C0，CJ1桁)の載荷実験を実施した。実験桁の両端をピンで支持し支間中央にジャッキを設置して負曲げモーメントを作用させた。載荷ステップを表-1に示す。C0桁は400kN，CJ1桁は430kNで初期ひび割れ状態，また610kN, 650kNで安定ひび割れ状態となると道路橋示方書の簡易式を使って予測した[2)]。予測値の計算方法は次節2.に示す。予測結果から表-1に示す載荷ステップを設定した。

２．計算値の算出

（１）プレストレス量の計算

プレストレス量の予測値は文献 3)で報告している算出方法を参考にした。また以下に示すプレストレス量はひび割れ発生荷重を求めるため床版上面を算出した。

拘束膨張試験で規定されている基準鉄筋比0.95%における膨張率の条件から拘束鉄筋比に換算した単位体積あたりの膨張エネルギーU'を(1)式より計算し，(2)式よりコンクリートのケミカル

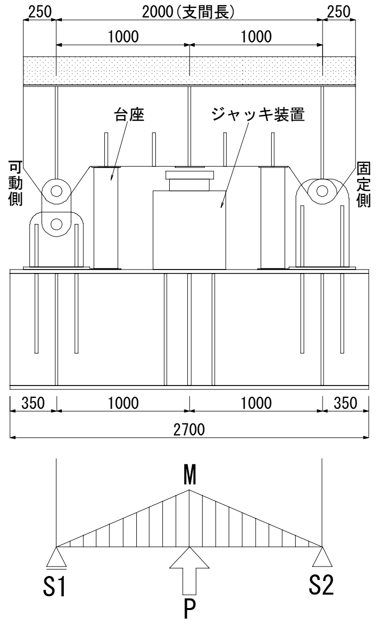


図-2 載荷方法

プレストレスσ_{cp}を求める。

$$U' = \frac{1}{2} P_r' E_s \varepsilon'^2 \quad \cdots(1)$$

ここに，$\varepsilon' = \varepsilon \sqrt{0.95 / P_r'}$

$$\sigma_{cp} = \sqrt{2U' E_s P_r'} \quad \cdots(2)$$

ここで，σ_{cp}はコンクリートのケミカルプレストレス量，ε'は任意の鉄筋比の膨張率，εは膨張ひずみで実測値(C0桁は614，CJ1桁は518μ)を使用した。P_r'は拘束鉄筋比(A_s/A_c)で 1.85%，E_sは鉄筋のヤング係数(2.06×10^5N/mm^2), A_sは鉄筋断面積(1590mm^2)，A_cはコンクリート断面積(8.61×10^4mm^2)である。(2)式より各桁のケミカルプレストレスσ_{cp}は，C0桁で-1.67，CJ1桁で-1.41 N/mm^{2}となる。

次に桁との合成効果を考慮して乾燥収縮と同様の(3)式を適用する。

$$\sigma_c = \frac{1}{n'}\left(\frac{P'}{A_v{}'} + \frac{M_v{}' y_v{}'}{I_v{}'}\right) - \frac{E_s \varepsilon'}{n'} \qquad \cdots(3)$$

ここに，

$$P' = {E_s \varepsilon' A_c}/{n'} \quad , \qquad M_v{}' = P' dc'$$

ここで，σ_cは膨張によるコンクリートの応力度，n'は膨張による応力度算出用ヤング係数比で21(ϕ=4)，P'，M_v'，A_v'，I_v'，y_v'，d_c'はそれぞれn'を用いた仮想軸力，仮想モーメント，換算合成断面積(1.59×10^4mm^2)，断面2次モーメント(1.27×10^9mm^4)，中立軸から床版上面の距離(373mm)および中心までの距離(268mm)である。(3)式より各桁の桁拘束によるプレストレスはC0桁で-1.81，CJ1桁で-1.53N/mm^{2}となる。また，乾燥収縮によるプレストレスの影響量はε'を 200μとして求め0.82N/mm^{2}となった。

次にケミカルプレストレスに伴うクリープの影響を(4)式より求める。

$$\Delta\sigma_{cc} = \frac{1}{n''}\left(\frac{P''}{A_v{}''} + \frac{M_v{}'' y_v{}''}{I_v{}''}\right) - \sigma_{cp}\left(\frac{\phi''}{1+\phi''/2}\right) \cdots(4)$$

