

論文 暴露面と水掛かりに応じたコンクリートの収縮ひずみの算定手法に関する解析的検討

大野 又稔*1・渡辺 健*2・石田 哲也*3

要旨：ファイバーモデルによりコンクリート構造物の長期変形を評価する際のコンクリートの収縮ひずみについて、既往の収縮ひずみ予測式と暴露面および水掛かり面が異なる条件における算定手法を検討した。3次元材料-構造連成応答解析システムにより算出した、暴露面および水掛かり面が異なる条件での収縮ひずみについて、既往の予測式の部材厚 H を有効部材厚 H_a に置き換え、提案式により水掛かりの程度の影響を表す係数 k_r を算定することで、乾燥および水掛かり条件下でのコンクリートの収縮ひずみを、既往の予測式と同等の精度で算定できることを確認した。

キーワード：収縮ひずみ, 長期変形, 水掛かり, マルチスケール解析

1. はじめに

コンクリート構造物は、コンクリートの収縮・クリープにより長期的な変形が生じるため、設計における不静定力算定やたわみの照査においては、収縮・クリープの予測が重要となる。収縮・クリープは、配合、材料、寸法、乾燥面積、外気温度、外気湿度に依存し、特に供用環境下においては水掛かりの影響を大きく受ける。

PC 桁の部位ごとの収縮挙動の差異を考慮して、長期的な変形を予測する手法として、ファイバーモデルに部位ごとの収縮・クリープ挙動を入力する手法がある¹⁾。ファイバーモデルに入力する部位ごとの長期の収縮ひずみとして、3次元材料-構造連成応答解析システム DuCOM-COM3²⁾に基づき、セメント種類や水掛かりの影響を考慮できる予測式が提案されている³⁾。これは、PCT 形桁や PC 箱桁の部位ごとの条件として、対称 2 面が外気に暴露され、内 1 面に水掛かりが作用する条件を想定して定式化された予測式である。一方、他のコンクリート構造物として、PC 下路桁や柱等、暴露面と水掛かり条件が異

なる部位の予測手法は確立されていない。

本研究では、ファイバーモデルによりコンクリート構造物の長期変形を予測する際の収縮ひずみについて、暴露面と水掛かり条件に応じた、収縮ひずみの算定手法の確立を目的とした。具体的には、DuCOM-COM3 を用いて、暴露面と水掛かり条件に応じた収縮ひずみを算出し、既往の予測式における因子ごとの特性を考慮して、既往の予測式を活用した算定手法を検討した。

2. 解析概要

コンクリート構造物の部位ごとに、供用環境下において生じる可能性がある暴露、水掛かり状況を想定し、解析モデルの断面形状および水掛かり条件を選定した。図-1 に、解析モデルの形状および水掛かり条件と対応するコンクリート構造物の部位の例を示す。表-1 に、解析ケースを示す。モデルの寸法は、既往の検討³⁾における基本部材厚 400mm のモデルを基準とし、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】⁴⁾の部材断面の収縮を一

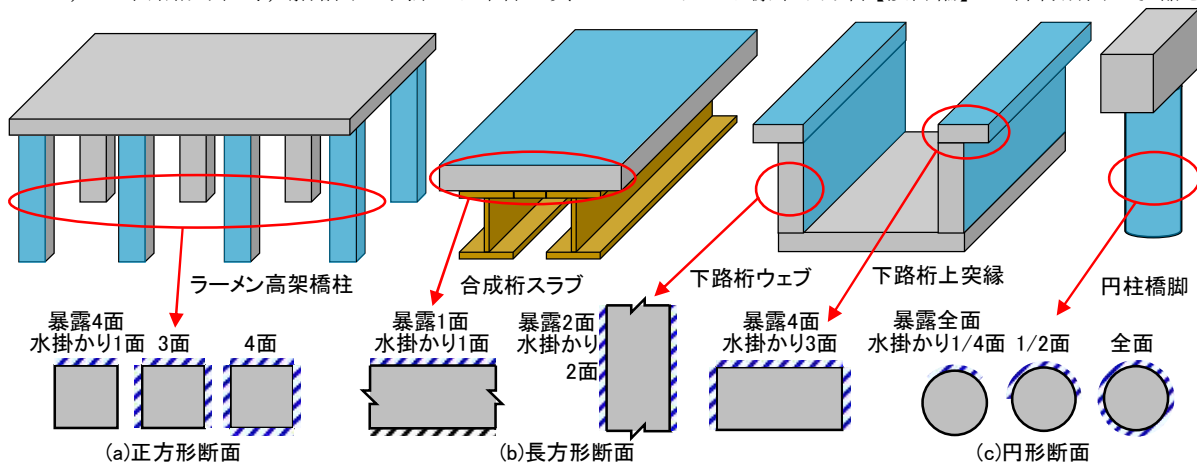


図-1 解析モデルの形状および水掛かり条件と対応するコンクリート構造物の部位の例

*1 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (正会員)

