

亜硝酸リチウムによる遅延膨張性 ASR抑制効果検証

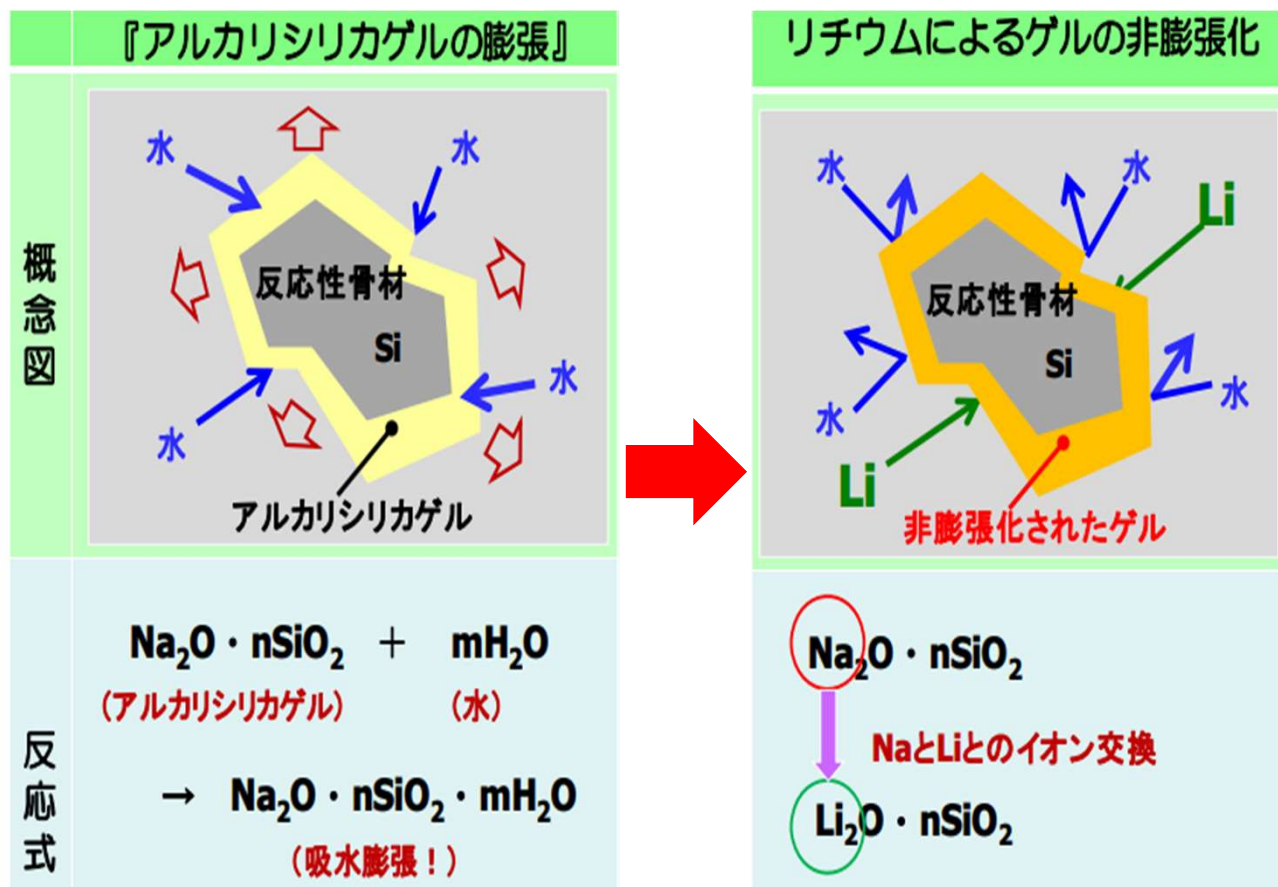
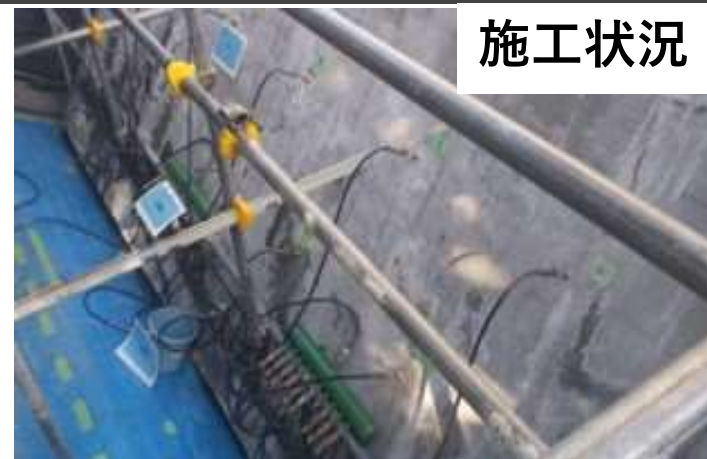
亜硝酸リチウム内部圧入工法概要

