

た、各部材の見掛けひずみは若干異なるものの、その履歴は同様であり、切梁断面内においては平面保持の仮定がほぼ成立していることが分かる。

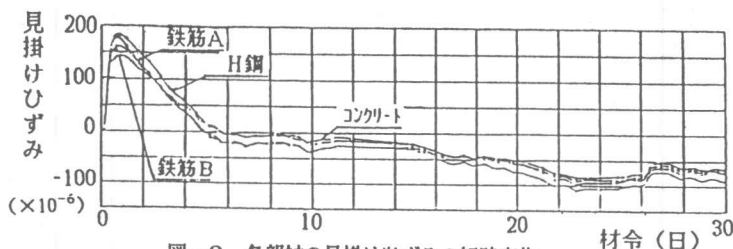


図-2 各部材の見掛けひずみの経時変化

3.2 弾性係数低減率

コンクリートはある持続荷重のもとでは、クリープによってひずみが増大する。従って、コンクリートの応力解析においては、このクリープを考慮した有効弾性係数を用いる必要がある。図-3は、応力計から得られた実測応力と、前述した見掛けひずみからコンクリートの温度変化に伴う自由変形ひずみを差し引くことにより求めた応力ひずみとの関係を示したものである。同図から、次式によって単位応力ひずみあたりの応力増分として、有効弾性係数を求めた。図-4にその結果を示す。

$$E_e = \sigma_m / \varepsilon_e \quad (1)$$

ここに、 E_e : 有効弾性係数 (kgf/cm²)

σ_m : 応力計による実測応力 (kgf/cm²)

ε_e : 応力ひずみ

同図に示されるように、コンクリートの有効弾性係数は掘削時に大きく変動している。この掘削時の変動は掘削時期が早く、しかも掘削に伴う導入軸力の荷重レベルが大きい1次掘削の方が大きくなっている。このため、切梁軸力の算定においては、この掘削時のコンクリートの剛性の変化を考慮する必要がある。

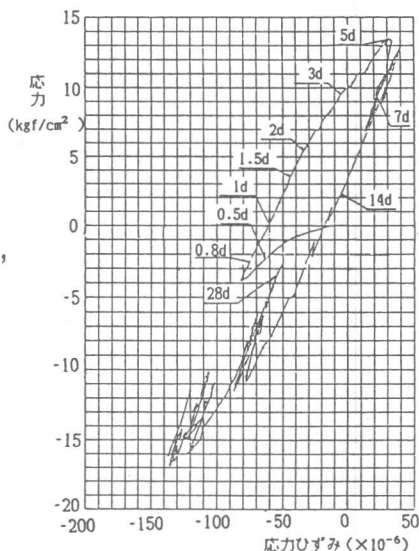


図-3 実測応力と応力ひずみとの関係

一方、切梁に使用したコンクリートの静弾性係数は、切梁打設時に採取したテストピースを用いて測定することができ、積算温度をパラメータとして整理すると以下のようなものである。

a. $M < 600$ の時, $E_o = 0.80 \log M - 0.83 \quad (\times 10^5)$

b. $600 \leq M$ の時, $E_o = 1.35 \log M - 2.36 \quad (\times 10^5) \quad (2)$

ここに、 E_o : コンクリートの静弾性係数 (kgf/cm²)

M : 積算温度, $M = \sum (T + 10) \cdot t \quad (^\circ\text{C} \cdot \text{h})$

{ T : 養生温度 ($^\circ\text{C}$), t : $T^\circ\text{C}$ での経過時間 (h)}

いま、切梁のコンクリート温度の計測結果をもとに積算温度から式(2)により推定した静弾性係数と、前述した有効弾性係数とから次式によって弾性係数低減率を算定し、モデル化すると図-5のようなものである。