*2 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

様と仮定して算定する場合の収縮ひずみの予測式における、有効部材厚の計算値をパラメータとして設定した。暴露水掛かりケース名は、上面、左側面、右側面、下面の暴露条件（外気に暴露または封かん）と水掛かり条件（暴露面が常時乾燥または水掛かりあり）を示しており、Dは乾燥面、Sは封かん面、Rは水掛かり面を示す。

図-2に、解析モデルの例を示す。解析モデルは、X方向およびY方向に解析対称面を設けた1/4モデルとし、要素寸法等は既往の検討³⁾を参考に設定した。コンクリートの入力値は、普通ポルトランドセメント、水結合材比0.5、単位水量160kg/m³、骨材収縮ひずみ800μとし、使用材料の入力値と合わせて既往の検討³⁾を参考に選定した。乾燥開始時材齢 $t_0=7$ 日までは封かん養生とし、温度20℃一定、外気相対湿度55%、水掛かりによる液状水作用時間は28日ごとに連続4日とした。なお、既往の検討³⁾と同様、液状水作用時間においては、雰囲気湿度を100%とし、さらに水蒸気移動係数を500倍に設定して、液状水の水分移動速度が大きいことを考慮した。乾燥条件のケースでは100年間、水掛かり条件のケースでは20年間の解析を実施した。平面保持が概ね成立している解析対称面から要素1列分のX方向のひずみを出力し、断面積で重みづけした平均値により収縮ひずみを算出した。

3. 解析結果

3.1 乾燥条件下のコンクリートの収縮ひずみ

図-3に、乾燥条件下の乾燥開始後からのコンクリートの収縮ひずみ $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ の数値解析による解析値を示す。 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ は、乾燥開始時材齢 t_0 から、時刻 t までの収縮ひずみを示す。凡例の冒頭は、形状ケース名と暴露水掛かりケース名の番号を示す。100年時点の収縮ひずみを比較すると、部材厚 H の大きいケース2-1と有効部材厚 H_d の大きいケース3-4が他ケースよりもひずみが小さい結果となった。また、部材厚 H が400mmのケース1-1、3-1、3-4、5-1、6-1を比較すると、有効部材厚 H_d が小さいほど収縮ひずみが早く増加していることが分かる。

ここで、既往の収縮予測式³⁾を式(1)、式(2)、式(3)に示す。記号等は、文献³⁾と同じである。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \epsilon'_{cs\infty} \times \left[\frac{t - t_0}{\beta + (t - t_0)} \right] \quad (1)$$

$$\epsilon'_{cs\infty} = k_r \times 600 \times (H/H_k)^{-1/10} \times k_c \times (W/B)^{1/2} \times (RH/100)^{-1} \times k_{t0} \times k_{ag} \quad (2)$$

$$\beta = 2700 \times (H/H_k)^{1/3} \times (W/B)^3 \quad (3)$$

ここで、 $\epsilon'_{cs\infty}$ ：収縮ひずみの最終値(μ)、 β ：収縮ひずみの経時変化特性を表す項、である。

本検討における解析条件においても、既往の検討³⁾と同様に分数関数による近似精度が高かったため、解析結果の $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ を、最小二乗法により式(1)で近似し、2変数

表-1 解析ケース

形状ケース名	部材厚 [mm]	幅 [mm]	長さ [mm]	有効部材厚 [mm]	暴露水掛かりケース名	暴露面-水掛かり面	
1_S400-400	400	400	1200	200	1_DDDD	4-0	
					2_RDDD	4-1	
					3_RRRD	4-3	
					4_RRRR	4-4	
2_S800-800	800	800	2400	400	1_DDDD	4-0	
					2_RDDD	4-1	
					3_RRRD	4-3	
					4_RRRR	4-4	
3_L400-1200	400	1200	1200	1_DSSD	2-0		
				2_RSSD	2-1		
				3_RSSR	2-2		
				4_DSSS	1-0		
				5_RSSS	1-1		
4_L200-600	200	600	600	400	1_DSSS	1-0	
					2_RSSS	1-1	
5_L400-600	400	600	1200	240	1_DDDD	4-0	
					2_RRRD	4-3	
6_L400-1200	400	1200	1200	300	1_DDDD	4-0	
					2_RRRD	4-3	
7_C400	円形	直径400	直径400	1200	200	1_DDDD	全-0
						2_RDDD	全-1/4
						3_RRRD	全-1/2
						4_RRRR	全-全

