

論文 ASR を生じるプレテンション PC 梁の持続曲げ荷重による変形挙動

西田 峻*1・山本 貴士*2・高谷 哲*3

要旨 : PC 構造で ASR が生じる場合, 使用状態の外力に加え, 持続応力のプレストレスが作用するため, プレストレスやたわみへの影響を考える必要がある。本研究では, ASR が生じるプレテンション PC 梁の長期たわみ特性を明らかにすることを目的として, 反応性骨材を使用して作製したプレテンション PC 梁供試体に曲げひび割れ発生荷重付近の持続荷重を作用させ, たわみの時間的挙動を検討した。その結果, ASR 膨張の進行による反り上りの変形により, 健全 PC 梁の曲げ持続荷重下でのたわみの増加より小さくなった。

キーワード : ASR, プレテンション PC 梁, 持続曲げ荷重, クリープ変形, 鋼材拘束

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下, ASR)を生じたコンクリート構造物中の鉄筋破断の問題を受け, 部材あるいは構造物の安全性に関する検討が盛んに行われてきた。また, 耐久性に優れたコンクリートを持ち, プレストレスによってひび割れの発生が抑制あるいは制御されているプレストレスコンクリート(以下 PC)構造物は, ASR によるコンクリートの力学特性低下の影響が大きい可能性があり, 耐荷性能に関する研究例¹⁾が見られるようになった。

一方, ASR 劣化によりコンクリートの力学特性が変化することで, コンクリート構造物の使用性が低下する可能性もある。特に, PC 構造では, 使用状態での外力に加え, 持続荷重としてプレストレスが作用するため, 長期のプレストレスの変化やたわみ挙動への ASR の影響を考える必要がある。例えば, 持続荷重を受ける ASR 劣化コンクリートは, ひび割れの方向性から無載荷コンクリートより残存強度や剛性が大きくなることもあること²⁾, また, 湿潤状態にある ASR 劣化コアは, 持続荷重下でも膨張傾向を示すことが報告されている³⁾。さらに, プレテンション方式 PC 構造では, PC 鋼材とコンクリートの付着への ASR の影響も考える必要がある。

そこで本研究では, ASR 劣化が進行するプレテンション PC 梁部材の長期たわみ特性を明らかにすることを目的として, 反応性骨材を使用して作製したプレテンション PC 梁供試体に曲げひび割れ発生荷重付近の持続荷重を作用させ, たわみの時間的挙動を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験要因

まず本研究では, 別実験用に作製していた材齢約 1.5

年の促進膨張環境で ASR がある程度進行したプレテンション PC 梁供試体 (以下, ASR 進行供試体) に対し, 曲げひび割れ発生荷重付近の持続荷重を作用させ, たわみの挙動を測定した。一方, 死荷重などの永続作用は ASR 反応の開始とともに作用すると想定されるため, 養生後の初期の材齢から持続曲げ荷重を載荷する供試体 (以下, ASR 初期供試体) を新たに作製した。なお, プレテンション PC は, 比較的スパン長の短い構造形式に適用されるため, 死荷重などの永続作用の大きさはポストテンション PC よりも小さいことが想定される。このため, 載荷を行わない (載荷無の) 供試体も作製し, 反り上がり (キャンバー) 挙動を検討した。これら供試体一覧を表-1 に示す。

なお, 各要因 2 体ずつ供試体を作製し, 以降の結果は, 同一要因 2 体の平均値で示した。

2.2 供試体

供試体の形状, 寸法を図-1 に示す。供試体は, 幅×高さ(有効高さ)×全長(スパン長)=100×200(133)×1600(1400)mm の矩形断面梁とし, PC 鋼材にφ9.3mm の 7 本より PC 鋼より線(SWPR7A)を 1 本配置した。なお,

表-1 実験要因

供試体	プレストレス (N/mm ²)	荷重載荷	載荷材齢
ASR 進行	9.8	有	1.5 年
ASR 初期	5.5		有
健全		無	
ASR 初期			無
健全			

*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 修士(工学) (学生会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 助教 博士(工学) (正会員)