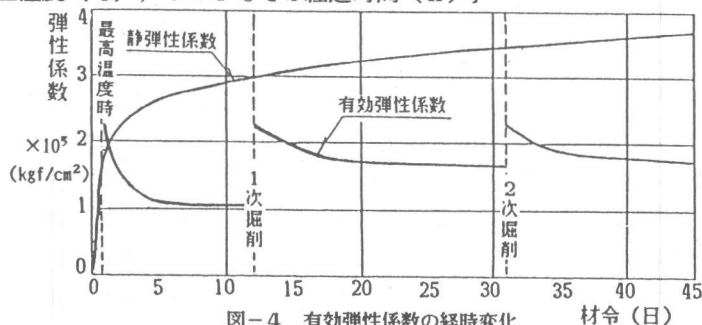


図-4 有効弾性係数の経時変化

$$R = E_e / E_o \quad (3)$$

ここに、R : 弾性係数低減率

E_e : 有効弾性係数 (kgf/cm²)

E_o : コンクリートの静弾性係数 (kgf/cm²)

同図に示すように、コンクリートの弾性係数低減率は打設初期の最高温度到達時付近において値が変動するほか、掘削時においても値が変動している。すなわち、1次掘

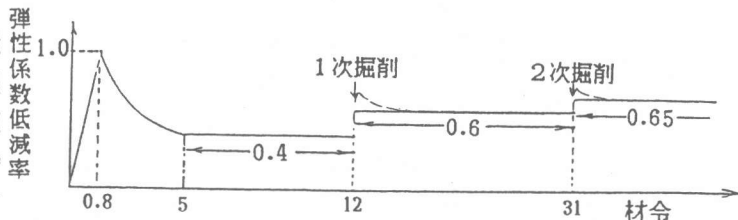


図-5 弾性係数低減率のモデル化

削および2次掘削により弾性係数低減率はそれぞれ 0.2および0.05増加している。このように、2次掘削時に比べて1次掘削時における弾性係数低減率の増加が大きくなった原因は、1次掘削時の方が載荷材令が若く、しかも掘削の進行に伴う導入軸応力が大きいことによるものであり、クリープの基本特性とも一致している。

このため、この弾性係数低減率のモデルを用いて、次式に示す増分法¹⁾により応力を算定すれば、掘削の進行に伴うコンクリートの剛性の変化も評価できるものと考えられる。

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + R_i \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \cdot (E_{ci} + E_{ci-1}) / 2 \quad (4)$$

ここに、 σ_i : iステップにおけるコンクリートの応力 (kgf/cm²)

E_{ci} : iステップにおけるコンクリートの静弾性係数 (kgf/cm²)

ε_i : iステップにおけるコンクリートの応力ひずみ

R_i : iステップにおけるコンクリートの弾性係数低減率

3.3 切梁軸力の算定

SRC切梁に導入される軸力は、式(4)の応力から求められるコンクリートの分担軸力、および各部材の応力ひずみから求められる各分担軸力を算定し、これらの合成軸力として求めることができる。その結果を図-6に示す。同図から、打設初期にはコンクリートの水和熱の発生に伴う体積変化により、切梁には圧縮力が導入されることが分かる。この打設初期の圧縮力

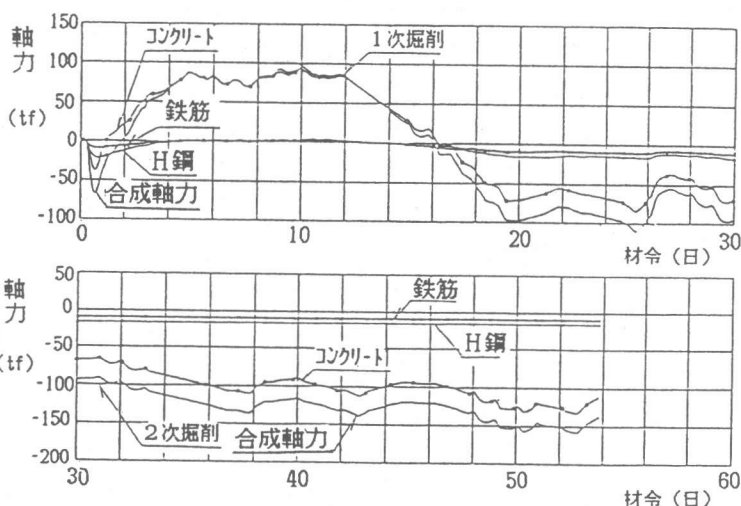


図-6 切梁軸力の算定結果

は、各部材が最高温度に到達する材令において最大値を示し、材令約 0.8日で約68tfの軸力が導入されている。その後、この圧縮力は温度降下とともに次第に減少し、材令約2日で引張力に移行後、材令約5日ではほぼ一定値となっている。この打設初期の切梁軸力の変動は、同図に見られ

