橋りょうコンクリートの収縮挙動を数値計算で予測する



髙澤　昂生
Kosei Takazawa
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
研究員



橋本　龍
Ryu Hashimoto
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
研究員



渡辺　健
Ken Watanabe
研究開発推進部
コンクリート構造研究室
エキスパートマネージャー

はじめに

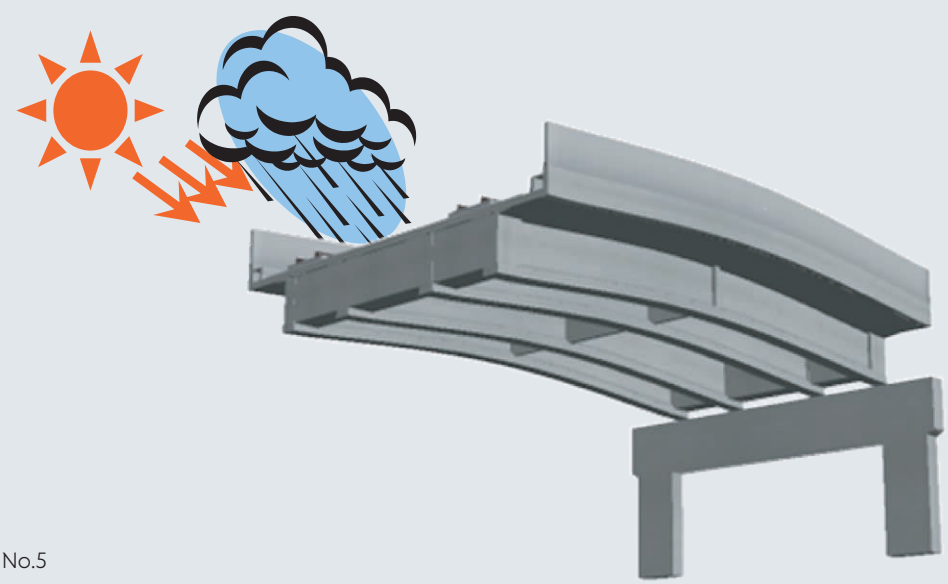
コンクリートは，雨や空気中の湿気，製作時に使う石や水の量などの影響を受けて，時間が経つと少しずつ縮む材料です。そのため，コンクリートでできた橋りょうでは，長い年月の間にたわみのような変形が少しずつ大きくなります（図1）。もし，予想以上のたわみが生じると，列車の走行安全性や乗り心地に影響が出るだけでなく，軌道のメンテナンスも大変になります。さらに，ひび割れが発生することで橋りょうの耐久性が低下する恐れがあります。このため，「もしもコンクリートが収縮したら」どうなるかを，あらかじめ予測することが重要です。

最近では，鉄道橋りょうにおいても技術革新による構造形式の多様化や支間の長大化などにより，橋りょうが使用される期間全体で，どのように変形するかを予測する技術の必要性が高まっています。このような背景の下，水分の状態や材料の配合に応じてコンクリートの収縮やそれによる変形を予測できる手法を開発しました[1)]。本稿では，この方法を用いて「もしもコンクリートが収縮したら」を紹介します。

コンクリートの収縮とは

そもそもコンクリートの収縮とは，時間の経過とともにコンクリートの体積が小さくなる現象を指します。代表的なものに，乾燥収縮が挙げられます。コンクリートは，見た目はかたい

図1　気象の影響によるコンクリート橋りょうの変形イメージ



石のようですが，実は内部には細かい隙間や水分が含まれています。乾燥収縮は，この内部の水分が外に出ていく（蒸発・逸散）ことで起こります。水分が抜けると，内部に引っ張られる力（毛細管張力）が生じ，コンクリート全体が縮むのです。

このように，水分はコンクリートの収縮の量に大きく関係します。そのため，部材ごとに乾燥易さが異なると収縮の量にも差が生じます。例えば箱桁構造を例にとると，雨にあたりやすい上床版と，雨にあたりにくく乾燥しやすい側壁や下床版では収縮の量が異なり，橋りょうが上に反るような変形が生じることがあります（図2）。