ASR を進行させた材齢約 1.5 年の供試体は別実験用のものであったため、 $\phi 12.7\text{mm}$ の 7 本より PC 鋼より線 (SWPR7B) を用いている。組立筋として、D6 の竹籤を圧縮側及び引張側にそれぞれ 2 本ずつ、かぶり 20mm で配置した。せん断補強筋には、D6 矩形スターラップ (SD295A) を、せん断スパンに 100mm、曲げスパンに 50mm 間隔で配置した。

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。早強セメントを用いた水セメント比 0.45 (目標配合強度 $f_{cr}=35\text{N/mm}^2$) の配合とし、反応性粗骨材と、非反応性粗骨材をペシマムとなる割合で配合した。また、等価アルカリ量 6.33kg/m^3 となるよう NaCl を添加した。なお、反応性粗骨材(表乾密度: 2.67g/cm^3 , 絶乾密度: 2.62g/cm^3 , 吸水率: 1.99%, 粗粒率: 6.67)は、北海道産の無班品質安山岩(100%)で、反応性鉱物としてクリストバライトを多く含むことが確認されている。

プレストレスは、プレテンション方式で、コンクリート打込み 2 日後に、コンクリートの強度発現を確認して導入した。供試体上縁の目標応力が 0N/mm^2 , 下縁が、ASR 進行供試体で 9.8N/mm^2 , ASR 初期供試体で 5.5N/mm^2 となるプレストレスの分布とした。プレストレスの導入後、脱型し、14 日間の湿布養生を行った。

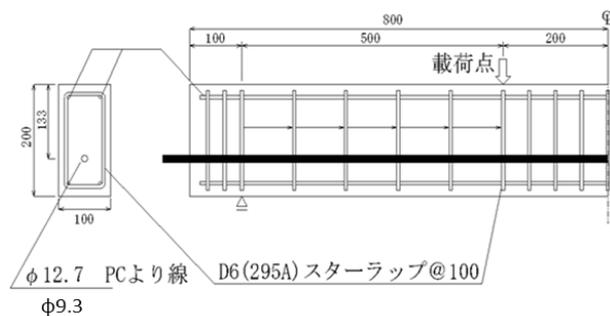


図-1 供試体寸法 (単位: mm)

2.3 ASR 進行供試体の膨張促進および劣化状況

ASR 進行供試体は、養生後、高温高湿環境下(温度 40°C , 湿度 100%)に約 1 年半おいた。膨張促進終了後の供試体のひずみの状況を図-2 に、供試体側面のひび割れ状況を図-3 に示す。ひずみは、コンタクトゲージにより、上面(軸直角方向・軸方向)、底面(軸直角方向・軸方向)、側面(鉛直方向)の計 5 ヲ所 (各箇所につき 2 点) で測定した促進膨張後の長さ変化から算出した。以降、本論文では、正のひずみを膨張 (引張), 負のひずみを収縮 (圧縮) としている。

PC 鋼より線に近い底面の軸方向ひずみは、プレストレスによるクリープや PC 鋼より線による拘束で圧縮を示した。また、底面付近には顕著なひび割れは見られなかった。これに対し、目標プレストレスが 0N/mm^2 の上面では、方向性のないひび割れが発生し、ひずみは膨脹側を示した。この結果、反り上りの変形が生じていたと考えられる。

2.4 持続曲げ荷重の載荷

(1) 載荷方法

載荷試験の状況を図-4 に示す。H 鋼と載荷点となる鋼製丸鋼を挟んで上下対称に積み上げた同一要因の供試体に対し、支点到に配置した鉄板と PC 鋼棒を用いてこれらをナット締めすることで持続曲げ荷重を与えた。なお、

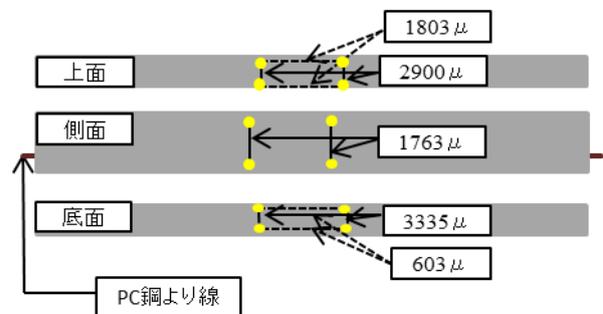


図-2 載荷前のひずみ分布

表-2 示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (cc/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	非反応性粗骨材 Gn	反応性粗骨材 Gr	NaCl	
20	8	45.1	5.0	45.1	172	381	768	525	514	11.94	952.5