るように、その大部分がコンクリートの軸力によるものであり、H鋼および鉄筋による影響は比較的小さいことが分かる。

また、同図から、掘削の進行に伴い圧縮力が次第に導入されていくことが分かる。本計測では掘削に伴う軸力の変化は、1次掘削時で約180tf、2次掘削時で約50tfであった。

3.4 施工管理のための軸力算定方法に対する検討

前述したように、切梁の導入軸力は、その構成部材であるコンクリート、H鋼および鉄筋に導入される軸力の合成力として算定することができる。しかし、実施工においては、すべての切梁に対して、本計測断面のように各部材のひずみを計測することは施工性および経済性の点から困難である。このため、切梁軸力の施工管理方法として、これら構成部材のうちから一つを選定して、その計測結果をもとに切梁の導入軸力を評価する方法について検討を行った。

図-7は、SRC切梁の変形をモデル化したものである。このうち、(a)図は地下連続壁によって両端で変形が拘束される切梁に、温度変化 ΔT が生じた場合の変形状態を示したものである。物理的特性の異なる部材で構成される切梁は、両端の地下連続壁により断面内では平面保持の仮定が成立し、同図に示すように、一様な見掛けひずみ ϵ_{mt} が生じる。

このとき、切梁の各部材には熱膨張係数のことによって以下に示す応力ひずみおよび応力が発生する。

$$\epsilon_{st}^n = \epsilon_{mt} - \epsilon_f^n \quad (5)$$

$$\sigma_f^n = \epsilon_{st}^n \cdot E^n$$

$$= (\epsilon_{mt} - \Delta T \cdot \alpha^n) \cdot E^n \quad (6)$$

ここに、 ϵ_{st}^n ：熱膨張係数の差による応力ひずみ

ϵ_{mt} ：温度変化による切梁の見掛けひずみ

ϵ_f^n ：温度変化による各部材の自由変形ひずみ

σ_f^n ：温度変化による応力 (kgf/cm²)

E^n ：各部材の弾性係数 (kgf/cm²)

ΔT ：各部材の温度変化量 (°C)

α^n ：各部材の熱膨張係数 (1/°C)

[n=S：鉄筋，=H：H鋼，=C：コンクリート]

一方、(b)図は実際の切梁における実際の変形を示したものであり、各計測器からはこの見掛けひずみが実測値として計測される。従って、この実測される見掛けひずみから、外力によって生じる応力ひずみおよび応力は、それぞれ次式で与えられる。

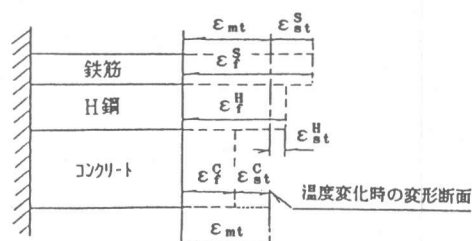
$$\epsilon_{sr} = \epsilon_m - \epsilon_{mt} \quad (7)$$

$$\sigma_r^n = (\epsilon_m - \epsilon_{mt}) \cdot E^n \quad (8)$$

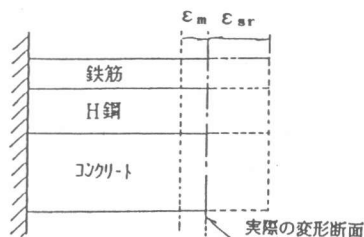
ここに、 ϵ_{sr} ：外力による応力ひずみ

ϵ_m ：切梁の実測ひずみ

σ_r^n ：外力による応力 (kgf/cm²)



(a) 温度変化に伴う変形



(b) 実際の切梁における変形
(温度変化+外力)

図-7 切梁における変形のモデル化

実際の切梁の各部材には、これら2つの応力が同時に作用しているため、切梁の各部材に作用する軸応力は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma^n &= \sigma_t^n + \sigma_r^n \\ &= (\varepsilon_m - \Delta t \cdot \alpha^n) \cdot E^n \quad \text{----- (9)}\end{aligned}$$