ここで，$\Delta\sigma_{cc}$はクリープの影響により減少されるプレストレス量，n"はクリープ係数ϕ"=2 を用いたヤング係数比(n"=14)，他の変数は(3)式と同様に n"で考慮した数値で換算合成断面積(1.79×10^4mm^2)，断面 2 次モーメント(1.40×10^9mm^4)，中立軸から床版上面の距離(342mm)および中心までの距離(237mm)である。(4)式より各桁のケミカルプレストレスのクリープによる影響量は C0桁で0.50，CJ1桁で0.43N/mm^{2}となる。

次に，ジャッキ操作によるプレストレス量の計算方法を以下に示す。まずジャッキ操作によって初期導入されたプレストレス量σ_{cj}は(5)式より求められる。

$$\sigma_{cj} = \frac{1}{n}\cdot\frac{M_v}{I_v} y_{cu} \qquad \cdots(5)$$

ここで，nはヤング係数比(n=7)，Mvはジャッキ操作によって生じさせた支間中央の曲げモーメント(CJ1桁は76kN･m)，Ivは合成桁の断面2次モーメント(1.68×10^9mm^4)，y_{cu}は中立から床版上縁までの距離(282mm)である。(5)式よりジャッキによるプレストレスはCJ1桁で-1.82N/mm^{2}となる。またケミカルプレストレスと同様にジャッキのクリープ影響を(4)式より計算するとCJ1桁で1.02N/mm^{2}となる。

プレストレス量の予測値は以上の計算方法から求めた。C0桁，CJ1桁は製作から5年経過しているので，乾燥収縮およびクリープひずみは十分に収束していると仮定し，すべての影響を含めて計算すると-2.16および-2.48N/mm^{2}となる。CJ2桁の床版上面におけるプレストレス量の打設後420日の予測値は文献4)で報告している履歴積分を用いた予測方法より求めて-4.63N/mm^{2}となった。

（２）各状態の荷重

作用モーメントと床版分担軸力の関係から各状態における荷重を算出した。

まず支間中央における初期ひび割れ発生荷重P_{CR}を(6)式より算出するとC0桁で400，CJ1で430，CJ2桁で600kNとなった。

$$P_{CR} = \frac{4M_{CR}}{L} = \frac{4}{L}\frac{n(f_{ct} - \sigma_P)I_V}{y_u} \qquad \cdots(6)$$

ここで，M_{CR}は初期ひび割れ発生モーメント，nは鋼とコンクリートのヤング係数比(n=7)，f_{ct}はコンクリートの引張強度(2.8N/mm^2)，σ_pは(1)で求めたプレストレス量の予測値，I_vとy_uは合成桁における断面2次モーメントと中立軸から床版上縁までの距離である。

次にtension-stiffeningを考慮した(7)式から安定ひび割れ状態のモーメントMを求め，安定ひび割れ荷重を算出するとC0桁で610，CJ1桁で650kNとなった。

$$N_C = \frac{M}{I_{st}} y_{st} A_s + \frac{\beta(f_{ct} - \sigma_P)}{\rho_s \alpha_{st}} A_s \qquad \cdots(7)$$

$$\alpha_{st} = \frac{A_{st} I_{st}}{A_g I_g}$$

であり，N_CとMは安定ひび割れ状態の床版分担軸力と作用モーメント，A_sは鉄筋断面積(1590mm^2)，I_{st}，A_{st}，y_{st}はそれぞれ鋼桁+鉄筋断面の断面 2 次モーメント(8.92×10^8mm^4)，断面積(1.18×10^4mm^2)，中立軸から上下鉄筋断面の中心までの距離(361mm)，I_g，A_gは鋼桁の断面2次モーメント(6.12×10^8mm^4)と断面積(1.02×10^4mm^2)で，係数βは0.4とした。

（３）ひび割れ幅

最大ひび割れ幅ωの計算値は土木学会のコンクリート標準示方書に示されている式を使用した[5)]。

$$\omega = \{4C + 0.7(C_s - \phi)\}\left\{ \sigma_{se} \big/ E_s + \varepsilon'_{cs} \right\} \quad \cdots(8)$$