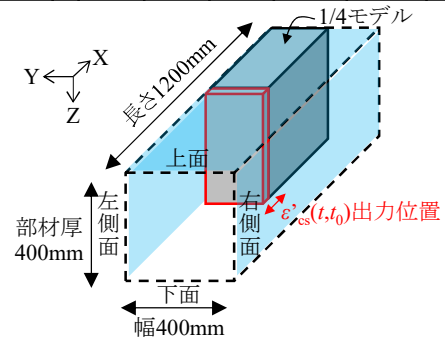


図-2 解析モデルの例(ケース1-3_S400-400_RRRD)

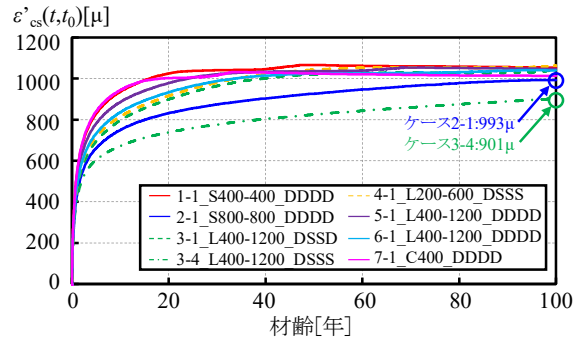


図-3 乾燥条件下の収縮ひずみ

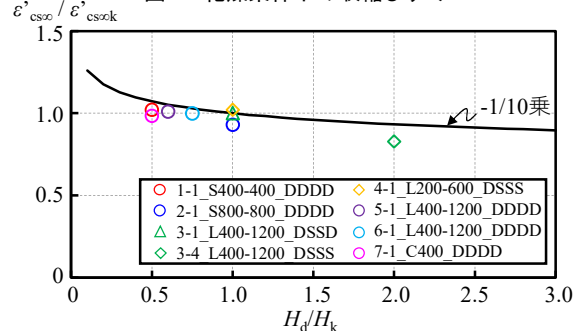


図-4 $\epsilon'_{cs\infty}$ と有効部材厚との関係

$\epsilon'_{cs\infty}$ と β を分析した。図-4に、有効部材厚 H_d と基本部材厚 H_k (=400mm)の比を横軸に、近似した $\epsilon'_{cs\infty}$ と基準とするケース3-1の $\epsilon'_{cs\infty k}$ の比を縦軸に示す。ここで、既往の検討³⁾における2対面暴露条件においては、有効部材厚 H_d と部材厚 H が等価となるため、式(2)中の $(H/H_k)^{-1/10}$ も合わせて示す。いずれの解析結果においても、 $(H/H_k)^{-1/10}$ と概ね一致しており、式(2)中の部材厚 H に、有効部材厚 H_d を入力することで、2対面以外の暴露条件

においても、 ε'_{cs} を表現できることが考えられる。ここで、コンクリート部材の収縮ひずみは、部材表面のコンクリートの水分逸散による収縮駆動力に対し、部材内部のコンクリートが抵抗体として作用するため、内力が均衡した状態でのひずみとなる。部材表面のコンクリートでは、内的拘束の引張応力により引張クリープひずみが発生し、経時的に応力は減少する。部材内部のコンクリートでは、水和の進行による強度増進に伴い、抵抗がより大きくなる。解析では収縮とクリープを分離せずに出力できるため、部材厚 H が大きく、さらに拡散理論における拡散距離が大きい（有効部材厚 H_d が大きい）ほど、100年時点の収縮ひずみだけでなく、 ε'_{cs} も小さくなると考えられる。部材厚増加による拘束の効果と、有効部材厚増加による拘束の効果は、一律ではないと考えられるものの、図-4の精度で表現できていることから、既往の収縮予測式³⁾に準じて算定可能と考えられる。

図-5に、有効部材厚 H_d と H_k の比を横軸に、近似した β と基準とするケース 3-1 の β_k の比を縦軸に示す。また、式(3)中の $(H/H_k)^{1/3}$ も合わせて示す。有効部材厚の大きいケース 3-4 で若干の乖離がみられるが、 $(H/H_k)^{1/3}$ と概ね一致しており、式(3)中の部材厚 H に、有効部材厚 H_d を入力することで、2対面以外の暴露条件においても、 β を表現できることが考えられる。ここで、収縮ひずみの経時変化特性を表す β は、拡散理論における拡散距離に依存して変化することが考えられる。水分移動係数を唯一の値とした拡散理論の場合には、有効部材厚の 1/2 乗に比例すると考えられるため、図-5 でも有効部材厚が小さく水分逸散が短期で収束する部材においては、1/2 乗に近い傾向にあることが分かる。一方、有効部材厚が大きく水分逸散が長期間継続する部材においては、水和の進行による水分移動係数の変化に伴い、1/2 乗から乖離して 1/3 乗に近い傾向となっている。部材厚が大きい条件における整合性を考え、既往の収縮予測式³⁾と同様に β は 1/3 乗で表現することとした。