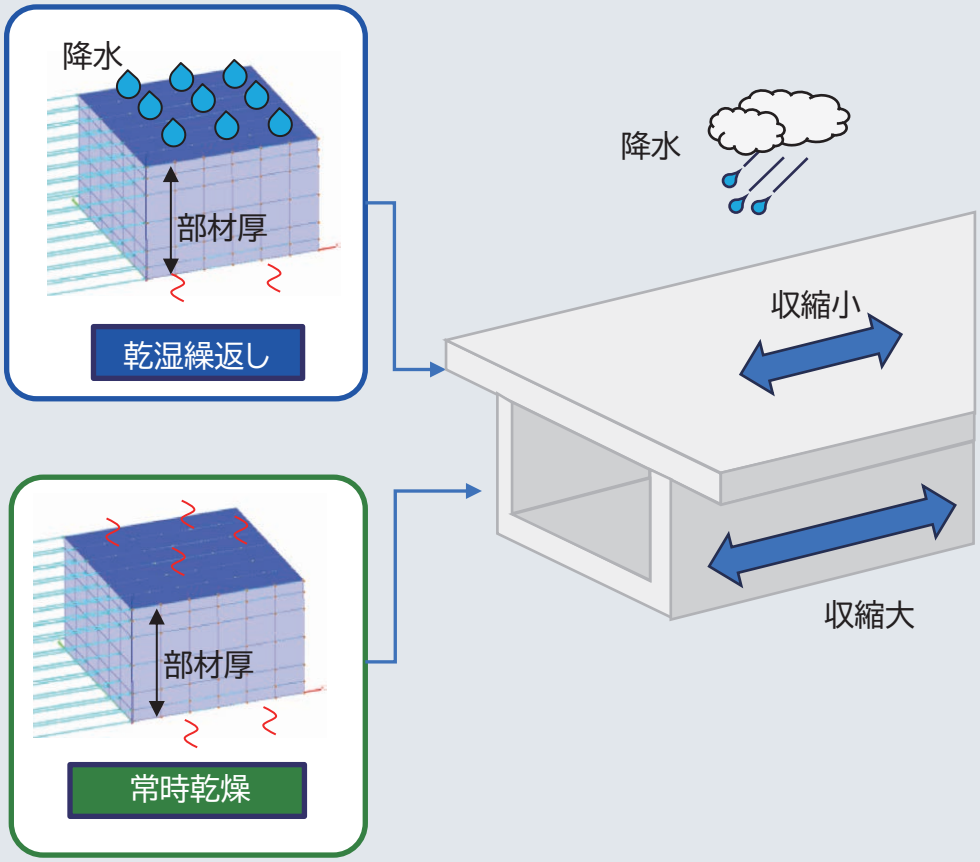


図2　箱桁でのコンクリート収縮

また，コンクリート単体であれば自由に収縮しますが，実際の構造物では鉄筋や隣接の部材，支承などによって動きが制限されます。そのため，内部に引張応力が発生し，ひび割れの原因になることもあります。

設計における予測方法

収縮ひずみの算出

コンクリートの収縮を予測するためには，橋りょうの全長に対してどれくらい縮むかといった変化率（ひずみ）をひずみ算定式を用いて計算します[2)]。ひずみの大きさは，コンクリートに含まれる水とセメントの割合や周囲の空気の湿度などに影響されるため，同じ形の橋りょうでも架橋する地点や条件によって最終的な収縮量は変わります。

全長が50mのコンクリート橋りょうを例えに試算してみます。これだけの長さのコンクリートは，変形量も大きくなります。例えば，100年後の収縮量を試算してみます。“もしも”雨があたるところとあたらないところを比較すると，約1.5cmの違いになります（図3）。つまり，橋りょうの断面をみると，雨があたる上床版に対して雨があたりにくい下床版は，より大きく収縮することになります。これによって，橋りょうの上下面の収縮量の違いなどにより，橋りょうは上向きに反るような変形が発生すると試算できます。

また，南北に長い我が国では，各地の年平均相対湿度が異なります。“もしも”年平均相対湿度が77%（例えば青森県）[3)]と，59%（例えば群馬県）[3)]で観測された条件で試算すると，同じ