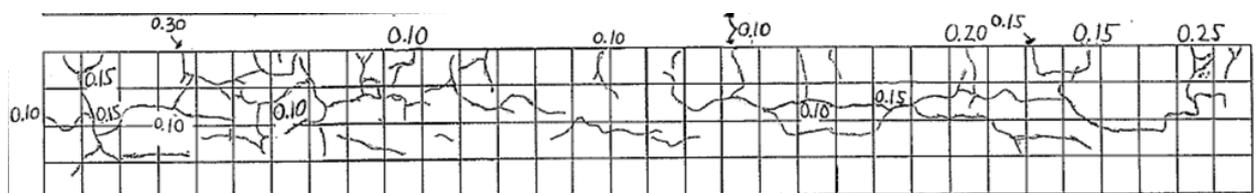


図-3 ひび割れ図

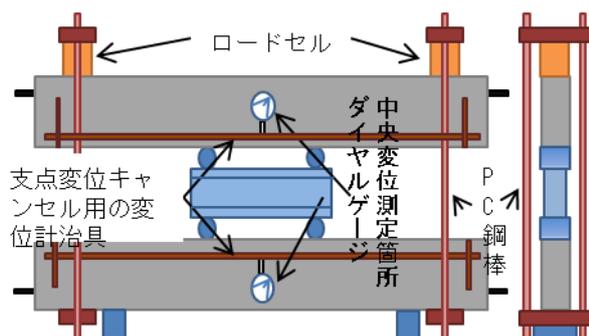


図-4 荷重載荷方法

載荷無の供試体では、ナット締めを行わず設置した。

持続載荷中には、乾燥の防止と ASR 膨張の促進のため、供試体の周りを脱脂綿および食品包装用ラップフィルムで覆い、ASR 進行および初期供試体には塩水を、健全供試体には水道水を脱脂綿に含ませるとともに、散布して湿潤環境を保った。

スパン中央のたわみを、支点変位補正用の変位計治具に設置したダイヤルゲージで測定した。供試体軸方向のひずみを、側面の高さ 25, 75, 125, 175mm (75, 125mm は載荷無の供試体のみ) の位置でコンタクトゲージを用いて測定した。これらのひずみを、以後では順にひずみ 1, 2, 3, 4 とする。

(2) ASR 進行供試体の載荷荷重

ASR 進行供試体には、まず、有効プレストレスがすべて失われたと仮定して求めた曲げひび割れ発生荷重 (8kN) を、載荷開始後 30 日まで載荷した。(以下、荷重①) これは、PC 鋼より線を配置しているがプレストレスのない RC 構造に相当するもので、現実的にはプレストレスが残存するため、曲げひび割れに至らない段階の荷重となる。この後、プレストレスの有効率を 80% として求めた曲げひび割れ発生荷重直前の荷重 (28kN) を、47 日まで載荷 (以降も継続) している。(荷重②)

(3) ASR 初期供試体の載荷荷重

ASR 初期供試体には、プレストレスの有効率を 80% として求めた曲げひび割れ発生荷重直前の荷重 (19kN) を、載荷開始後 188 日まで載荷 (以降も継続) している。(荷重②)

3. 実験結果および考察

3.1 ASR 進行供試体

(1) 載荷直後のたわみ

各供試体の荷重載荷直後たわみの実験値と計算値を表-3 に示す。計算値は載荷荷重作用時の断面の曲率を算出し、軸方向の曲率分布から弾性荷重法を用いて算出した。なお、静弾性係数は、健全供試体用の管理供試体で測定した 35kN/mm² を用いた。