式(2)、式(3)の部材厚 H に有効部材厚 H_d を入力し、式(1)により $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ を算定した。図-6に、乾燥条件下の $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の数値解析による解析値と予測式による算定値の比較を示す。乾燥開始直後において、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ が若干小

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ [μ]

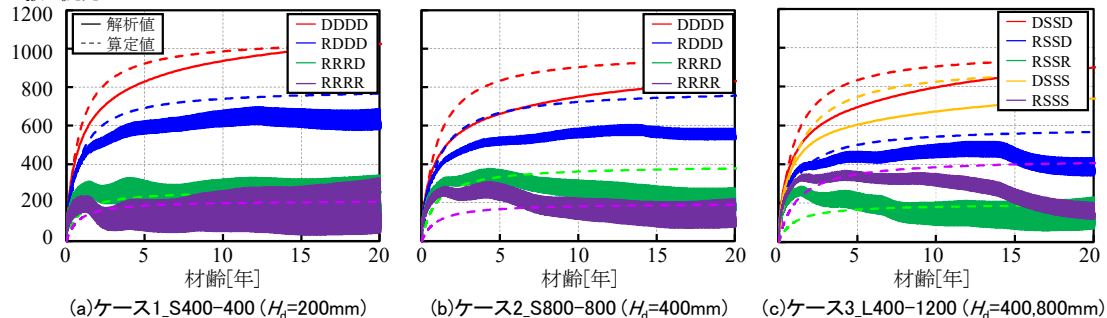


図-7 水掛り条件ごとの $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の経時変化の例

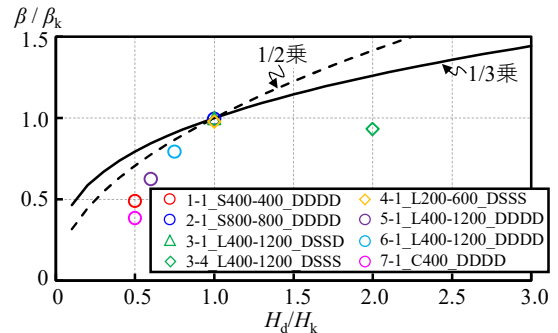


図-5 β と有効部材厚との関係

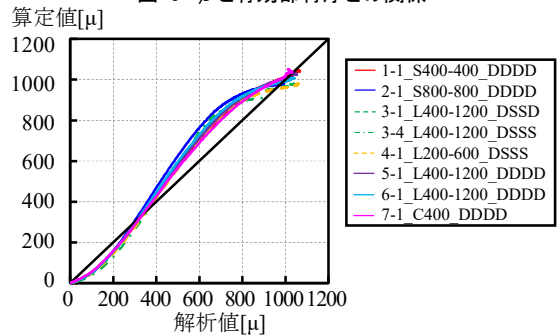


図-6 乾燥条件下の $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ の算定精度

さく算定されるものの、100年間の長期的な収縮ひずみを概ね表現することができており、既往の予測式であるケース 3-1 と同等の精度で算定することができていることが分かる。すなわち、既往の予測式と同様、若材齢における評価には収縮ひずみを若干大きめに考慮する等の留意が必要であるが、乾燥条件下におけるコンクリート部材の収縮ひずみは、2対面以外の暴露条件においても、式(1)、式(2)、式(3)の部材厚 H に、有効部材厚 H_d を入力することで、既往の予測式と同等の精度で算定可能であることが分かった。

3.2 水掛り条件下のコンクリートの収縮ひずみ

図-7に、水掛り条件下の乾燥開始後からのコンクリートの収縮ひずみ $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ を示す。なお、水掛り条件の解析結果については、材齢1年までは全ステップ、材齢20年まではサイクルごとの最大値と最小値を結ぶ線で図化している。水掛り条件下においては、水掛り作用時に $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ が減少し、水掛り作用後の乾燥作用時に $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ が増加する挙動を繰り返しながら、それぞれ一定の範囲に収束していることが分かる。いずれのケースにおいても、水掛り面数の増加に伴い、 $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ が小さ

くなる傾向にあることが分かる。4面暴露のケース1とケース2を比較すると、部材厚が大きいケース2の方が、水掛かりによる $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ の低下の影響が小さいことが分かる。暴露面数が異なる、ケース3に着目すると、2面暴露、1面水掛かりのRSSDの $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ は、同じ有効部材厚と水掛かり面数であるケース2のRDDDの $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ よりも若干小さい。また、ケース3の2面暴露、2面水掛かりのRSSRの $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ は、ケース2のRRRRと同等となっている。すなわち、暴露面に対する水掛かり面の割合が高いほど、水掛かりによる $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ の低下の影響が大きい傾向にあることが分かる。