ここに，

$$\sigma_{se} = N \big/ A_s \quad , \quad L = 4C + 0.7(C_s - \phi)$$

σ_{se}は鉄筋応力度，C はかぶり(55mm)，C_sは鋼材の中心間隔(100mm), E_sは鋼材のヤング係数(2.06×10^5N/mm^2), A_sは全鉄筋断面積(1590mm^2)，ε'_{cs}はコンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の影響値で 150μとした。L はひび割れ間隔で 247mm となった。N は床版の分担軸力で 2.(2)の tension-stiffening を考慮した軸力を使用する。

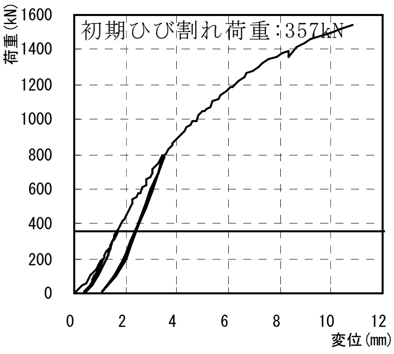
３．実験結果

（１）変位と荷重の関係

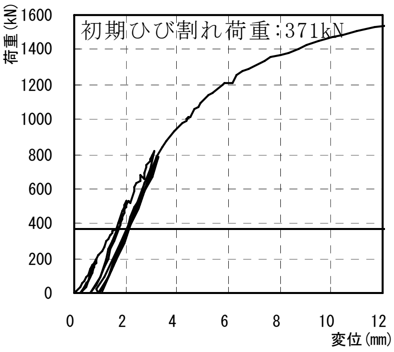
各桁の荷重変位関係を図-3 に示す。C0 桁，CJ1 桁とも弾性域から塑性域への移行傾向やひび割れ発生後に変位が約 1mm 残存するなど同様な傾向を示した。コンクリートの引張強度を 2.8N/mm^{2}とした場合の初期ひび割れ発生荷重の予測値は C0 桁で 400kN，CJ1 桁で 430kN となり，その差は 30kN である。またプレストレスをしない場合のひび割れの予測値は 223kN である．載荷実験の結果，初期ひび割れは C0 桁で 357kN，CJ1 桁は 371kN で発生し，その差は 24kN である。各桁とも実験値は予測値より低くなったが，１割未満の誤差でありほぼ対応した値になった。また，ジャッキのプレストレスによる影響は予測の約 80%に低下している。製作後 1 年の CJ2 桁の予測値は600kN で実験値は542kN である[1)]ことから，経年変化によりプレストレスの減少は見られるが打設後 5 年においてもプレストレスの効果は確認できる。

実験より得られた初期ひび割れ荷重から支間中央および床版断面中心のプレストレス量を算出した結果を表-2 に示す。初期導入プレストレス量は文献 4)で報告している値である。初期導入プレストレス量は実際に測定した膨張量から算出した値であること，またジャッキの性能が低いことによって各桁で異なった。CJ2 桁では１年で４0%弱の減少が見られる。CJ1 桁では 5 年で７0%弱減少し，C0 桁は 60%弱の減少が見られる。また全桁で予測よりも 1 割程度減少している。CJ1 桁はプレストレス量を C0 桁よりもジャッキ操作によって多く導入していることから，ジャッキ(外力)によるプレストレスはクリープの影響を受けやすく，プレストレス量の減少が若干大きくなると考えられる。しかし，現時点で残存しているプレストレス量はC0 桁よりも CJ1 桁が 10%程度多いことからジャッキによる効果を確認できる。

コンクリート床版のひび割れ状況を図-4に示す。CJ1 桁の初期ひび割れ発生荷重は荷重と鉄筋ひずみの関係から 371kN と判断したが目視によって明確に確認できたのは 647kN 時であった。両桁とも似た位置でひび割れは発生し，ひび割れ本数



(a) C0 桁



(b) CJ1 桁

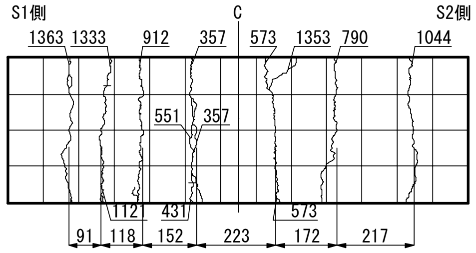
図-3　荷重変位関係

表-2　プレストレス量の減少　[N/mm^2]