表-3 載荷直後のたわみ

たわみ (mm)	荷重①		荷重②	
	実験値	計算値	実験値	計算値
	0.288	0.219	1.25	0.727

荷重①載荷直後では、2 体とも曲げひび割れは発生していなかった。このため、プレストレスが残存していると考えられる。しかし、たわみの実験値は、計算値を 30% ほど上回っており、ASR 膨張によるコンクリートの静弾性係数の低下がたわみの増大の主な原因と考えられる。たわみの実験値から静弾性係数を逆算すると 23kN/mm² 程度となり、ASR 膨張により 35% ほど静弾性係数が低下していたことになる。なお、ASR 進行供試体の管理供試体の静弾性係数は 14kN/mm² であり、PC 梁供試体の静弾性係数は、鋼材拘束により低下が抑えられていると推察される。

荷重②載荷直後では、予定したプレストレスが導入されていると、曲げひび割れは発生しないはずであった。しかし、2 体の内の 1 体に、曲げスパン内でひび割れが発生し、たわみは計算値を約 70% 上回った。コンクリートの静弾性係数、引張強度の低下だけでなく、有効プレストレスが 80% を下回っていたと考えられる。

(2) 持続荷重下での変形挙動

荷重① (有効プレストレス 0 とした場合の曲げひび割れ発生荷重) を載荷した ASR 進行供試体の中央変位 (たわみを正) の経時変化を図-5 に示す。約 1.5 年の促進膨張後、持続曲げ荷重を載荷した直後のたわみを原点として示した。

荷重①載荷後のたわみは、載荷から 10 日後までは ASR 進行供試体の方が大きく、その後は健全供試体の方が大きくなった。ASR 進行供試体では、載荷により圧縮側となる供試体上部で、すでに発生している方向性の無い膨張ひび割れが載荷に伴う圧縮力の作用で閉じていくことによりたわみが増加しやすかったものと考えられる。また、膨張ひび割れを介して水分の移動が容易に生じ、ク

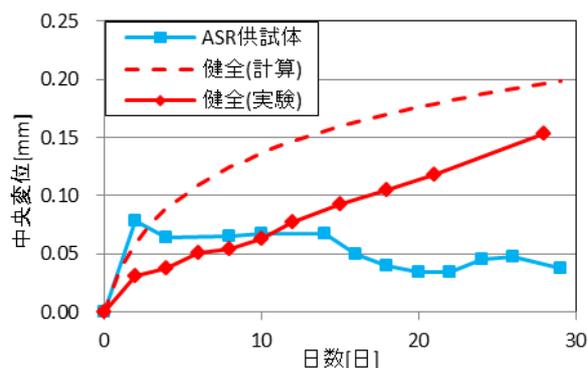


図-5 ASR 進行供試体の荷重①載荷時の中央変位

リーブ変形が大きくなった可能性もある。しかし、たわみは、すぐに最大に達し、以降は漸減する傾向にあった。ASR 膨張の継続により、反り上りの変形が生じたものと考えられる。

一方、健全供試体のたわみは、コンクリートのクリープの進行により増加した。図-5 中の破線は、荷重直後の平面保持を仮定した断面のひずみ分布に、クリープ予測式(式(1)⁴⁾ (RH=100%, 材齢 20 日で荷重) で計算したクリープひずみを加算して求めた曲率分布から算出したたわみの計算値である。湿潤状態を保っているため、若干クリープの進行が緩やかであるが、たわみの挙動を比較的捉えることができている。

$$\varepsilon_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp} = \frac{4W \left(1 - \frac{RH}{100} \right) + 350}{12 + f'_c(t')} * \log_e(t - t' + 1) \quad (1)$$

ここで、 t' 、および t は荷重時および荷重中のコンクリートの有効材齢(日)である。また、 $\varepsilon_{cc}(t, t') / \sigma'_{cp}$ 、 W 、 RH 、 $f'_c(t')$ は、それぞれ材齢 t' (日)に初荷重を行ったコンクリート材齢 t (日)における単位応力当たりのクリープひずみ($\times 10^{-6}/(N/mm^2)$)、コンクリートの単位水量(kg/m^3)、相対湿度(%), 荷重時の有効材齢 t' (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) である。