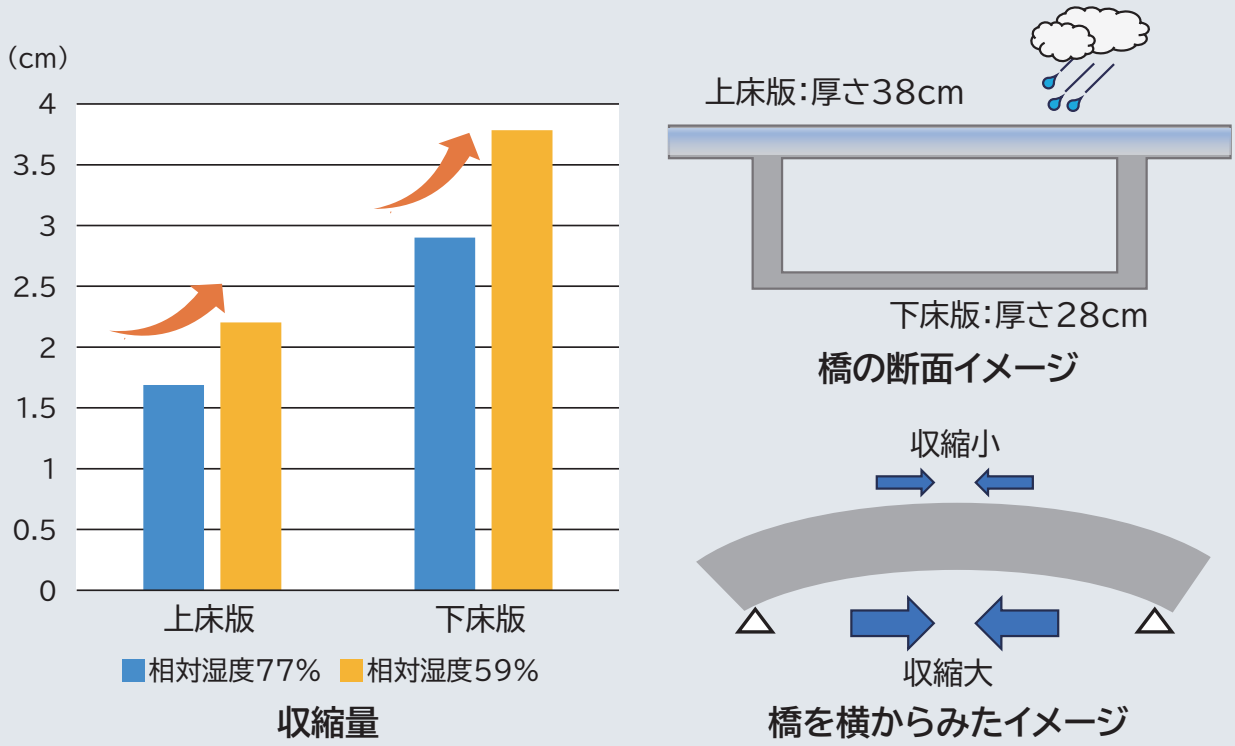


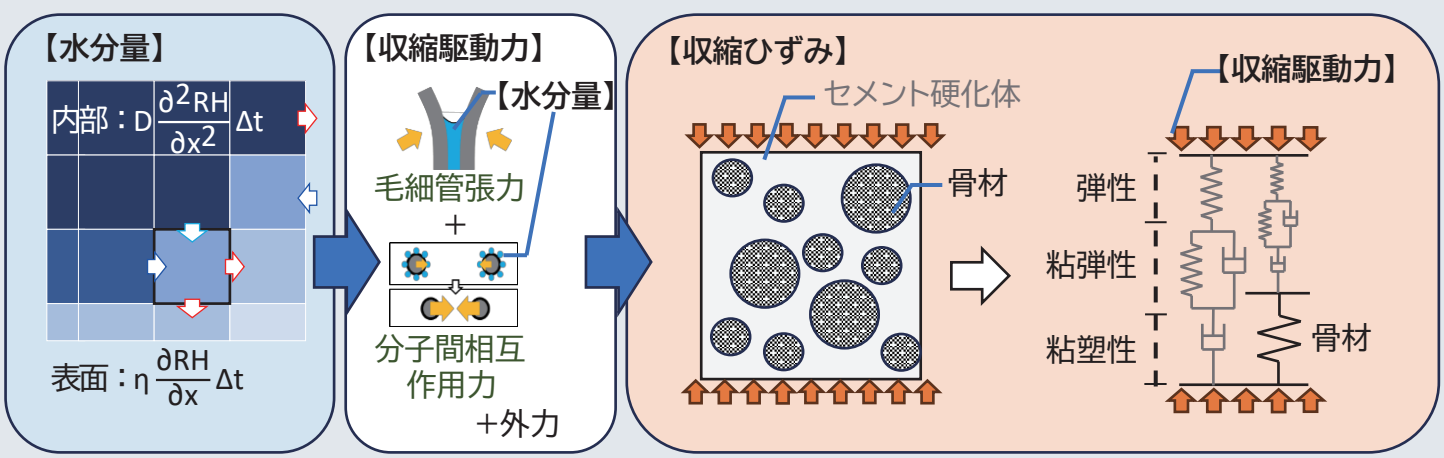
図3　100年後のたわみ量と橋の変形イメージ

コンクリートであっても約1cmの違いになります（図3）。同じ形の橋りょうの変形量は，地域差があることがわかります。

このように，コンクリートの収縮量を計算するためには，内部にある水分の状態を捉えることが重要です。そこで，今回，様々な断面形状や気象条件に対応し，コンクリート部材の変形（ひずみ）を予測するひずみ解析プログラム（以下，開発プログラム）を開発しました[1)]。

この開発プログラムでは，水が細かい隙間に引き込まれる現象（毛細管現象）に加えて，水の分子同士が引き合う力も考慮して収縮する力を計算します。さらに，コンクリートを構成するセメント硬化体や骨材の性質をモデル化

図4　開発したひずみ解析プログラムのモデルイメージ



し，全体の収縮ひずみを算出します。(図4)。この開発プログラムを用いて，厚さ400mmのコンクリート部材（両面から乾燥する条件）について，100年後までの変形を解析しました。その結果，精緻なシミュレーションで算出した値[2]とほぼ同等の値を予測できることを確認しました（図5）。