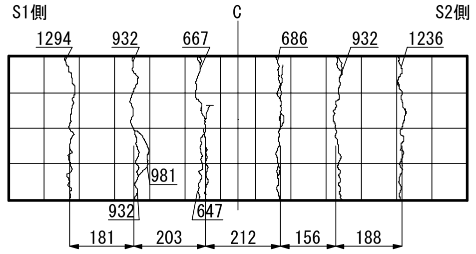
	プレストレス量			減少率(%)	
	初期 4)	実験	予測	実験	予測
C0	-2.31	-0.99	-1.31	57.1	43.3
CJ1	-3.27	-1.09	-1.54	66.7	53.0
CJ2	-3.71	-2.3	-2.81	38.0	24.3

はC0桁で7本，CJ1桁で6本とC0桁よりも1本少ない。また支間中央よりS2側のひび割れ発生荷重を比較すると，C0桁はCJ1桁よりも100kN以上早い段階でひび割れている。このことからジャッキによるプレストレスの効果がひび割れ発生荷重からも確認できる。

次にひび割れ間隔を比較する。コンクリート標準示方書のひび割れ間隔は247mmで，実験から得られた最大間隔はC0桁で223mm，CJ1桁で212mm，平均間隔は162mmと188mmである。示方書と最大間隔の誤差は10%程度と近い値である。また最大間隔と平均間隔においてもC0桁で1.4倍，CJ1桁で1.1倍と近い数値が得られた。



(a) C0桁

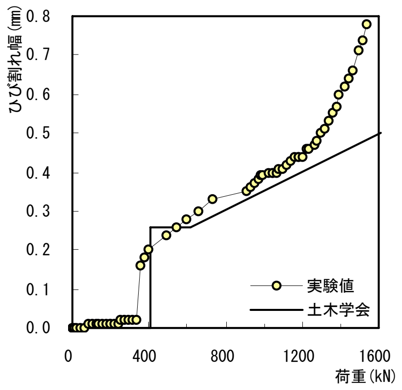


(b) CJ1桁

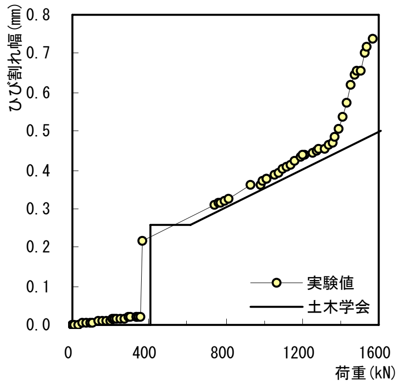
図-4 ひび割れ状況

（２）ひび割れ幅

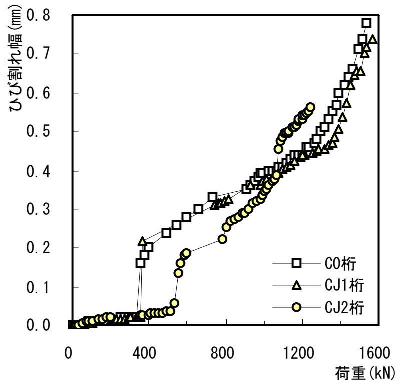
パイ型変位計で支間中央付近に発生したひび割れ幅を計測した結果を図-5に示す。実験値の荷重除荷時は省略して図示した。図-5-(a)(b)には実験値のほかに土木学会のコンクリート標準示方書[4]によるひび割れ幅の計算値を示した。C0桁，CJ1桁とも初期ひび割れ発生荷重が若干異なるため，ひび割れ発生時のひび割れ幅は計算値との相違があるが，全体的に同様な傾向を示している。次に図-5-(c)よりCJ2桁と比較すると初期から安定ひび割れの間ではC0桁，CJ1桁のほうがひび割れ幅は大きく，安定ひび割れ以降はほぼ同じ値になっている。安定ひび割れ前ではプレストレス量によってひび割れ幅は影響するが，プレストレスが開放されると同じ傾向を示している。これらから，



(a) C0桁



(b) CJ1桁



(c) 各桁の比較

図-5 ひび割れ幅

土木学会のコンクリート標準示方書で与えられたひび割れ幅式で予測できると考えられる。

（３）ひずみ分布，中立軸の変化

床版表面，内部と鋼桁のひずみゲージから測定したひび割れ発生前後のひずみ分布を図-6，荷重と中立軸の変化の関係を図-7に示す。着目断面は可動ヒンジ側から支間中央に500mmのひび割れ発生位置付近である。ひび割れ発生前と発生後の同一荷重におけるひずみ分布と同位置における中立軸の変化を比較した。両桁ともひび割れ発生前の中立軸は合成断面に沿って分布しているが，ひ