亜硝酸リチウム水溶液の効果

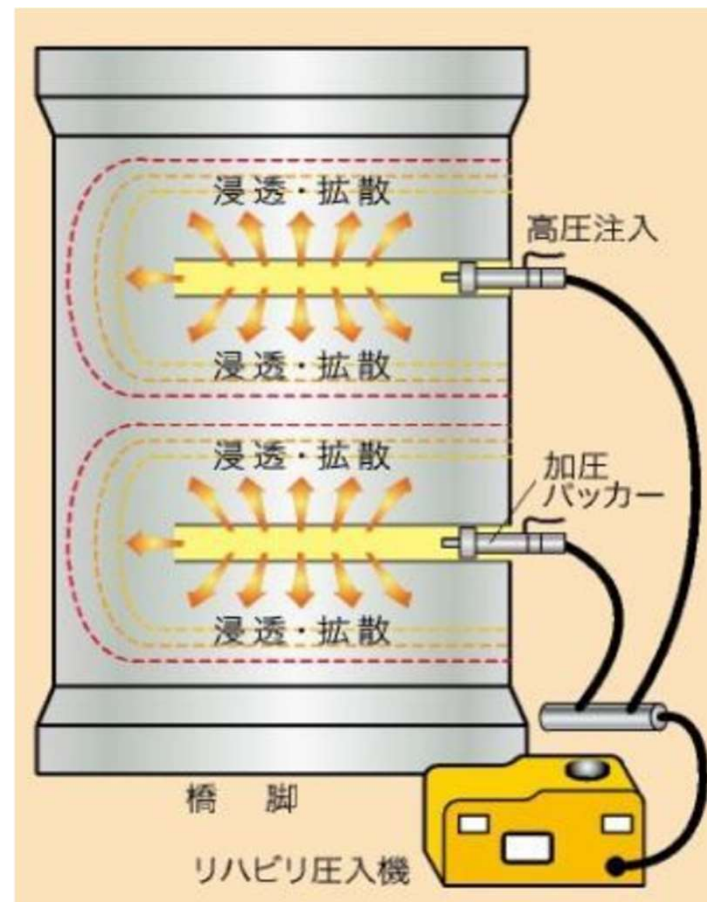
① 亜硝酸イオン $[NO_2^-]$ による鉄筋腐食抑制効果

② リチウムイオン $[Li^+]$ によるASR膨張抑制効果

施工状況

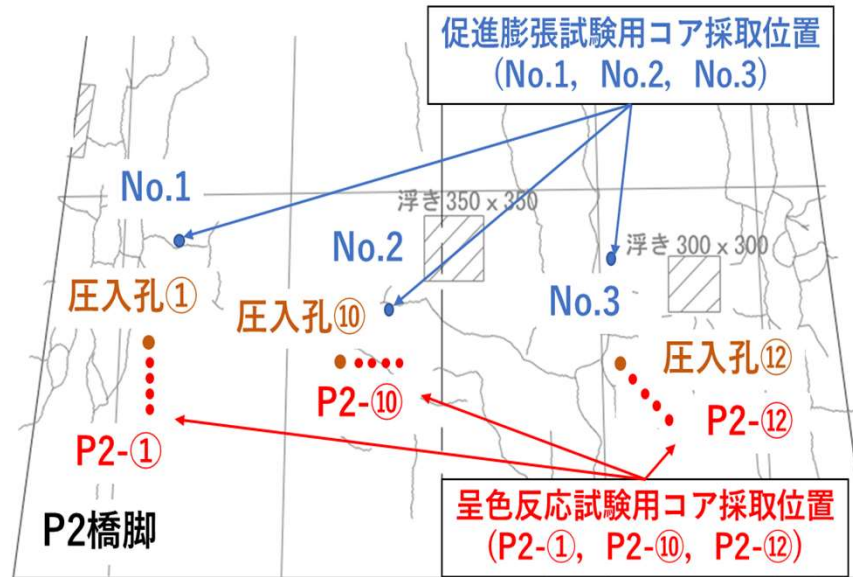


リチウムイオンによるゲルの非膨張化



内部圧入工法概念図

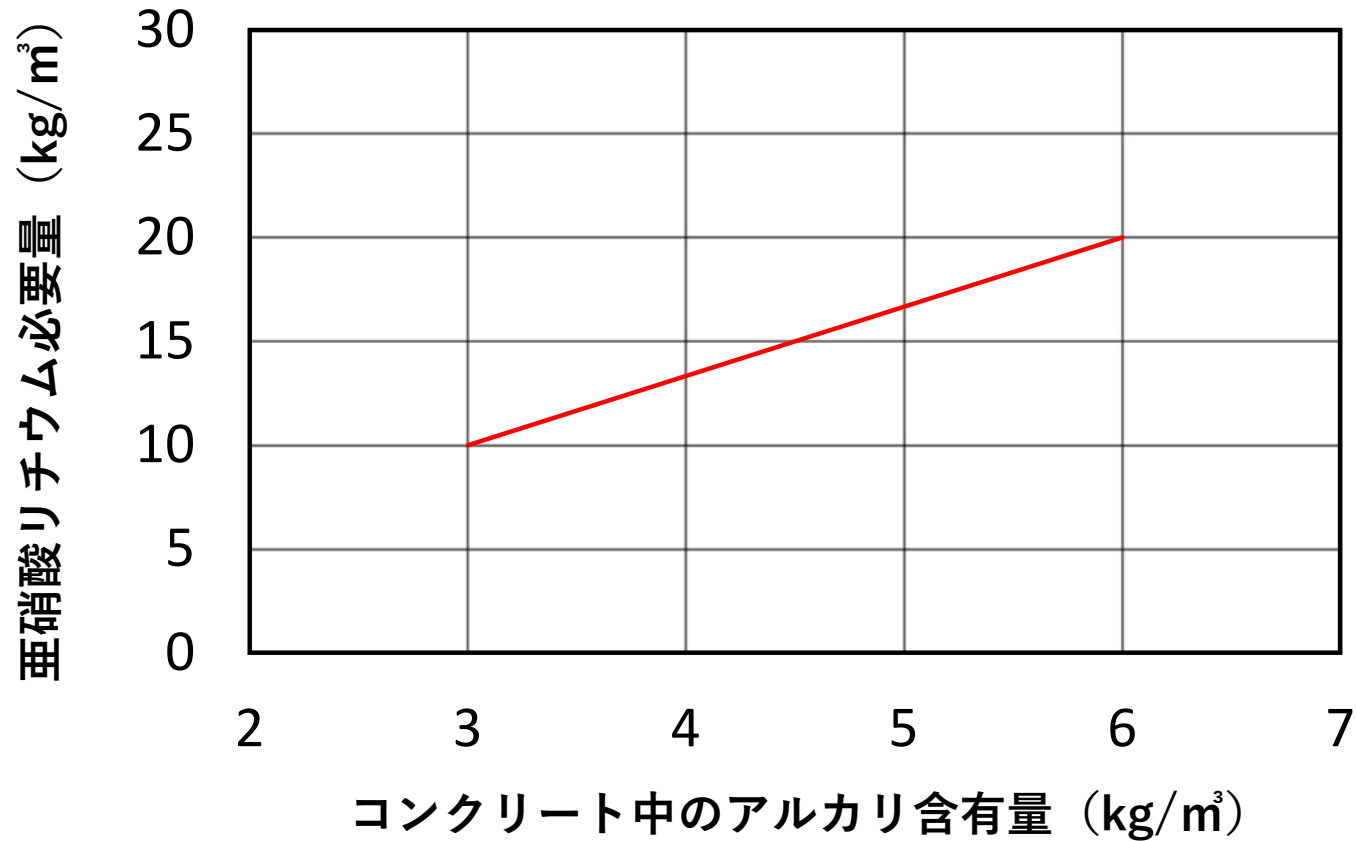
亜硝酸リチウムの浸透確認



圧入番号	P2-①				P2-⑩				P2-⑫			
圧入孔からの距離 (mm)	100	200	300	400	100	200	300	400	100	200	300	400
呈色状況												

表面
↓
内部

亜硝酸リチウムの圧入量確認

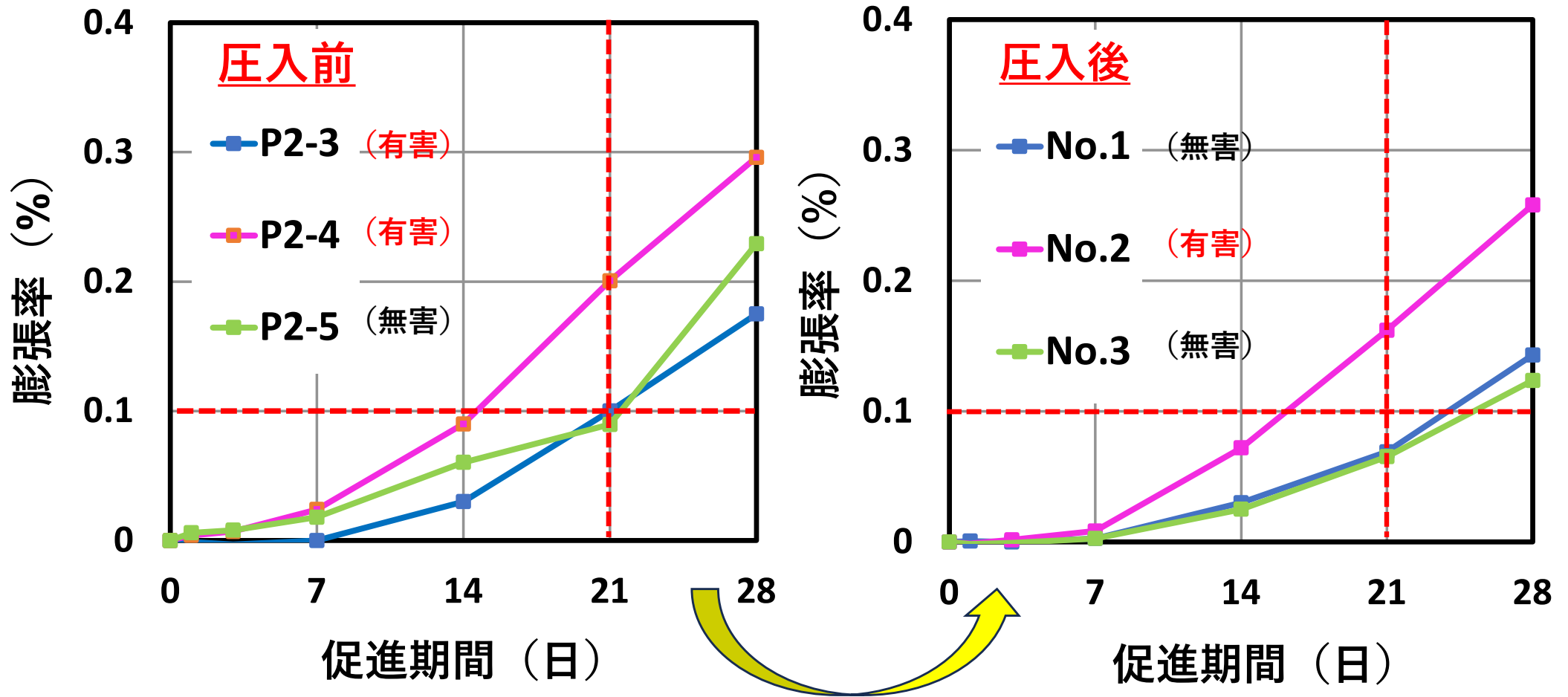


アルカリ含有量と亜硝酸リチウム圧入量との関係

アルカリ含有量 (Na_2O_{eq}) 試験結果

試料名	P2-1	P1-1	P1-7
試験結果 (kg/m ³)	0.85	1.7	1.8

アルカリ溶液浸漬法（カナダ法）による亜硝酸リチウム圧入前後の膨張性評価



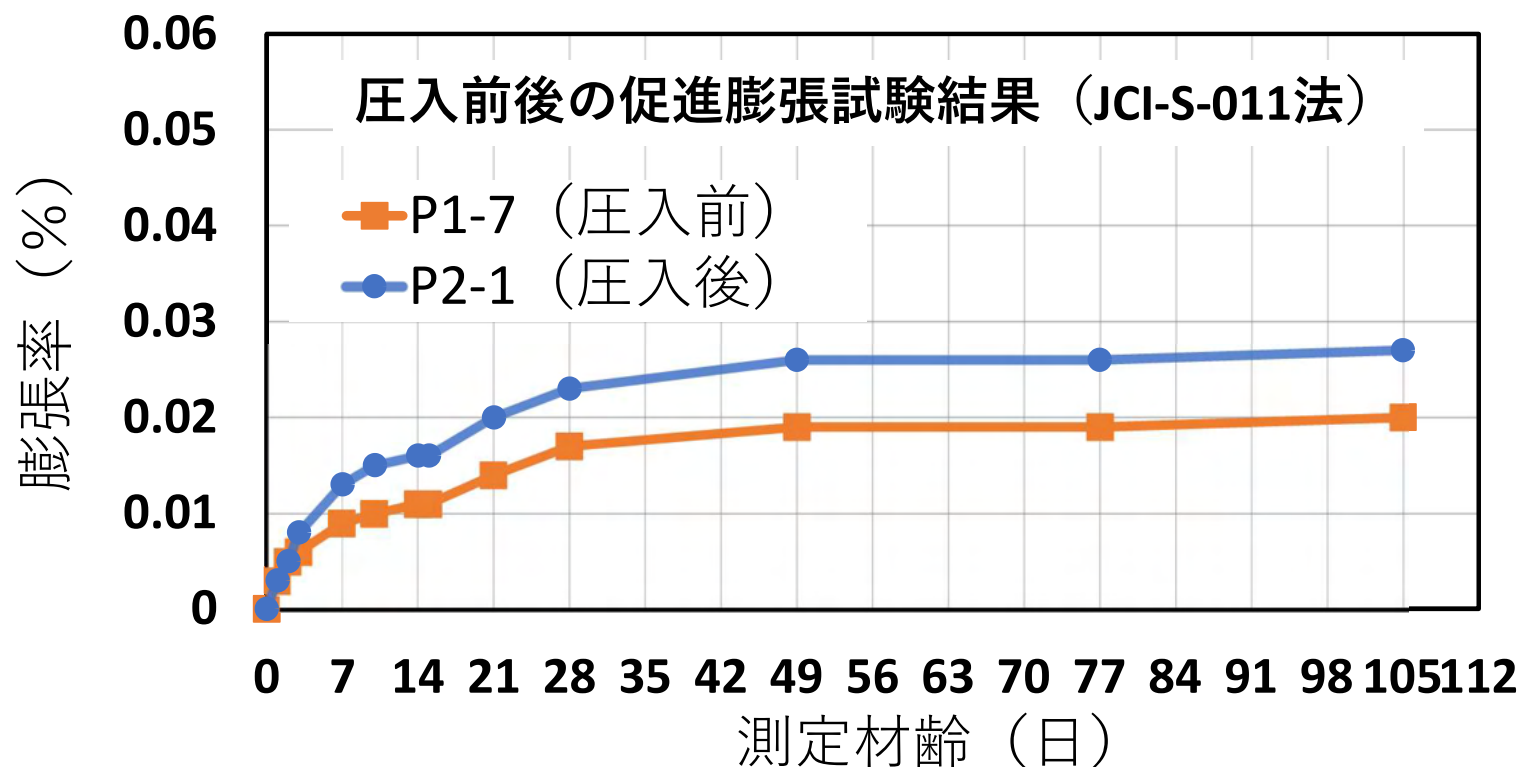
- 亜硝酸リチウム圧入前の結果にて、本橋のASR膨張性が有害であることを検出できている
- 亜硝酸リチウム圧入前後の比較にて亜硝酸リチウム内部圧入による膨張抑制効果を評価できている