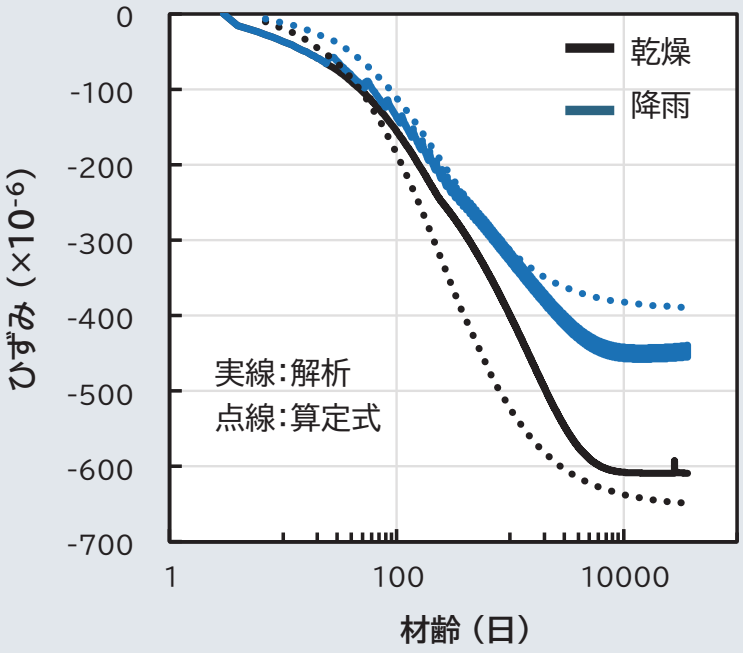


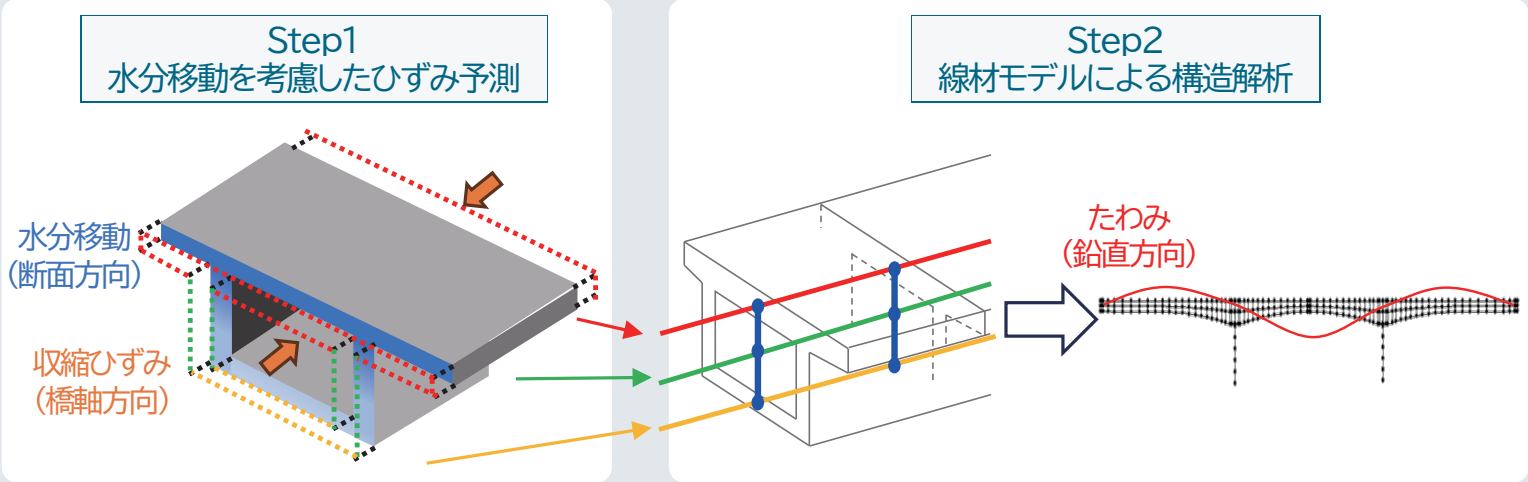
図5　ひずみ解析プログラムの検証

PC箱桁の長期たわみ予測

さて，もう少し開発プログラムを使って，“もしも”橋りょうが乾燥あるいは湿潤状態になるとどれくらいたわむのか，考えてみます。対象としたのは，鉄道で多く採用されている3径間の連続した箱桁ラーメン橋りょうです（図6）。この橋りょうの断面を，上・中・下の3層に分割して考えてみます。そして，それぞれの層でコンクリートが収縮する量を，開発プログラムで計算し，その違いによって橋りょうがどの程度たわむのか試算しました。

先述の通り，収縮の大きさは，雨が当たるかどうかや，橋の内部の湿り具合などによって変わります。そこで，雨の有無や当たり方，湿度などを変えて試算しました（図7）。解析の結果，全てが乾燥していると全体がほぼ一様に縮む事が分かりました。一方，橋の内部の水分状態を考慮すると，場所によって収縮量に違いが出ているのがわかります。つまり，断面内のひずみ差への影響は，環境条件が作用する部材面に応