ここに、 σ^n ：切梁の各部材に作用する軸応力 (kgf/cm²)

従って、温度変化および外力によって切梁に導入される軸力は、各部材の弾性係数および熱膨張係数が得られると、構成部材のうちのひとつの見掛けひずみを計測することによって、次式から算定することができる。

$$\begin{aligned}N &= \sigma^C \cdot A^C + \sigma^H \cdot A^H + \sigma^S \cdot A^S \\ &= \varepsilon_m \cdot (A^C \cdot E^C + A^H \cdot E^H + A^S \cdot E^S) \\ &\quad - \Delta T \cdot (\alpha^C \cdot A^C \cdot E^C + \alpha^H \cdot A^H \cdot E^H + \alpha^S \cdot A^S \cdot E^S) \quad \text{----- (10)}\end{aligned}$$

ここに、N：切梁に導入される軸力 (tf)

A^n ：各部材の断面積 (cm²)

図-8に、上式を用いて各部材の見掛けひずみから求めた合成軸力の算定結果を、各計測値から求めた合成軸力とともに示す。なお、式中のコンクリートの弾

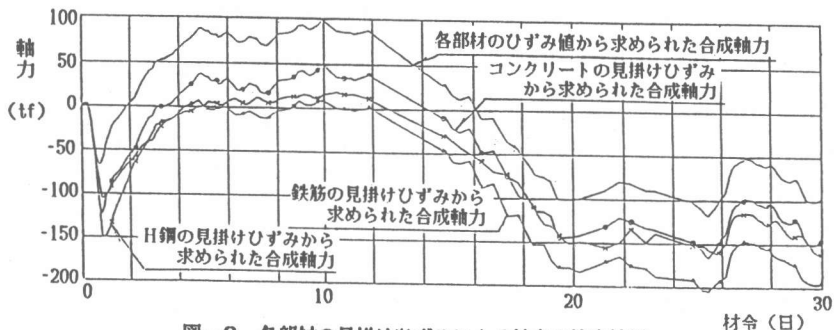


図-8 各部材の見掛けひずみによる軸力の算定結果

性係数は前述した有効弾性係数を用いる。同図から、各部材の見掛けひずみから求められた合成軸力は、いずれも各計測値から求めた合成軸力に比べ圧縮側の値となっており、打設初期の温度変化により切梁に導入される軸応力の算定方法に問題があるものと考えられる。すなわち、上式では、見掛けひずみから直接コンクリートの応力算定を行うため、打設初期に導入される圧縮応力が過大評価される。また、各部材による算定値を比較すると、H鋼および鉄筋の見掛けひずみから求められた合成軸力は、コンクリートの見掛けひずみから求めたそれに比べ誤差がかなり大きくなった。この原因は、切梁中の鋼材の占める断面積が小さいため、それらの測定誤差が合成軸力の算定結果に大きく影響を及ぼすためである。このため、切梁断面の大部分を占め、しかも物性値が変動するコンクリートの計測値が切梁の合成軸力を算定するのが最も好ましいと考えられる。

いま、コンクリートの計測値により切梁軸力を算定する方法に対して、打設初期における算定精度を高めることを目的とし、増分法により求めたコンクリートの応力を用いると、式(10)は次のように整理できる。

$$\begin{aligned}N &= \sigma^C \cdot A^C + \varepsilon_e^C \cdot (A^H \cdot E^H + A^S \cdot E^S) \\ &\quad + \Delta T \cdot \{ (\alpha^C - \alpha^S) \cdot E^S \cdot A^S + (\alpha^C - \alpha^H) \cdot E^H \cdot A^H \} \quad \text{----- (11)}\end{aligned}$$