ただし、1試料 (No.2) にて膨張抑制効果が不十分なものがある。

JCI-S-011法による促進膨張試験（追加試験）

アルカリ溶液浸漬法（カナダ法）はコア試料に強アルカリのNaOH溶液を浸透させる方法

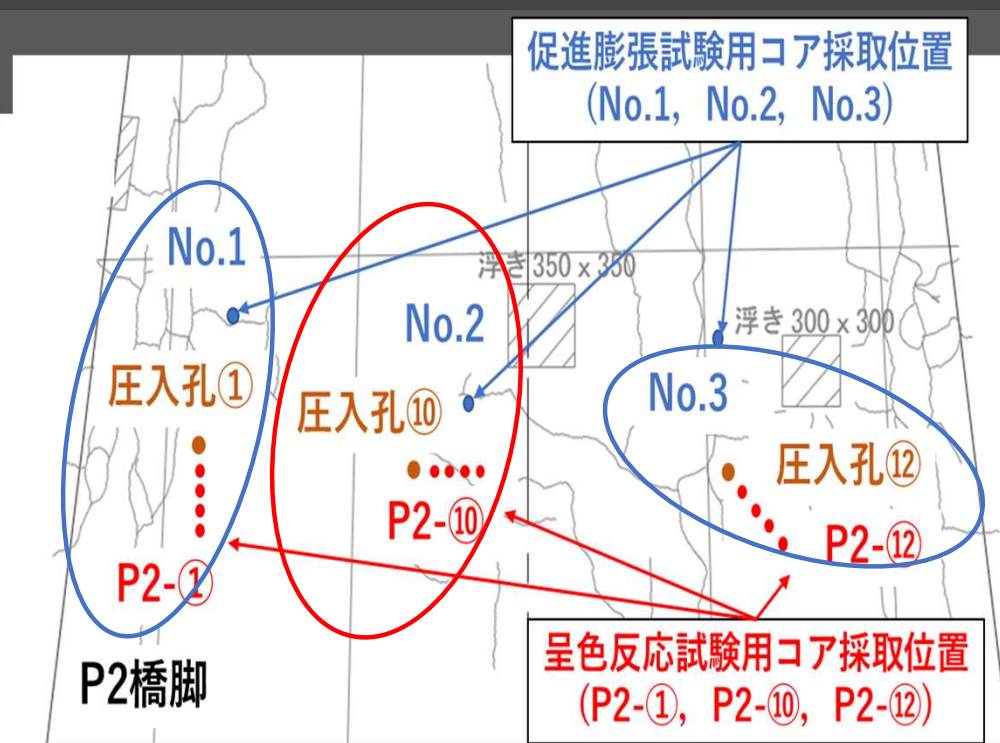
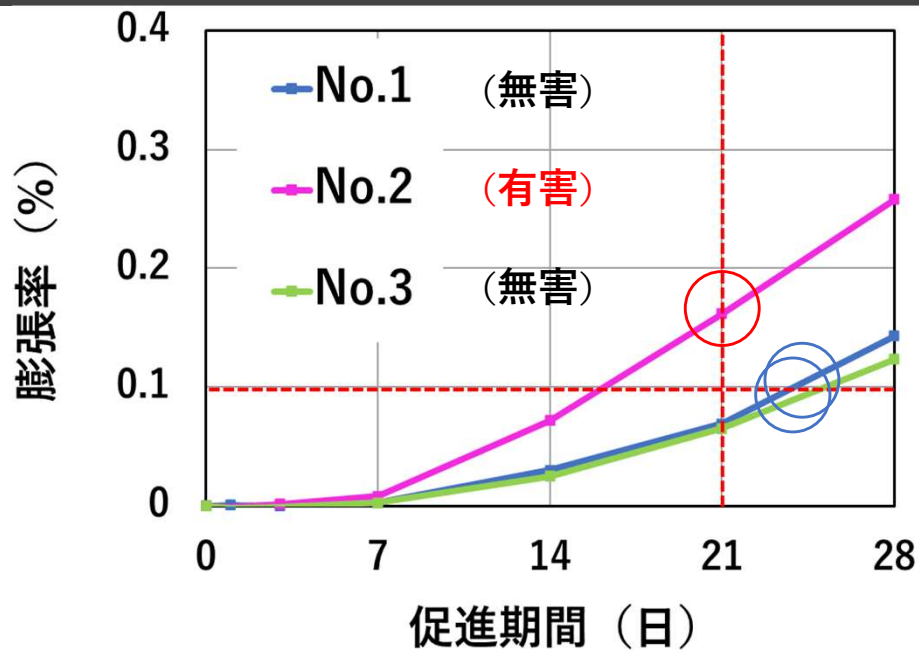
➡ コア試料中のアルカリ含有量が増大し，相対的に亜硝酸リチウムが不足する可能性がある



- 圧入前，圧入後のいずれもASR膨張率が小さい
- 本来，膨張性が有害であるはずのA橋のASR膨張性を過小評価している

➡ 遅延膨張性ASRの膨張性を評価できないため，亜硝酸リチウムの効果検証には不適

呈色反応状況と膨張抑制効果の関係



P2-①				P2-⑩				P2-⑫			
100	200	300	400	100	200	300	400	100	200	300	400

亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果まとめ

①アルカリ含有量試験結果

【結果】 アルカリ含有量の想定値の $3\text{Kg}/\text{m}^3$ を下回っていた。

【考察】 これまでの亜硝酸リチウム内部圧入工法の施工実績を照らし合わせると亜硝酸リチウムの圧入量が不足している可能性は低いと判断できる。

②膨張性の評価方法

【結果】 A橋における膨張性の評価はカナダ法により、圧入前後の相対的な評価で可能であることが分かった。

その一方、JCI-S-011法では、膨張性を過小評価しており、亜硝酸リチウムの効果検証には適さないことが示された。

③亜硝酸リチウムの浸透が膨張抑制効果に及ぼす影響

【結果】 亜硝酸リチウム圧入後のカナダ法による促進膨張試験では、コア試料1本（No.2）のみが有害判定となった。

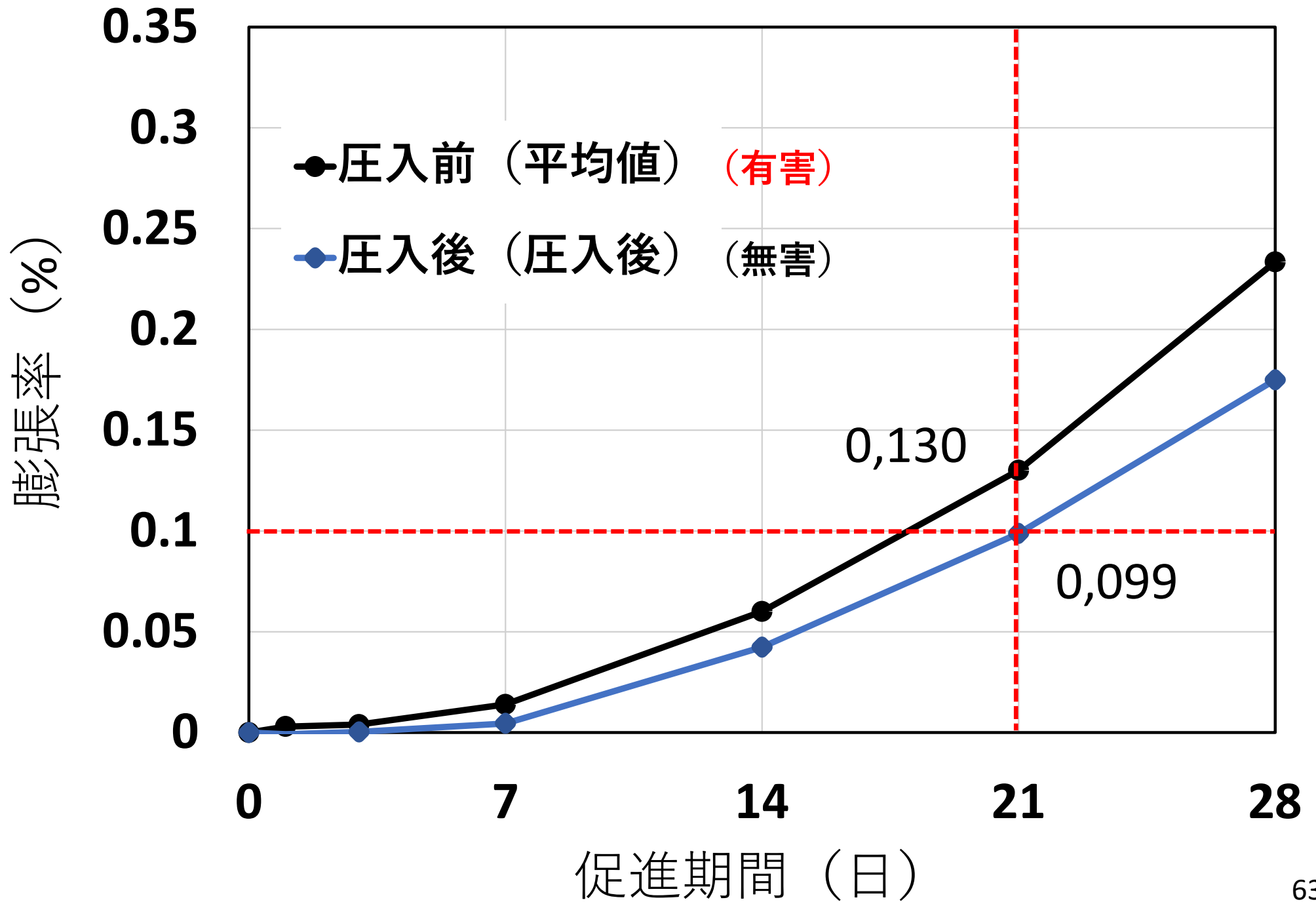
【考察】 呈色反応試験結果との関係を整理してみると、全体的な傾向としては膨張は低減されているが、亜硝酸リチウムの未浸透範囲近傍での膨張は抑制できていない可能性が示された。