図6　たわみ計算のステップ



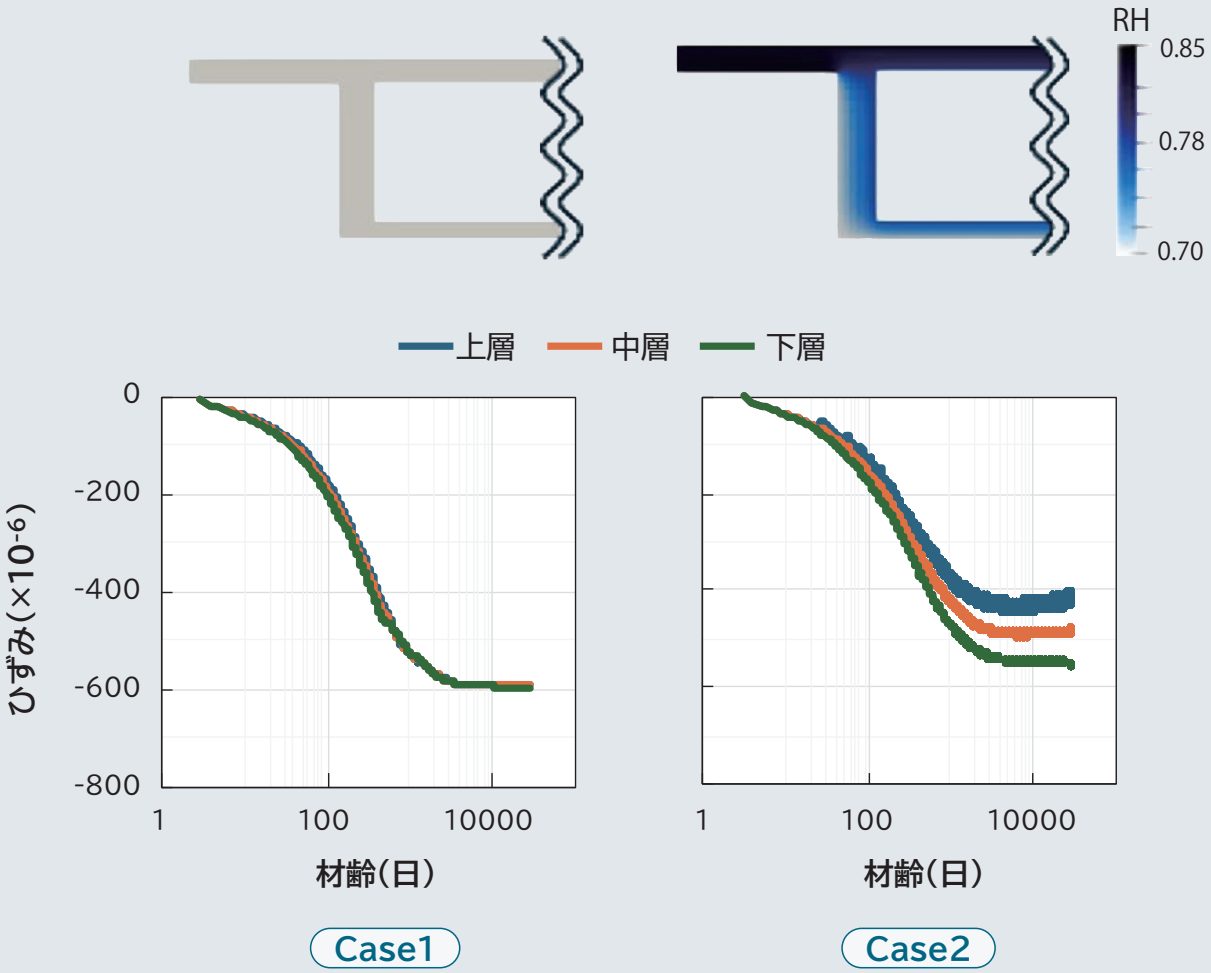


図7　水分条件による収縮差

じて大きく異なると考えられます。

算定したひずみを基に，線材モデルで鉛直方向のたわみを算定しました（図8）。図には，桁上に設備が設置された後約80年経過した時点での，橋りょうの中央部のたわみ量を示しています。その結果，乾燥状態を想定したCase 1と比較して，湿潤状態を想定したCase 2の方が，たわみが小さくなる結果となりました。このことから，水分の条件によって同じ構造であってもたわみ量が異なることが分かります。したがって，橋りょうのたわみを精度よく評価するためには，コンクリート内部の水分分布を適切に予測することが重要となります。

もしもたわみやひび割れが生じたら

橋りょうのコンクリートが収縮すると，長期的には橋りょうの変形やたわみが増大します。もしもたわみが増大すると，乗り心地の悪化や軌道保守の頻度増加につながります。また，海外では収縮やクリープによる過大な変形に起因して，橋りょうが落橋した事例も報告されています[4)]。

橋りょうのたわみ量が大きくなると，桁の下面に想定以上の曲げ引張力が発生し，ひび割れが発生します。さらに，橋りょうには可動支承が設置されていますが，もしも可動支承が種々の要因によって機能を喪失した場合，桁の収縮が拘束され，支承部にひび割れが発生します。これらのひび割れは，発生すると外部からの水分や塩分等の侵入経路となり，その結果，鉄筋が腐食し，長期的にコンクリートのはく落といった重大な損傷につながる恐れがあります。