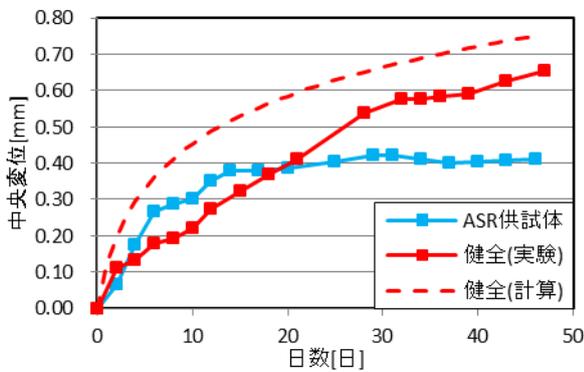


図-6 ASR 進行供試体の荷重②荷重時の中央変位

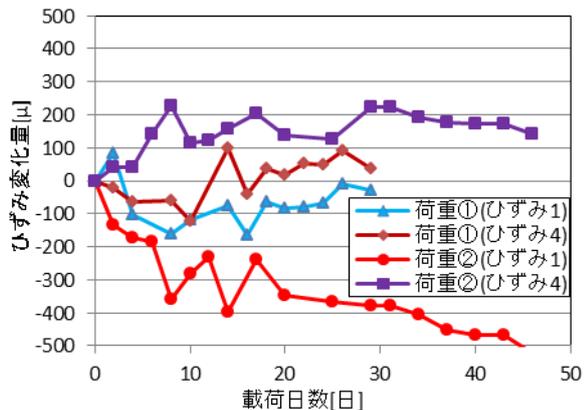


図-7 ASR 進行供試体のひずみ

荷重② (有効プレストレス 80%とした場合の曲げひび割れ発生荷重) を荷重した時の中央変位の経時変化を図-6 に示す。荷重②の荷重直後に、ASR 進行供試体 2 体のうちの 1 体で曲げひび割れの発生が確認できた。また、荷重②荷重後約 3 日でもう 1 体にも曲げひび割れが確認できた。

荷重①荷重時と同様に、ASR 進行供試体の方が 10 日前後でのたわみが大きくなった。荷重①を一度除荷していることで、ASR 膨張ひび割れが再び開口し、これらが閉じたことのほか、曲げひび割れの発生により剛性が低下したことが原因として考えられる。一方、20 日以降では、健全供試体のたわみが増加傾向にあるのに対し、ASR 進行供試体のたわみには大きな変化が見られなくなった。ただし、荷重①のように反り上りに向かう様子は現状では見られていない。

ここで、ASR 進行供試体側面の軸方向ひずみ変化量の経時変化を図-7 に示す。ひずみは、膨張 (引張) を正、収縮 (圧縮) を負として示した。荷重①では、荷重 10 日後から若干膨張側へひずみが増加しており、反り上りの変形が生じたようである。しかし、荷重②では、特