- 外観調査及び各種試験により，本橋の劣化機構は細骨材（海砂）に起因する遅延膨張性のASRであることが確認された。
- 亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果は，本橋の劣化機構である遅延膨張性ASRに対しても検証できた。
- アルカリ含有量試験結果より，亜硝酸リチウムの設計注入量に問題はなかったため，本橋では圧入後のカナダ法による膨張試験結果が過大に評価されている可能性がある。

今後の課題

- ✓ **遅延膨張性ASRに対する亜硝酸リチウムのASR抑制効果の評価方法の確立**
- ✓ より多くの遅延膨張性ASRによる劣化構造物に対して，亜硝酸リチウム内部圧入工法を適用し，適用範囲や膨張抑制効果の評価方法の検討を行っていく必要がある。

参考：亜硝酸リチウムによる膨張抑制効果（圧入前後の3本の平均値）



ASR劣化したプレテンションPC桁 について

1. 劣化状況の概要
2. 解析手法概要
3. 解析結果の評価

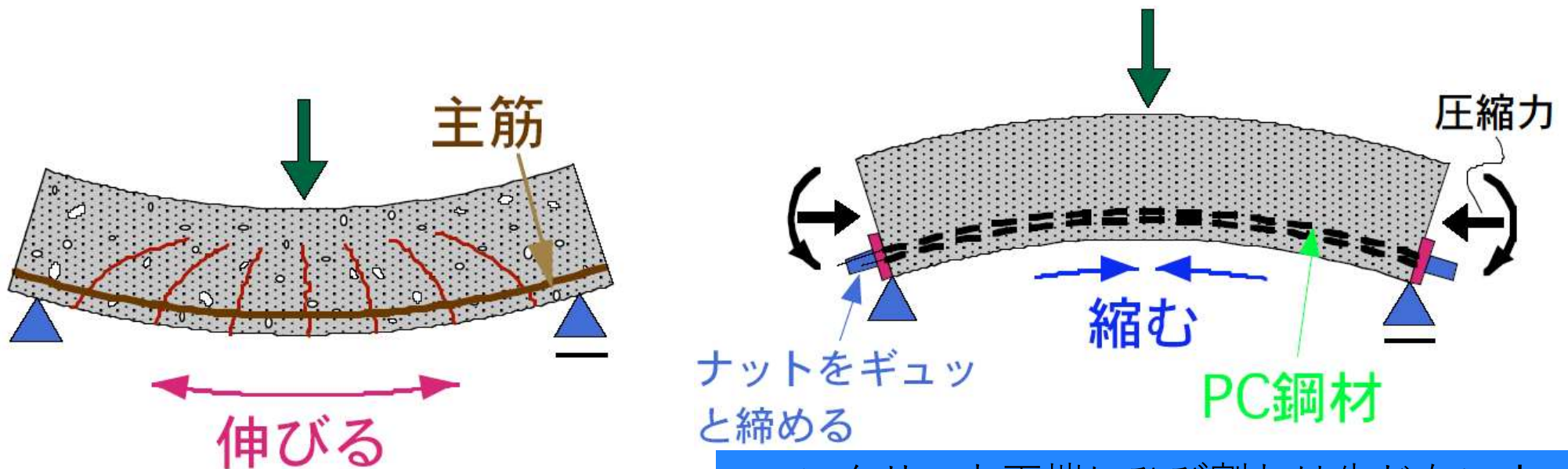
- 金城和久，富山潤，金田一男，車谷麻緒：ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.970-975, 2012
- 富山潤，山田一夫，金田一男，伊良波繁雄，大城武：ASR劣化したプレテンションPC桁の岩石学的検討に基づくASR診断および耐荷性能の評価，土木学会論文集E, Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011

参考（プレストレストコンクリート）

Pre-stress : あらかじめ応力を加える、という意味

RC構造の宿命的な欠点……ひび割れを生じてしまう（左図）

この欠点を克服するため、**PC鋼材**を引張ってコンクリートに圧縮力を導入して、ひび割れを防ぐ……**PC構造**！（右図）



下端にひび割れ発生
RC構造の場合

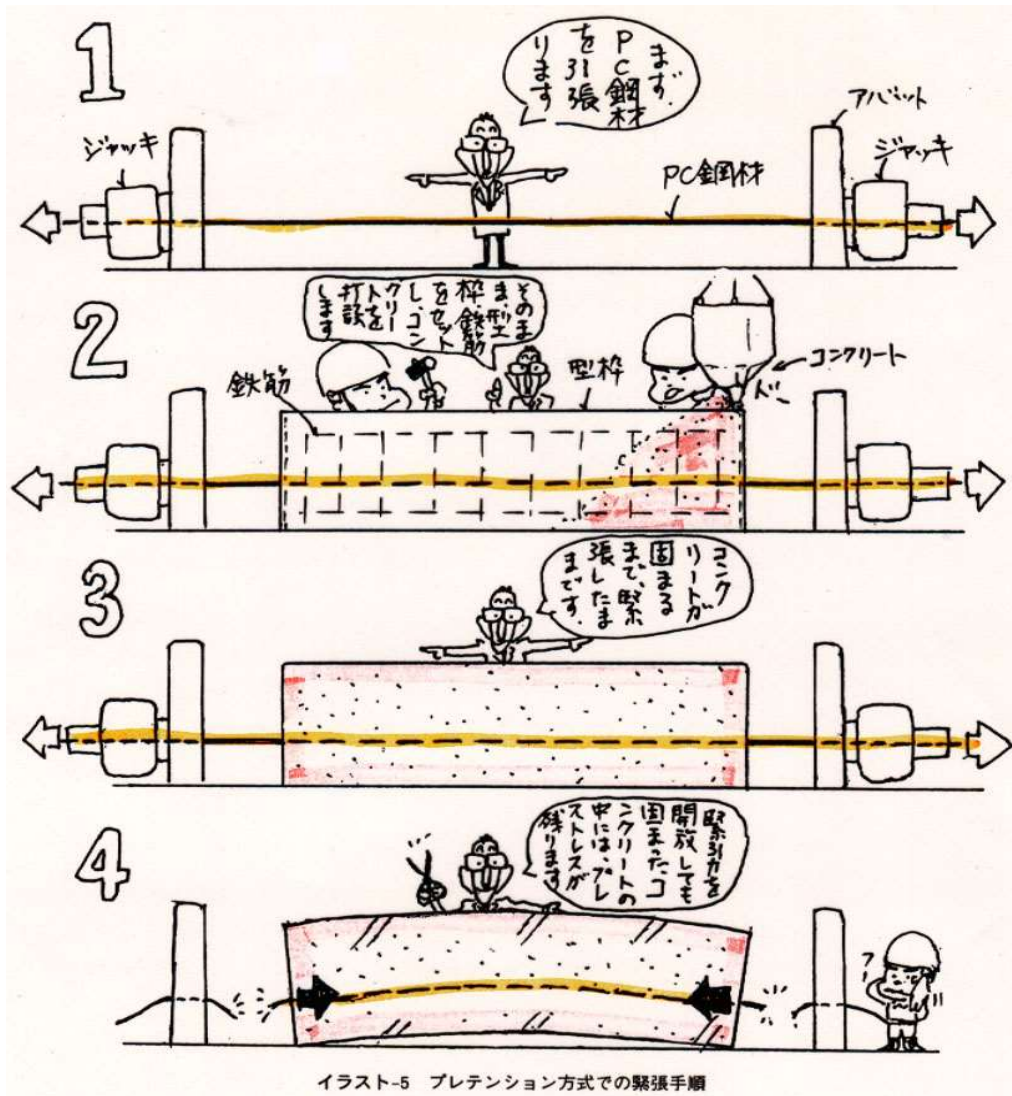
コンクリート下端にひび割れは生じない！

PC構造の場合

(ポストテンション方式の場合)