ここに、 σ^C ：式(4)の増分法により算定したコンクリートのひずみ

ε_e^C ：コンクリートの応力ひずみ

図-9に、上式を用いて算定した合成軸力を、各部材の測定値から求めた合成軸力とともに示

す。同図に示すように、両者は非常によく一致しており、コンクリートの応力ひずみから式(11)を用いて切梁の軸力を精度良く算定できることが分かる。

以上の結果から、コンクリート、H鋼および鉄筋との複合構造物であるSRC切梁に導入される軸力は、これらの構成部材の一つであるコンク

リートのひずみを計測することによって比較的精度良く推定できることが分かった。しかし、この場合、切梁断面内の温度勾配による内部拘束応力を消去でき、しかも鉄筋の影響のない位置にひずみ計を設置する必要があるほか、打設初期のコンクリートの発生応力を正しく評価するため、増分法によりコンクリートの応

力を算定することが必要である。図-10に、切梁中のコンクリートの応力ひずみおよび増分法により求めた応力からSRC切梁に導入される軸力を算定するフロー図を示す。

4. まとめ

立坑掘削におけるSRC切梁の軸力算定に対して計測と解析を行い、現場における軸力管理のための計測方法とその解析方法について検討を行った。本論文で提案した軸力の算定式は、一現場の計測結果から求められたものであり、その妥当性については、今後も引き続き他の現場において計測を行い検討する必要があると考えられる。

また、本計測で対象としたSRC切梁の場合、施工位置が地下で高湿度の環境条件下であること、しかも施工管理上必要とされる切梁軸力の計測期間が一般に短いことから、乾燥収縮による影響はほとんどないものと考えられるが、本計測結果から得られた算定方法を、このような立坑切梁以外の一般的な複合部材に適用するためには、立坑切梁以外の複合部材について同様の計測を行い、その適用性を検証する必要があると思われる。

【参考文献】 1) . 竹下, 浅沼, 横田: ボックスカルバートの温度応力の実測と解析, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986年 6月。

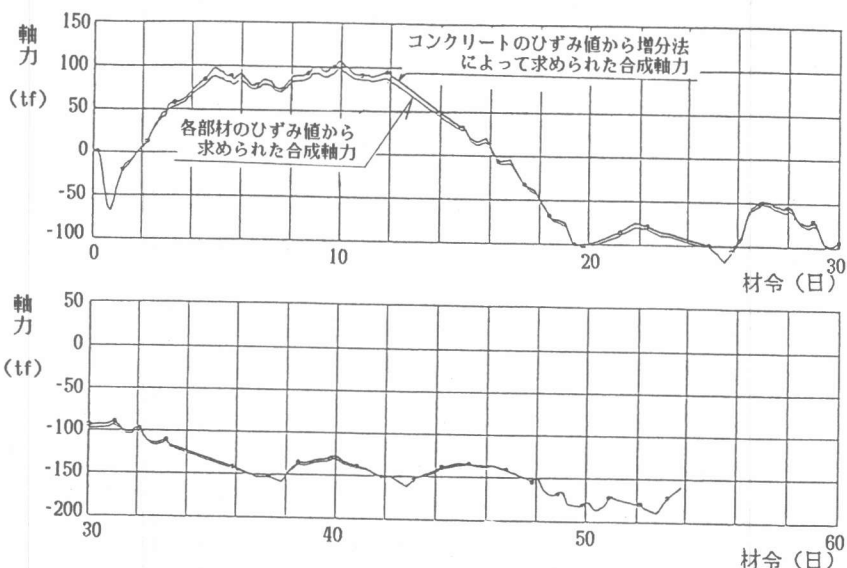


図-9 切梁軸力の算定結果の比較

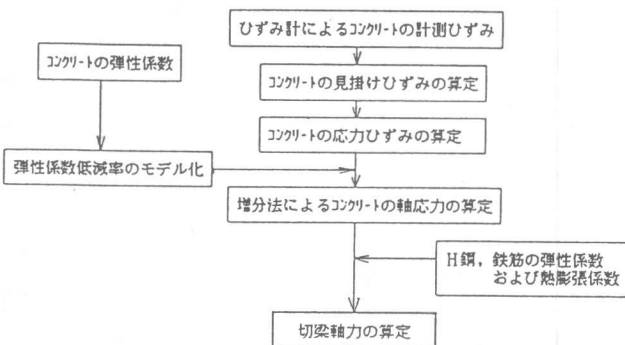


図-10 SRC切梁の軸力算定フロー図