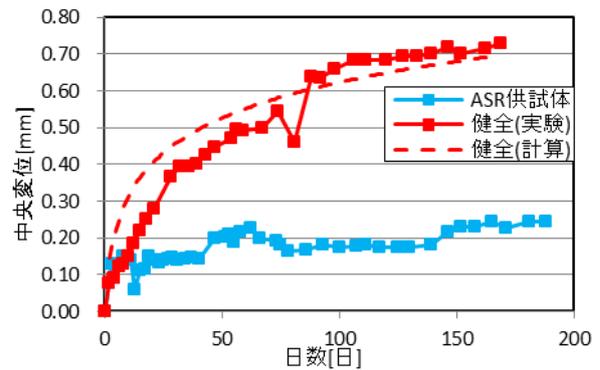


図-8 膨張初期の中央変位

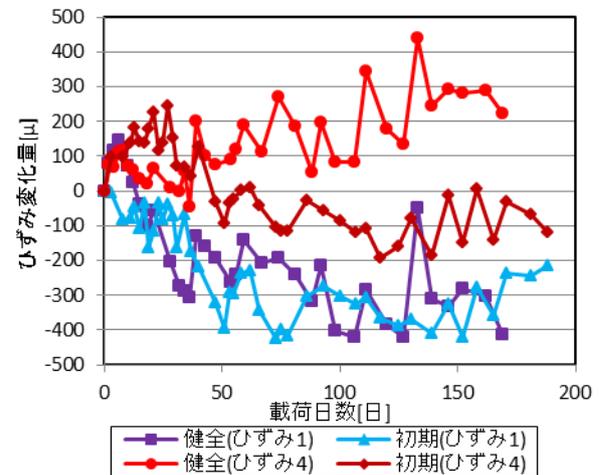


図-9 膨張初期のひずみ

に圧縮側のひずみ 1 の収縮側のひずみが漸増しており、ASR 膨張による反り上がりに対して、膨張ひび割れを有するコンクリートの持続圧縮応力下での変形進行に伴うたわみも生じていると考えられる。

3.2 ASR 初期供試体

(1) 荷重②載荷供試体

荷重②を載荷したときの ASR 初期供試体の中央変位の経時変化を **図-8** に、軸方向ひずみ変化量の経時変化を **図-9** に示す。14 日間の養生後、持続曲げ荷重を載荷した直後のたわみを原点として示した。なお、いずれの供試体も曲げひび割れは発生せず、全断面が有効に作用している。また、ASR 初期供試体に視認できる膨張ひび割れは確認できていない。

健全供試体では、載荷後から圧縮部のクリープの進行と見られる変位の増大が測定された。100 日以降は変位の増大が緩やかで、クリープ予測式を用いたたわみの計算値と傾向が一致した。また、載荷後 10 日ごろまでは、ASR 初期供試体のたわみが健全供試体よりも若干大きく推移した。また、**図-9** に示すように、ASR 初期供試体の上縁側のひずみ（ひずみ 1）が載荷後 10 日前後まで大きくなっている。大きな ASR 膨張が発生する材齢ではないため、添加アルカリの影響によるマトリックスの低剛性化によって曲げ変形が一時増大したものと考えられる。これに対し、載荷後 10 日以降では、ASR 初期供試体の変位の増加が小さくなっている。水和反応の進行とともに圧縮域のコンクリートの剛性が大きくなってきたと考えられる。また、今後の推移を見る必要があるが、ASR ゲルの生成、吸水膨張が徐々に生じ、反り上りの変形が現れている可能性がある。

(2) 載荷無供試体

マトリックス低剛性状態の可能性のある材齢の影響を省き、上記の ASR 膨張による反り上がり変形を確認するために、同諸元で約 1 年間室内環境に静置していた供試体を曲げ持続荷重載荷供試体と同じ環境に置き、曲げ持続荷重を作用させない状態で中央変位を測定した。こ

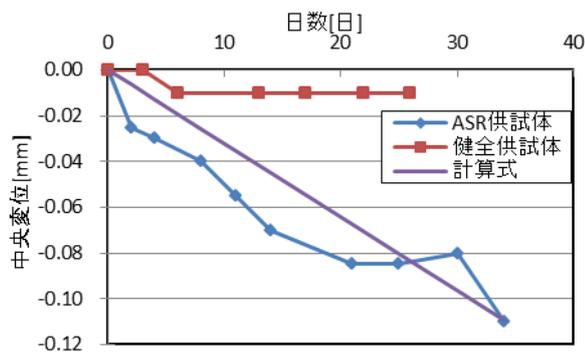


図-10 載荷無の中央変位

の載荷無供試体の中央変位の経時変化を **図-10** に示す。

図中には、**図-11** に示すような、平面保持を仮定した断面のひずみ分布に、ASR 膨張と PC 鋼より線による膨張の拘束を考慮して求めた曲率分布から算出したたわみの計算値をあわせて示した。すなわち、PC 梁の荷重載荷がない状態でのひずみ分布に対し、PC 鋼より線による拘束を受ける有効高さ位置での膨張ひずみの変化を 0 とし、プレストレスの影響のない上縁には自由膨張ひずみを加えた。ここで、自由膨張ひずみの経時変化には式(2)⁵を本研究の条件（実験室温度 15°C）に合わせて用いた。上縁と有効高さ位置の 2 点のひずみから、平面保持の仮定のもとで、荷重載荷がない状態での、ASR が発生した PC 梁断面のひずみ分布を決定した。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp(-t/\tau_c)}{1 + \exp\left\{-\frac{(t - \tau_L)}{\tau_c}\right\}} \quad (2)$$