ここで、既往の収縮予測式³⁾では、式(2)中における水掛かりの程度の影響を示す係数 k_r により、乾燥条件での ε'_{cs} を低減して水掛かり条件での $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ を表現している。既往の検討³⁾においては、対称2面が暴露され、内1面に水掛かりが作用する条件について、部材厚に応じた k_r が提案されている($H=1000\text{mm}$ で $k_r=0.8$ 、 $H=400\text{mm}$ で $k_r=0.6$ 、 $H=200\text{mm}$ で $k_r=0.5$)。なお、 k_r の値は、材齢2000日時点における、水掛かりなしの $\varepsilon'_{cs}(2000,7)$ と水掛かりありの $\varepsilon'_{cs}(2000,7)$ の比から定めており、より低下率の大きい(k_r が小さい)配合・環境条件($W/B=0.50$, $RH=55\%$)での結果に基づいて決定されている。

ここで、本検討での水掛かり影響を大きく受ける条件の場合、図-7(a)(b)のRRRDやRRRR、図-7(c)のRSSRのように、材齢5年程度まで $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ が増加した後、減少に転じる挙動がみられた。これは、部材の内部で水和による収縮が生じた後、部材表面からの水掛かりの影響により吸水膨張の挙動に転じたためと考えられ、既往の2面暴露、1面水掛かり条件でも部材厚が小さい場合に確認された挙動である。本来、このような挙動を単調増加である式(1)で表現することは正確ではないものの、特に100年間の長期的な収縮ひずみの挙動を概ね表現できることを目的として、既往の検討³⁾と同様に k_r のみで水掛かりの影響を考慮することとした。なお、収縮に転じた後での精度も考慮するため、材齢10年時点で k_r を算出することとした。

図-8に、材齢10年時点における、水掛かりなしの $\varepsilon'_{cs}(10\text{年},7)$ と水掛かりありの $\varepsilon'_{cs}(10\text{年},7)$ の比 k_r について、暴露面積と水掛かり面積の比を横軸に示す。部材寸法と暴露条件が同じ場合、暴露面積に対する水掛かり面積の比率が増加するに従い、概ね線形に k_r が減少していることが分かる。また、ケース1とケース2を比較すると、部材厚の増加に伴い、 k_r が増加する傾向にあることが分かる。ここで、既往の検討における、2面暴露、1面水掛かりの条件(水掛かり面積/暴露面積=0.5)での k_r の点と、乾燥条件(水掛かり面積/暴露面積=0)での $k_r=1.0$ の点を通る直線を、有効部材厚 H_d ごとに併記する。なお、

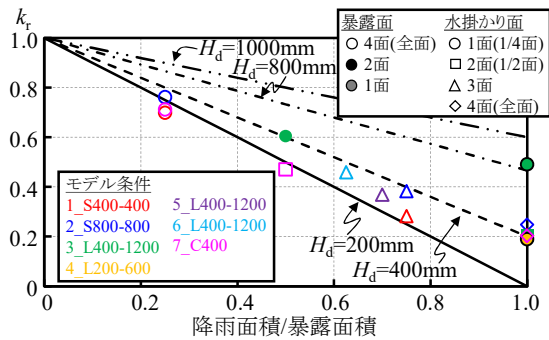


図-8 材齢10年における k_r と水掛かり面積/暴露面積の関係算定値 $[\mu]$

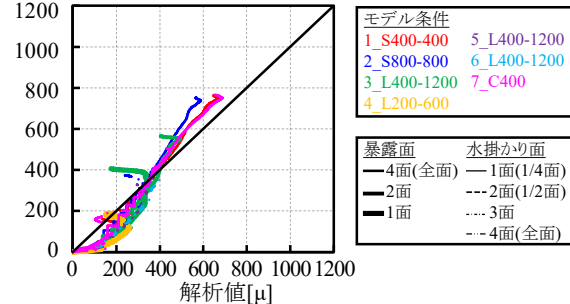


図-9 水掛かり条件下の $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ の算定精度

$H_d=800\text{mm}$ は、 $H_d=400\text{mm}$ と $H_d=1000\text{mm}$ の k_r を線形補完した直線を示す。 H_d が200mmのケース1,7では、 $H_d=200\text{mm}$ の直線に概ね一致していることが分かる。ただし、水掛かり面積/暴露面積が1.0のケースにおいては、 $k_r=0.2$ として乖離している。これは、今回の配合および環境条件では、水掛かりによる収縮ひずみの低減効果に上限がある可能性が考えられた。また、 H_d が400mmのケース2,3(2面暴露)、4では、 $H_d=400\text{mm}$ の直線に概ね一致し、 H_d が800mmのケース3(1面暴露)では、 $H_d=800\text{mm}$ の直線に概ね一致している。すなわち、 k_r は、有効部材厚ごとに、水掛かり面積/暴露面積に応じて線形関係にあると考えられる。そこで、 k_r を式(4)で算定することとした。