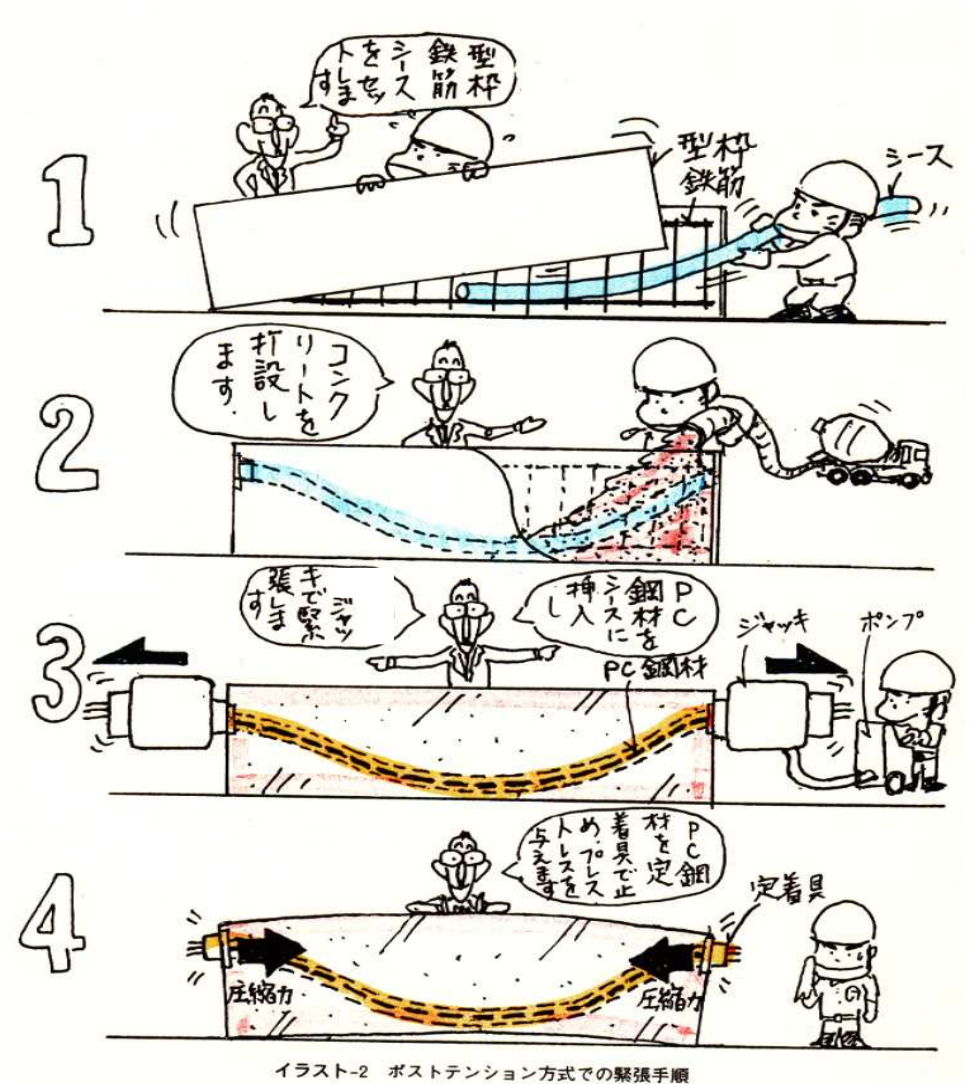
参考（プレストレストコンクリート）

プレテンション方式



PC鋼材とコンクリートとの付着によりプレストレスを与える

ポストテンション方式



PC鋼材を定着具によりコンクリートに定着させてプレストレスを与える

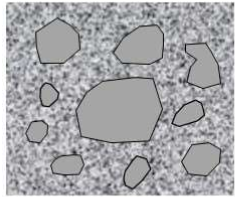
ASRが生じたらどうなるの？(材料レベル・断面レベル)

コンクリート

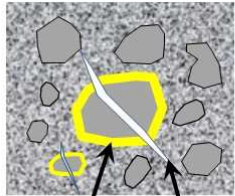
鉄筋

材料レベル

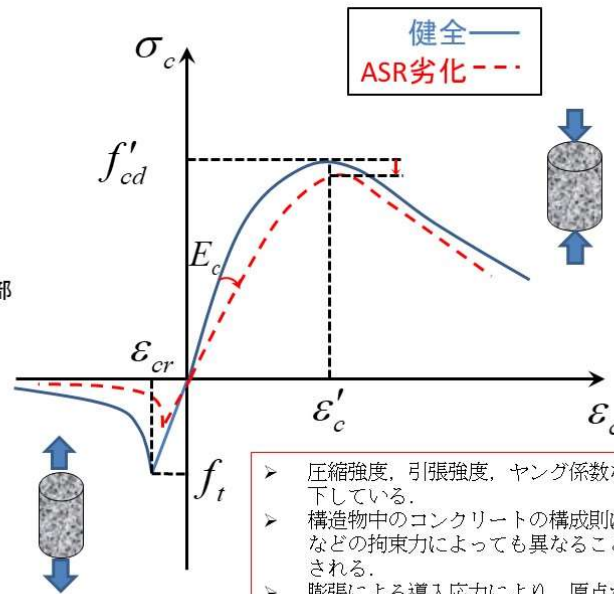
健全なコンクリート内部



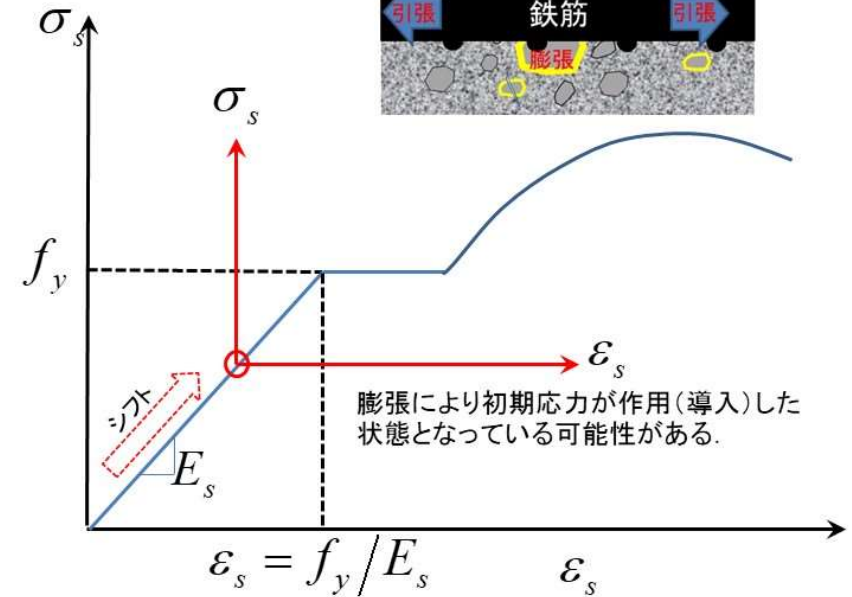
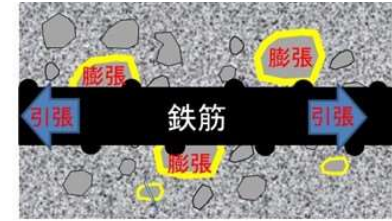
ASRが生じたコンクリート内部



ASRゲル
ひび割れ

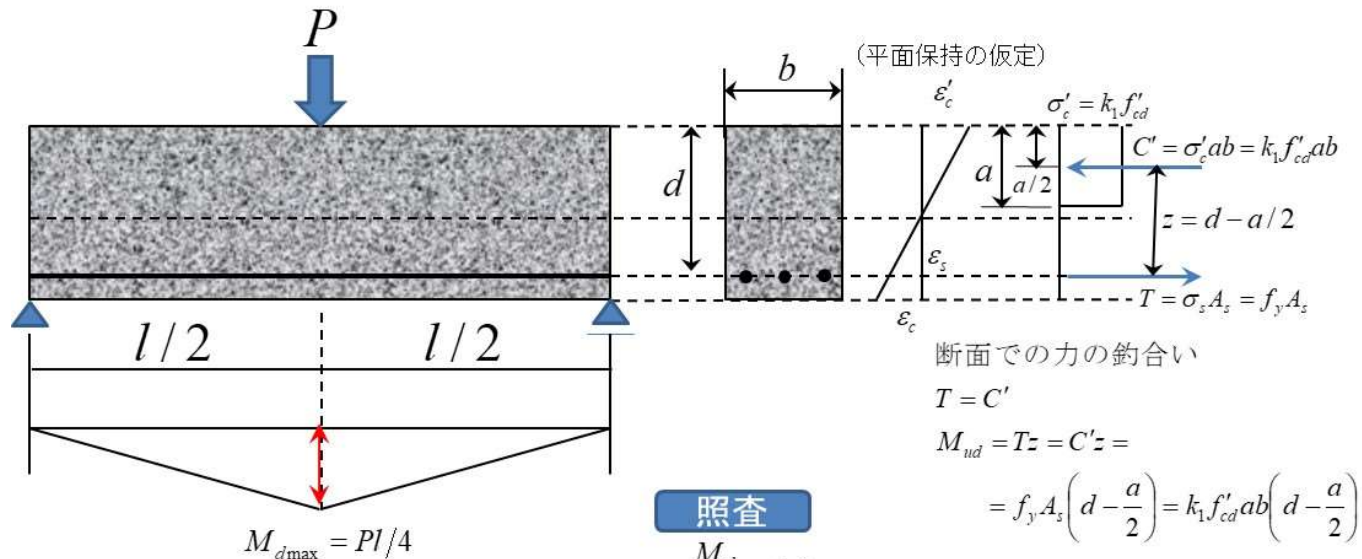


- 圧縮強度、引張強度、ヤング係数などが低下している。
- 構造物中のコンクリートの構成則は、鋼材などの拘束力によっても異なることが予想される。
- 膨張による導入応力により、原点がシフトしていると予想される。



膨張により初期応力が作用(導入)した状態となっている可能性がある。

断面レベル



断面での力の釣り合い

$$T = C'$$

$$M_{ud} = Tz = C'z =$$

$$= f_y A_s \left(d - \frac{a}{2} \right) = k_1 f'_cd ab \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

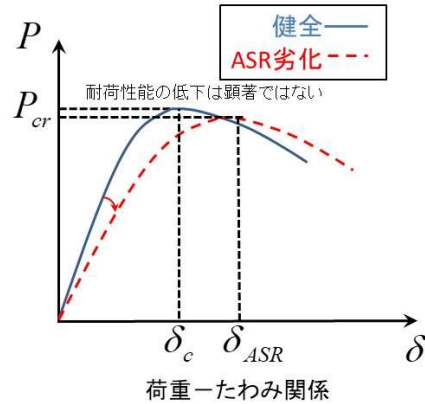
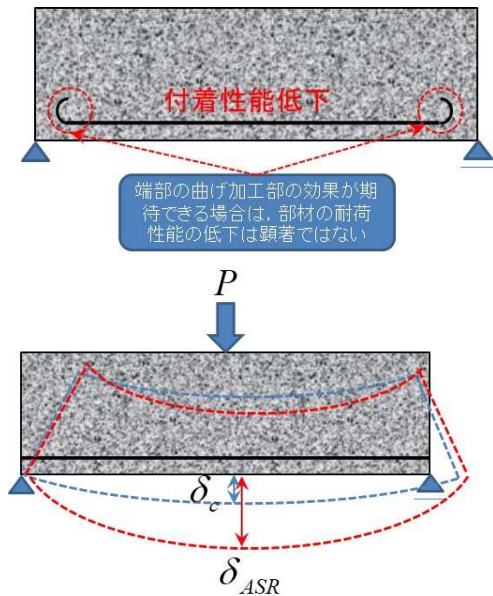
照査

$$\gamma_i \frac{M_d}{M_{ud}} \leq 1.0$$

※ヤング係数は関係ない

ASRが生じたらどうなるの？(部材レベル)