び割れ発生後は鉄筋+鋼桁断面に近づいている。特に C0 桁は CJ1 桁よりもひび割れ発生時に鋼桁が鉄筋+鋼桁断面に大きく移動している。これは CJ1 桁のプレストレス量が C0 桁よりも多いためである。

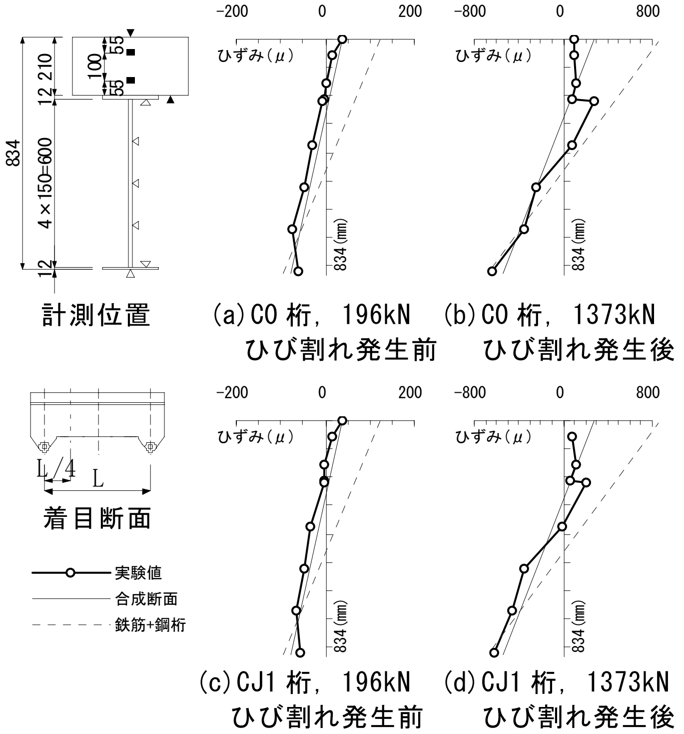


図-6　ひずみ分布

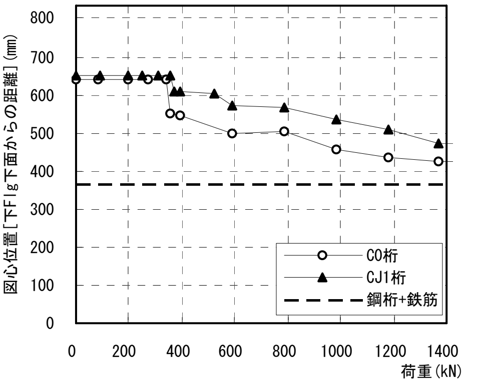


図-7　中立軸変化の比較

4．まとめ

①ケミカルプレストレスの効果は，製作から 5 年経過した時点で持続していると判断でき，効果は予測値より 1 割程度低くなっている。

②ジャッキを併用してプレストレスを導入した桁についてもケミカルプレストレスのみ使用した桁と同様にプレストレスの効果は持続していると判断できるが，ジャッキによる効果は予測値の 80%に低下している。

③ケミカルプレストレスの効果およびジャッキによるプレストレスの効果はひび割れ荷重や中立軸の変化からも確認できる。

あとがき

ケミカルプレストレスの長期的な持続性の効果は確認できたが，文献 4)で報告した履歴積分の予測方法から求められるプレストレスとの比較を行っていないため，改めて比較および検討が必要と考えている。さらに文献 4)の予測方法は単純桁を想定したもので，今後の課題として連続桁への適用を検討している。次の機会に報告する予定である。

参考文献

1)中本啓介・石川敏之・細見雅生：連続合成桁に対するケミカルプレストレス導入効果の実験的検討，駒井技報，Vol.21，pp.1-7，2002.4

2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説，丸善，1996.12

3)岡田幸児・細見雅生：連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用に関する研究(第 2 報)，駒井技報，Vol.19，pp.1-9，2000.4

4)中本啓介・石川敏之・細見雅生：連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用に関する研究(第 3 報)，駒井技報，Vol.20，pp.7-15，2001.4

5)土木学会：コンクリート標準示方書，1996