$$\begin{aligned}
 k_r &= 1 - 0.4 \times A_{\text{水掛かり}} / A_{\text{暴露}} \quad (H_d=1000\text{mm}) \\
 &= 1 - 0.8 \times A_{\text{水掛かり}} / A_{\text{暴露}} \quad (H_d=400\text{mm}) \quad (4) \\
 &= 1 - A_{\text{水掛かり}} / A_{\text{暴露}} \geq 0.2 \quad (H_d=200\text{mm})
 \end{aligned}$$

ここで、 $A_{\text{水掛かり}}$:水掛かり面積(mm^2)、 $A_{\text{暴露}}$:暴露面積(mm^2)、である。なお、その他の H_d においては、 H_d に応じて式(4)を線形補間することとした。また、水掛かり面積は、設定した面の全長に渡るものとして考慮した。

式(4)で算定した k_r と、部材厚 H を有効部材厚 H_d とした式(1)、式(2)、式(3)により、水掛かり条件下の $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ を算定する。図-7に、解析値と合わせて算定値を併記する。また、図-9に、水掛かり条件下の $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ の解析値と算定値の比較を示す。水掛かりの影響を大きく受ける条件での若材齢で膨張へ転じるケースなど、特に若材齢において若干の差異があるものの、水掛かり面数や有

効部材厚に応じた 20 年間の長期的な収縮ひずみを概ね表現することができており、既往の予測式であるケース 3 (2 面暴露, 1 面水掛かり) と同等の精度で算定できていることが分かる。すなわち、既往の予測式と同様、若材齢における評価には収縮ひずみを若干大きめに考慮する等の留意が必要であるが、2 対面暴露, 1 面水掛かり以外の暴露, 水掛かり条件においても、式(4)により有効部材厚 H_d に応じた k_t を算定し、部材厚 H を有効部材厚 H_d とした式(1)(2)(3)を用いることで、水掛かり条件下のコンクリートの収縮ひずみを、既往の予測式と同等の精度で算定できることが分かった。

3.3 断面内の収縮差による曲率の影響

暴露条件および水掛かり条件が上下非対称な場合、部材断面には収縮差による曲率が発生する。図-10 に、3.2 の水掛かり条件が上下非対称な場合の材齢 10 年時点における、断面高さごとのひずみ分布の例を示す。いずれも平面保持が成立し、水掛かり面となる上面側のひずみが小さく、乾燥面となる下面のひずみが大きく、上反りの変形が生じていることが分かる。ここで、上下縁のひずみ差 ($\epsilon_{上縁} - \epsilon_{下縁}$) と部材高さ (部材厚 H) から、部材の曲率 ϕ を $\phi = (\epsilon_{上縁} - \epsilon_{下縁}) / H$ により算出する。図-11 に、断面内の収縮差による ϕ の経時変化を示す。部材厚の小さいケース 1 は、部材厚の大きいケース 2 よりも ϕ が大きく、また 1 面水掛かりとなる RDDD は、3 面水掛かりとなる RRRD よりも ϕ が大きい。これは、部材厚が小さく、収縮の駆動力となる乾燥面が多いほど、乾湿によるひずみが断面内で鋭敏に変化したためと考えられる。

既往の検討³⁾の PC 箱桁や PCT 形桁のスラブ、本検討の合成桁のスラブや下路桁の上突縁等、桁全体の高さに対して部材厚が十分小さい場合には、部位に生じる曲率が桁全体の変形に与える影響は小さいと考えられるため、部材軸方向の平均ひずみをファイバーモデルに入力することで、桁の長期変形を評価することが可能である。また、一般的なラーメン高架橋においては、張出しスラブの水切りや高架橋境の防水工などにより、柱は 4 面暴露, 4 面乾燥に近い条件と想定されるため、断面内の収縮差は生じにくいと考えられる。一方、仮に降雨の吹込み等による側面の水掛かりや、高架橋境からの雨水等の流下により、柱部材の水掛かり条件が非対称となる場合には、収縮差により生じる曲率が、柱部材の曲率や不静定力に影響を与える可能性が考えられる。そこで、収縮差による曲率の影響が大きいと考えられる水掛かり条件を想定し、構造物の設計に与える影響を検討した。