これらの“もしも”を防ぐためには，設計段階においては橋りょうの長期的なたわみ量を適切

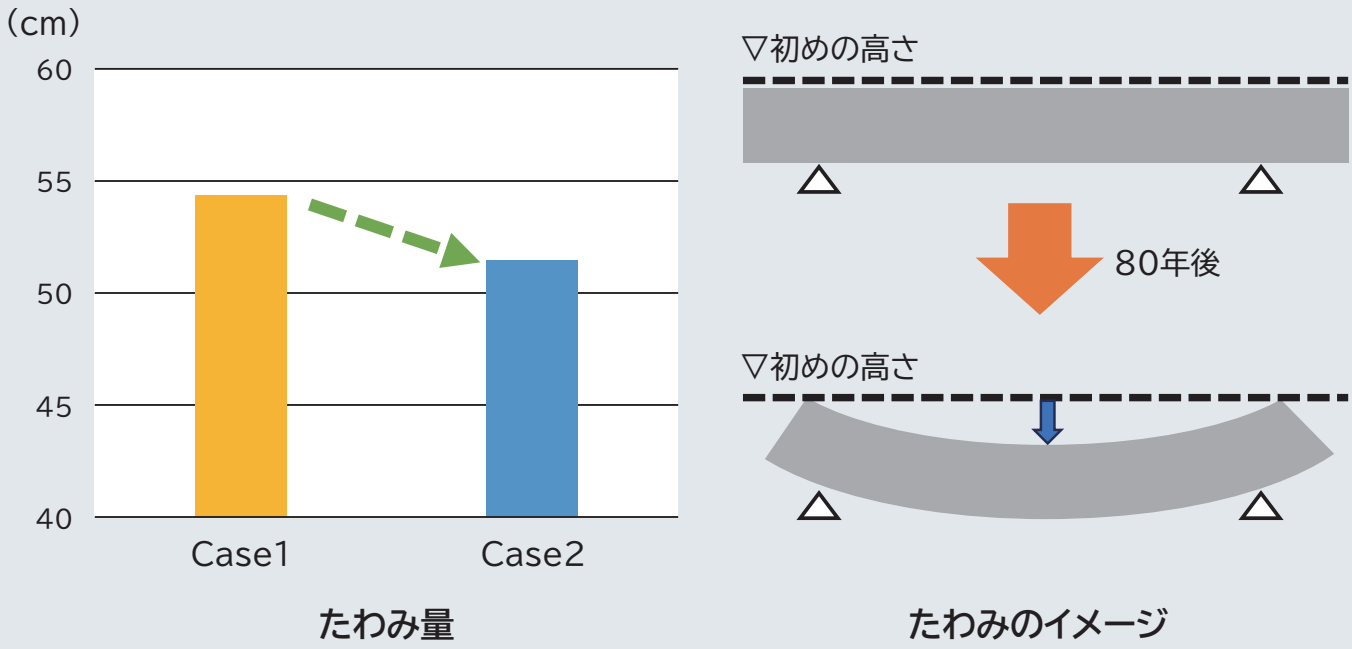


図8　水分条件によるたわみ差

に予測することが重要です。もしも過大なたわみが想定される場合，構造形式やスパンの見直しや，施工段階でのキャンバー設定といった対策を講じることが可能です。また，維持管理段階においても，ひび割れを確認した際，もしも今後収縮が進展した場合の影響を予測することで，余寿命や進展性を踏まえた合理的な管理が可能となります[5)]。

おわりに

水分条件や配合に応じたコンクリートの収縮を，それに伴う変形を予測する手法を開発しました。あわせて，気象条件がPC箱桁の長期たわみにおよぼす影響について検討しました。コンクリートの収縮は目に見えにくい現象でありながら，橋りょうの長期的な性能に大きな影響を及ぼします。特に鉄道橋りょうでは，走行安全性や乗り心地にも直結するため，「もしも橋りょうのコンクリートが収縮したら」という視点で構造物の将来の変形を予測し，建設および維持管理にフィードバックを行うことが重要です。RRR

文　献

1）橋本龍，渡辺健：水分状態と骨材・鉄筋による内部拘束を考慮したRC断面の収縮解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.1794-1799，2025
2）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，pp.105-120，2022
3）気象庁：過去の気象データ検索，https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/（閲覧日：2026年8月14日）
4）プレストレストコンクリート海外部会訳,Chris, B., Richard, S.著：コロールーバベルダオブ橋の崩壊の原因（上），プレストレストコンクリート，Vol.49，No.3，pp.64-69，2007.
5）髙澤昂生，渡辺健：供用PC桁支承部の構造性能と外観情報の関連評価，土木学会第81回年次学術講演会，V-390，2026