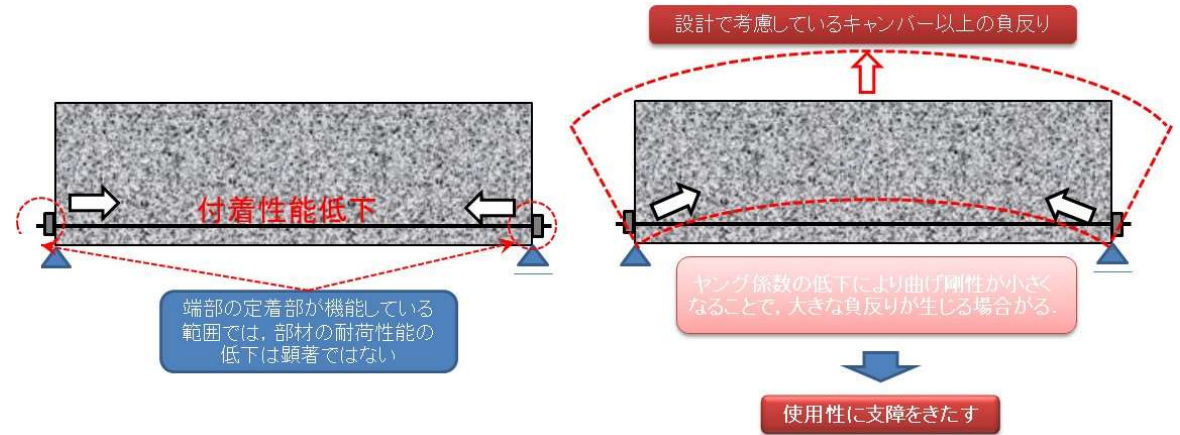
鉄筋コンクリート部材



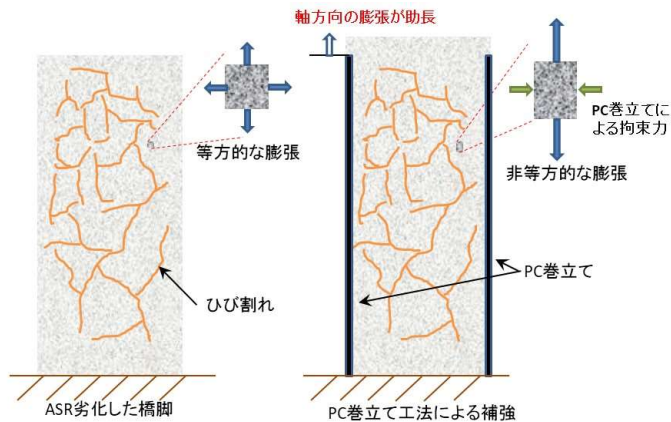
曲げ剛性EIの低下 $\rightarrow \delta = \frac{Pl^3}{48EI}$ (大)

$\delta_\delta < \delta_{ASR}$

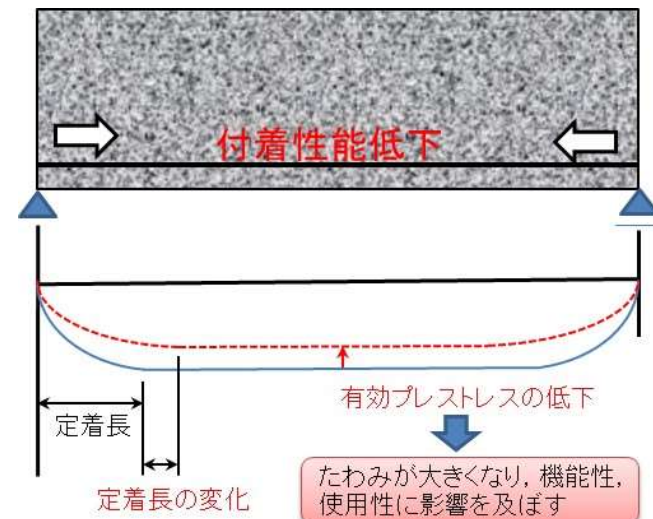
ポストテンション形式 PC部材



PC巻き立てした柱部材



プレテンション形式 PC部材



今回着目した構造

プレテンションPC桁に着目

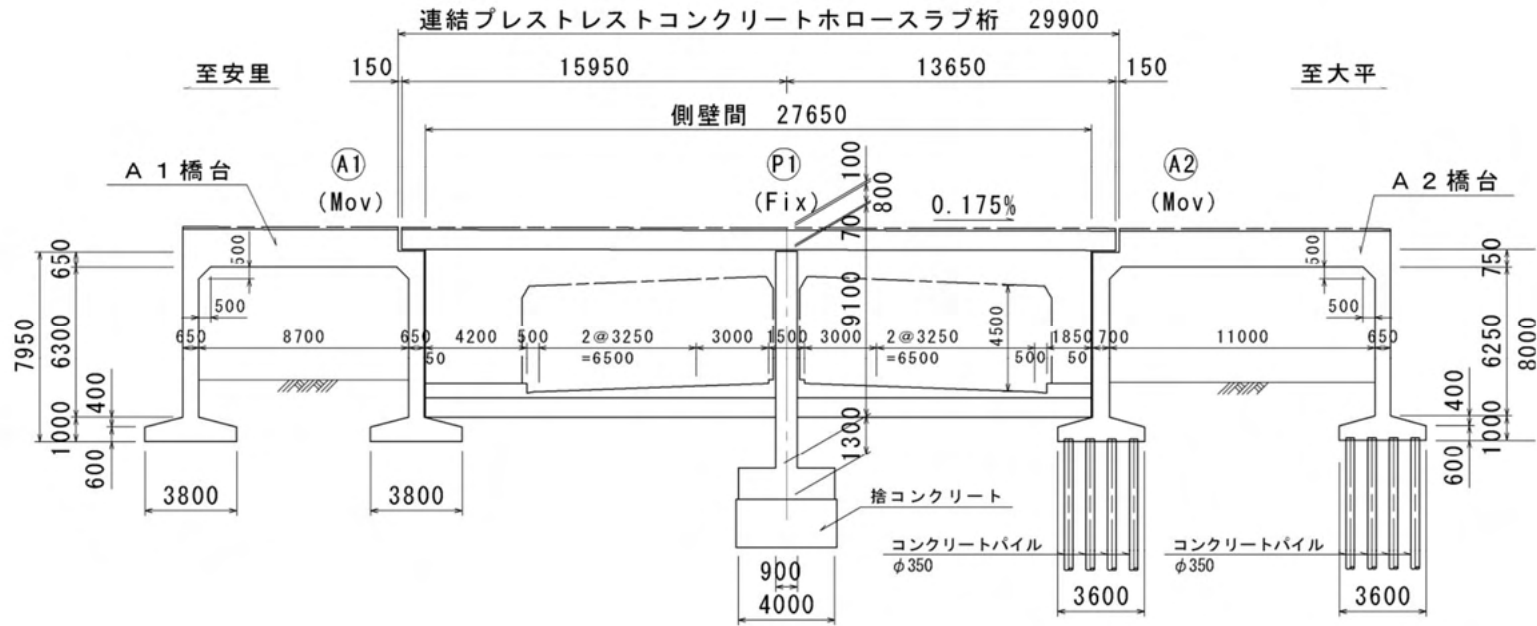


図-1 古島橋側面図 (単位: mm)

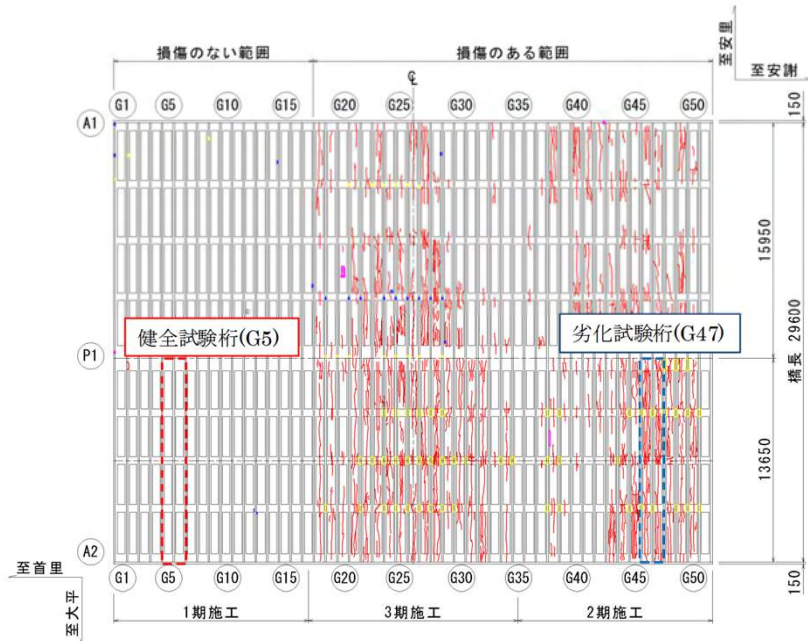


図-2 古島橋 PC 桁下面のひび割れ発生状況 (単位: mm)