図-12 に、検討したラーメン高架橋の条件を示す。それぞれの柱は 4 面暴露の条件であり、中間柱においては、側方からの降雨の吹込み等により、1 面水掛かりの条件となり、端柱においては、高架橋端部上面からの雨水の

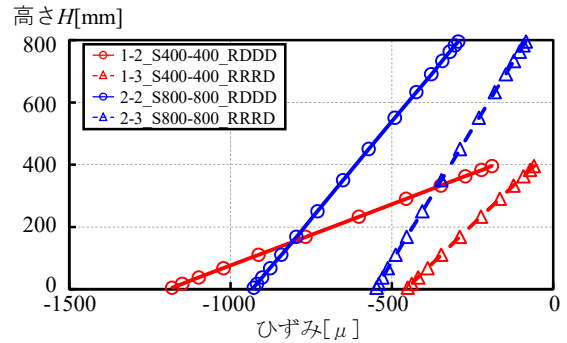


図-10 材齢10年における断面高さごとのひずみ分布

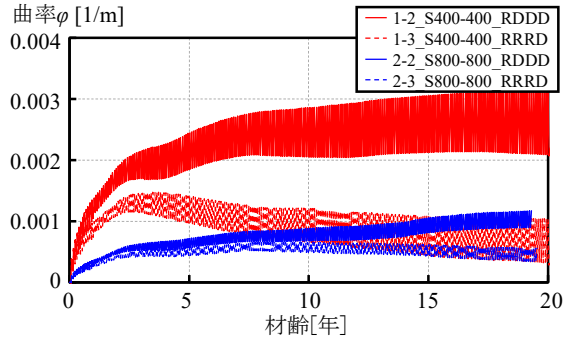


図-11 収縮差による曲率 ϕ の経時変化

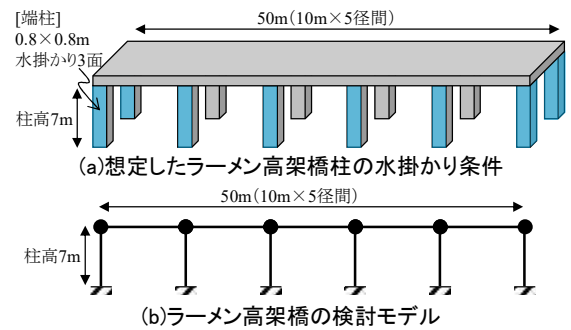
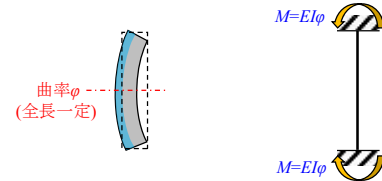


図-12 検討対象としたラーメン高架橋



(a)収縮差による変形 (b)収縮差によるモーメント

図-13 収縮差による変形およびモーメント計算方法

流下により、3 面水掛かりの条件であったと想定した。線路方向のラーメン構造に対して、水掛かり条件が非対称な端柱による影響を検討した。

図-13(a)に、図中の左側が水掛かり面となるとき、外部拘束がない状態での柱部材の収縮差による変形を示す。左側の収縮ひずみが水掛かりにより低減されるため、右側の収縮ひずみの方が相対的に大きくなり、左側に反る形となる。左右の収縮差は、柱全長にわたって一様となるため、断面の曲率 ϕ は、全長で一定となる。ここで、ラーメン高架橋のような不静定構造物の場合、この変形を拘束するように不静定力が生じる。本検討では、図-13(b)に示すように、柱の上下端を完全固定と仮定した条件において、断面内の収縮差による曲率を拘束するとき

の拘束力を試算し、傾向を把握した。柱全長にわたって曲率は一定であるため、柱断面の収縮差によって端部に発生する曲げモーメント $M_{\text{柱収縮差}}$ は、柱の曲げ剛性 EI により、 $M_{\text{柱収縮差}}=EI\varphi$ で算定できる。なお、実際のラーメン高架橋の柱では、柱上部は完全固定よりも拘束が弱いため、拘束力は低くなると考えられる。また、本検討では鉄筋拘束、クリープ、ひび割れの影響を考慮せず、線形な線材要素として収縮による影響のみを考慮しているため、実際の構造物の拘束力は、クリープやひび割れによる応力低減により試算値よりも低くなると考えられる。

また、ラーメン高架橋の縦梁の収縮により、端柱の基部には曲げモーメントが発生する。縦梁に収縮ひずみ $\varepsilon'_{\text{cs_縦梁}}$ が生じるときの、端柱下端の曲げモーメント $M_{\text{梁収縮}}$ は、線形解析では、柱の曲げ剛性 EI 、径間長 l 、高架橋高さ h 、係数 γ (一般的なラーメン高架橋の梁・柱の剛比では径間数と概ね等しい) により、 $M_{\text{梁収縮}} = \gamma \cdot (3EI \cdot \varepsilon'_{\text{cs_縦梁}} \cdot l / h^2)$ で算定される。