ここで、 t および、 ε_t 、および ε_∞ は、時間 t (年) および時間 t における膨張量 (%) および最終膨張量である。また、 τ_c 、 τ_L はそれぞれ時間を表すパラメータ (年) である。

図-10 に示すように、健全供試体では、下縁のクリープの持続と見られる反り上りの変形がわずかに進行した。これに対し、ASR 初期供試体は、測定開始後から反り上がり変形が大きくなった。上縁の ASR 膨張と PC 鋼より線による膨張拘束に伴う反り上がり変形が進行していると考えられる。このことから、死荷重等の永続作用の小さいプレテンション PC 梁で ASR が生じた場合、プレストレス下でのクリープによる反り上がり変形に加え、ASR 膨張による反り上がり変形が生じて大きな変形に至る可能性がある。なお、この変位量は、ASR 膨張の予測量と平面保持を仮定した計算値と比較的一致した。

なお、この計算では、ASR 膨張が加速して大きくなる時期にあって、梁の反り上がり変形が増大しているが、今後 ASR 膨張が収束していくにつれて、膨張ひび割れの影響で変形がたわみの方向に進むことも考えられるため、引き続きの経過観察とひび割れ発生を考慮する必要が

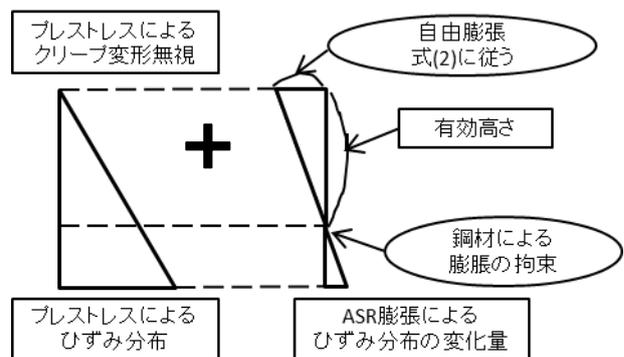


図-11 ひずみ分布の仮定

あると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめて本論文の結論とする。

- (1) ASR 膨張が進行したプレテンション PC 梁に曲げ持続荷重を与えると、荷重直後からしばらくは健全 PC 梁よりもたわみが大きくなったが、ASR 膨張の継続による反り上がりの変形によりたわみの増加が小さくなった。
- (2) ASR の開始とともに曲げ持続荷重を与えたプレテンション PC 梁では、荷重直後から数日間のたわみが健全 PC 梁よりも大きくなったが、以降のたわみの増加は小さくなった。添加アルカリによるセメントマトリクスの低剛性化で一時的にたわみが大きくなった可能性があるものの、水和反応の進行と ASR 膨張の開始と推察されるたわみ増加の減少が見られた。
- (3) ASR の開始とともに曲げ持続荷重を与えず反り上がり変形を計測したプレテンション PC 梁では、上縁の ASR 膨張と PC 鋼より線による膨張拘束に伴う反り上がり変形が見られた。また、この反り上がり変形量は、ASR 膨張の予測量と平面保持を仮定することで推定できた。

参考文献

- 1) 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武 : ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011
- 2) Giacci, G, Torrijos, M, C, Tobes, J, M, Bastic, O, R, Zerbino, R.: Development of Alkali-Silica Reaction under Compressive Loading and its Effects on Concrete Behavior, ACI Materials Journal, May-June, pp.223-230, 2009
- 3) 鳥居和之, 稲垣崇秀, 脇田康介, 参納千夏男 : 湿潤環境下における ASR 劣化コンクリートのクリープ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.971-976, 2010
- 4) 土木学会 : コンクリート示方標準書[設計編 : 標準], 2012
- 5) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 大迫政浩 : 加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートの ASR 膨張予測に関する試み, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, 第 13 巻, 2013.11