(a) ひび割れ発生状況 (b) ひび割れ部の拡大

写真-1 実橋 PC 桁のひび割れ状況



写真-2 劣化試験PC桁の状況写真

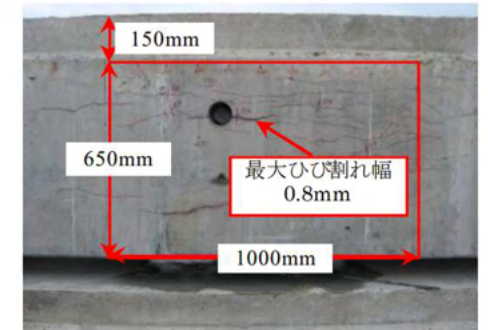


写真-3 代表箇所のひび割れ密度

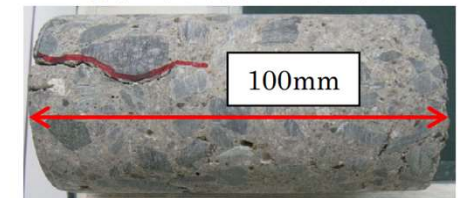


写真-4 コアおよびひび割れ深さ

プレテンションPC桁に着目

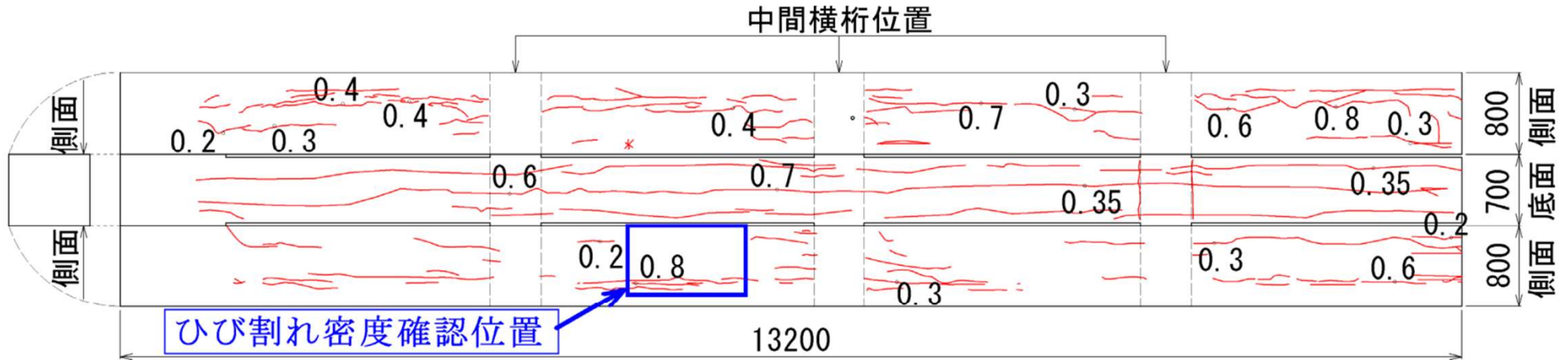


図-3 劣化試験桁 G47 のひび割れ状況展開図 (単位 : mm)

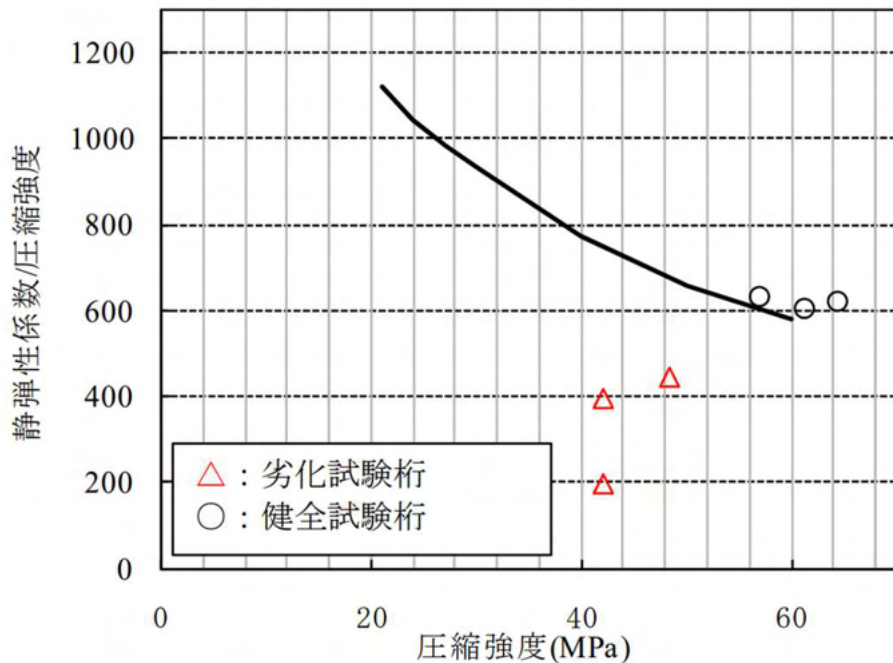


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

明らかに健全試験桁に比較し、また一般的な弾性係数と圧縮強度の関係に比較し、劣化試験桁は材料劣化を起こしていることがわかる。

※圧縮強度と静弾性係数の関係を確認することで、ASR劣化なのかのひとつの指標となる。このため、ASRが懸念されるコンクリート構造物では、圧縮強度試験に加えて、静弾性係数試験を実施することを標準としてはいかががでしょうか？

プレテンションPC桁に着目

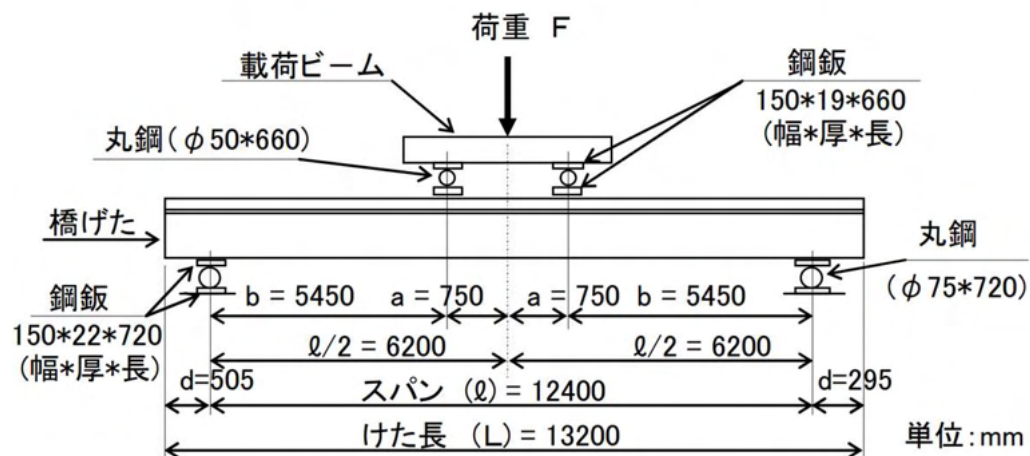


図-10 荷重位置概念図

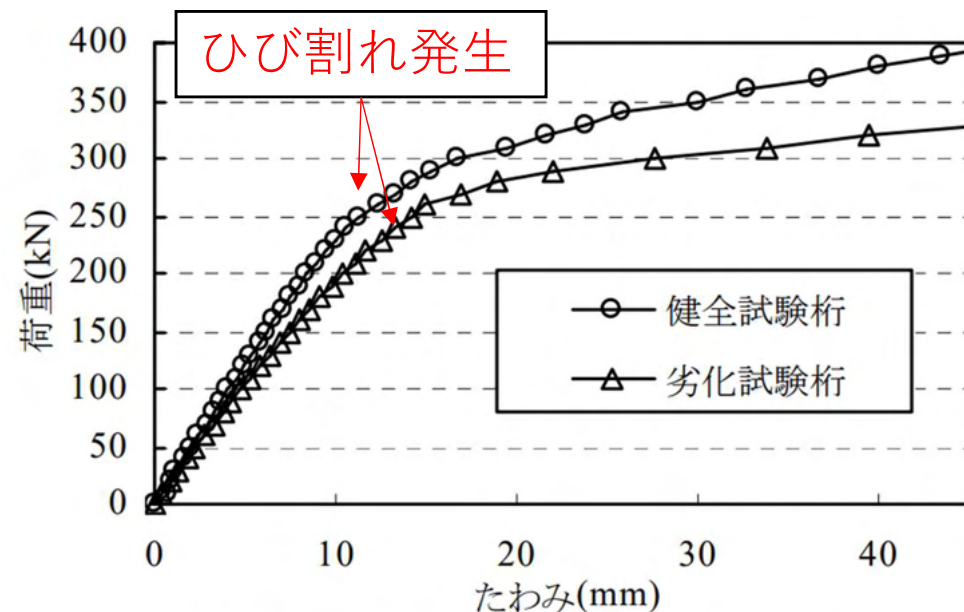


図-3 荷重-たわみ曲線 (中央)

- ❑ 劣化試験桁は、健全試験桁に比較し、曲げ剛性の低下、さらにはひび割れ発生後の剛性の低下が確認できる。
- ❑ したがって、交通量が多く、大型車両の往来の多い路線の場合は、補修だけでなく、補強や更新の可能性も考慮した詳細調査が必要と考える。
- ❑ 同様の劣化が確認されたプレテンPC橋は、1980年代が多い。県内で初めてプレテンションPC部材の製作が可能となった沖縄ピーシー（株）が1996年10月1日に設立されたことを考えると県外で製造されたものである。
- ❑ しかし、近年になって1996年以降に建設されたプレテンPC橋において、同様の劣化が確認されたものがある。これが県内で製造されたものなら、県内の材料起因となる（台湾花蓮産は1985年以降は本島では使用されてない）。
- ❑ **お願い**：1996年以降に建設されたプレテンションPC橋で、桁軸に沿ったひび割れが確認されるものがあった場合は、富山までご一報ください (jun-t@tec.u-ryukyu.ac.jp)