図-14 に、試算した $M_{\text{柱収縮差}}$ および $M_{\text{梁収縮}}$ を示す。なお、想定したラーメン高架橋の条件に合わせ、曲率 φ はケース 2 の RRRD の解析値、柱のヤング係数 E は 30kN/mm^2 、断面二次モーメント I は $3.14 \times 10^{10}\text{mm}^4$ ($800\text{mm} \times 800\text{mm}$ 断面)、 $\varepsilon'_{\text{cs_縦梁}}$ は式(1)の $\varepsilon'_{\text{cs}\infty}=300\mu$ 、 $\beta=500$ として計算し、径間長 l は 10m 、高架橋高さ h は 7m 、係数 γ は径間数の 5 として試算した。水掛かりによる断面内の収縮差により、端柱下端の曲げモーメントは、乾湿による増減を繰り返しながら、徐々に増加し一定の値に収束している。なお、 $M_{\text{柱収縮差}}$ の向きは、図-13(a)の向きの変形が生じる、図-12の左側の端柱下端においては、柱を外側に回転させる反時計回りとなる。一方、 $M_{\text{梁収縮}}$ は、縦梁の収縮に伴い、柱を内側に回転させる時計回り方向の曲げモーメントとなるため、単調減少する形となっている。算定した $M_{\text{柱収縮差}}$ と $M_{\text{梁収縮}}$ の合計で考えると、端柱の非対称な水掛かり条件による断面内の曲率を考慮した場合、梁の収縮により生じる不静定力を低減する方向に拘束力が作用するため、端柱下端の曲げモーメントは小さくなると考えられる。一方で、設計においては高架橋の境界部は接合工により防水する場合が多く、また通常の水掛かり面と同程度の水掛かり状況にならない可能性も考えられるため、本解析の条件とは一致しない場合もある。その場合、収縮差により生じる曲率が、ラーメン高架橋に与える影響は小さいと考えられるため、部材軸方向の平均ひずみをファイバーモデルに入力すればよいと考えられる。

4. まとめ

(1) コンクリート構造物の部位ごとの暴露条件および水掛かり条件を考慮し、3次元材料-構造連成応答解析

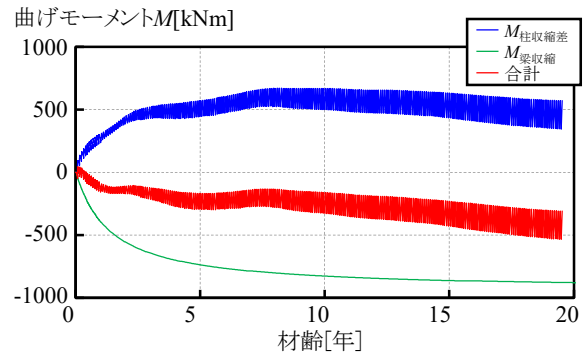


図-14 収縮差による曲げモーメントの経時変化

システム DuCOM-COM3 に基づく、コンクリートの収縮ひずみを算出した。

- (2) 乾燥条件下のコンクリート部材では、部材厚だけでなく乾燥面からの距離の影響により、100年間の最終収縮ひずみと収縮の経時変化が異なることを把握した。そして、既往の予測式における部材厚 H を有効部材厚 H_a に置き換えることで、既往の予測式と同等の精度で収縮ひずみを算定できることを把握した。
- (3) 水掛かり条件下のコンクリート部材では、暴露面と水掛かり面の数や部材厚により、収縮ひずみの経時変化が異なることを把握した。既往の算定式における水掛かりの影響 k_r を、材齢 10 年時点の乾燥条件下の収縮ひずみとの比で整理した結果、有効部材厚ごとに水掛かり面積と暴露面積の比と線形関係であることを評価し、暴露、水掛かり条件に応じた k_r の算定式を提案した。提案式により、既往の予測式と同等の精度で収縮ひずみを算定できることを把握した。
- (4) ラーメン高架橋の端柱において、水掛かり面が非対称で断面内の収縮差により曲率が生じる水掛かり条件の場合、梁の収縮による不静定力を低減する方向に拘束力が作用することを把握した。

参考文献

- 1) 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹: 断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No. 2, pp. 207-226, 2013.
- 2) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 3) 渡辺健, 中村麻美, 石田哲也, 渡邊忠朋: 混合セメントおよび水掛かりの影響を考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案, 土木学会論文集 E2, Vol.78, No.1, 105-120, 2022.
- 4) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, 2018.3.