プレテンションPC桁（中空床版橋）のASR劣化事例



アルカリ総量規制（1986年）以降



ご清聴ありがとうございました
m(_ _)m

謝辞

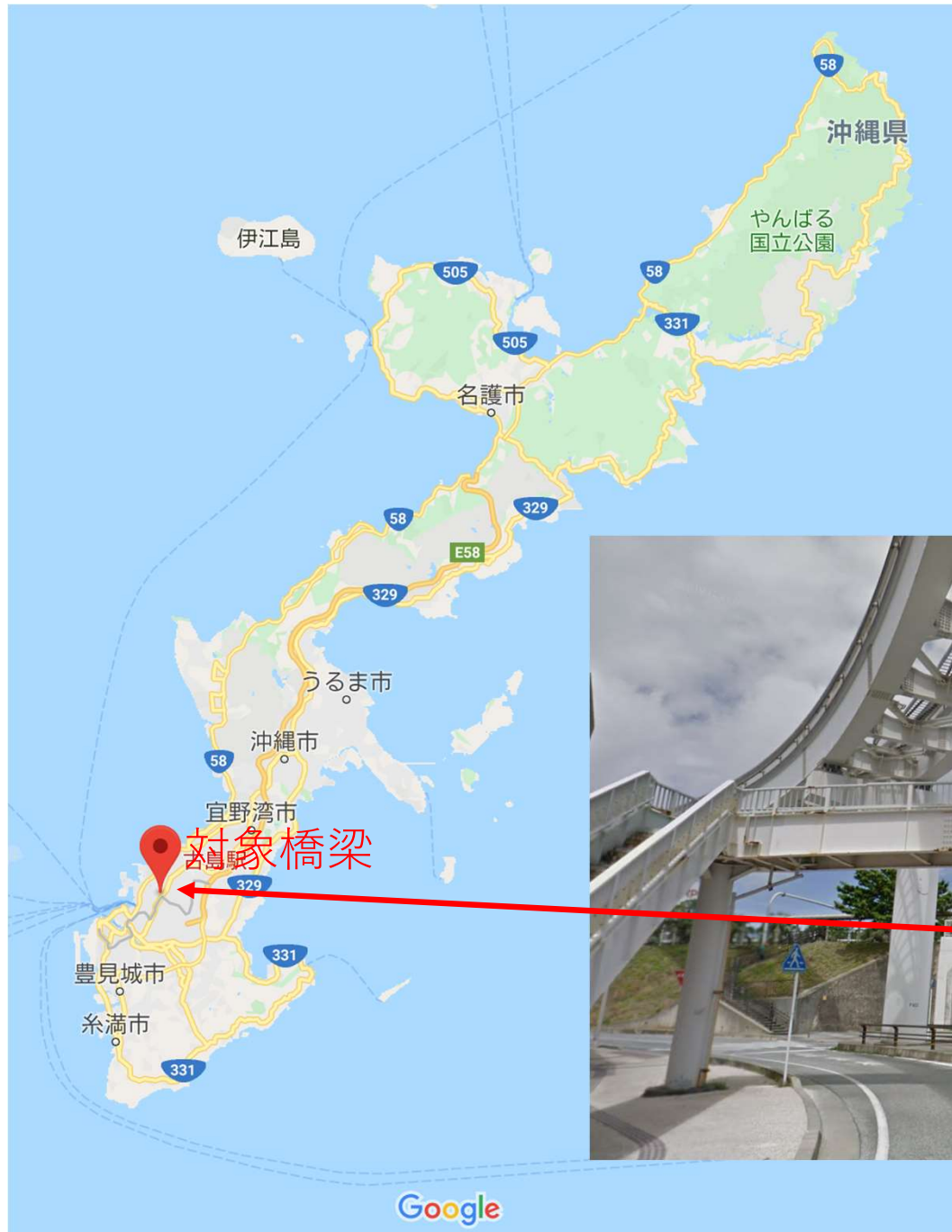
本講演で紹介したデータや研究成果は、多くの方に支援頂いた結果です。ここに記して感謝の意を示します。

ASR劣化したプレテンションPC桁 の耐荷性能評価

1. 劣化状況の概要
2. 解析手法概要
3. 解析結果の評価

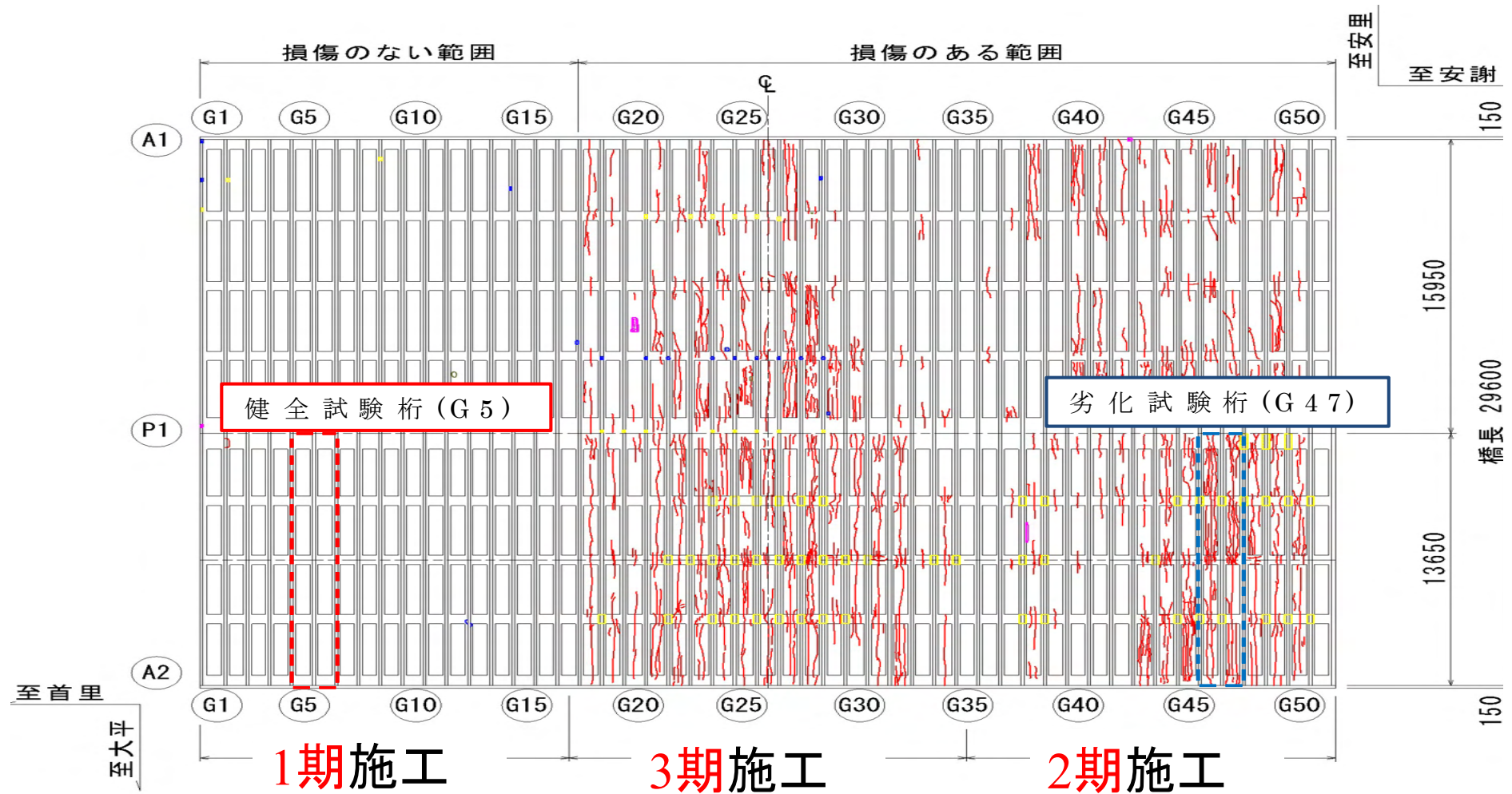
- 金城和久, 富山潤, 金田一男, 車谷麻緒: ASR劣化したプレテンションPC桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.970-975, 2012
- 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武: ASR劣化したプレテンションPC桁の岩石学的検討に基づくASR診断および耐荷性能の評価, 土木学会論文集E, Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011

位置図



プレテンションPC中空床版橋

損傷図 (赤い線：ひび割れ)



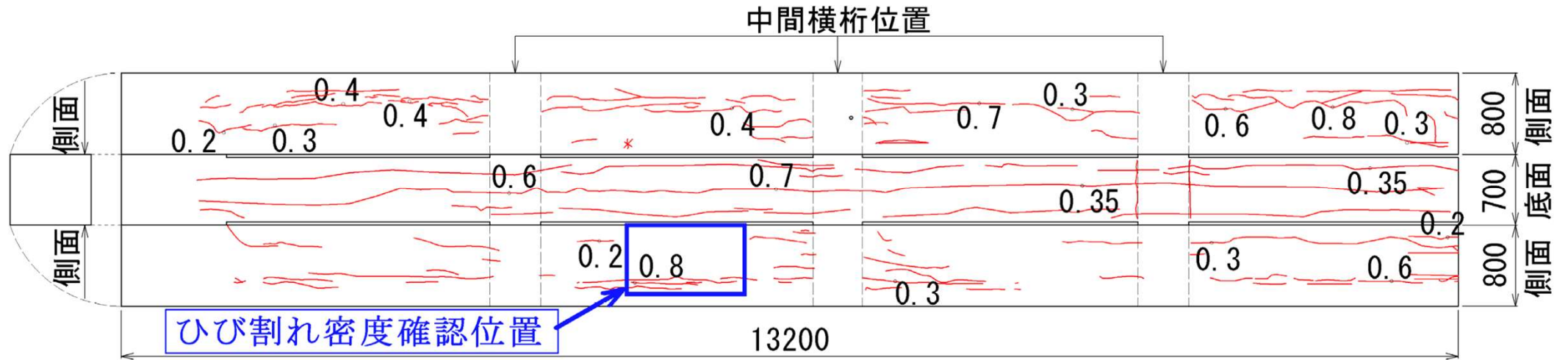
ひび割れ発生状況 (赤線：ひび割れ)

1期施工の桁にはひび割れが確認できないが、2、3期施工の桁下面には橋軸方向に沿ったひび割れが確認できる。

調査項目

- 目視観察：ひび割れ状況等
- 岩石学的試験：ASRゲルの特定
 - ⇒肉眼および実体顕微鏡による観察
(骨材の種類や形状，岩石種，コンクリート中のASRによる変状等を観察)
 - ⇒偏光顕微鏡による観察
(骨材の岩石種や構成鉱物（反応性鉱物の特定），ASRの発生状況の観察等)
 - ⇒EPMAによる観察
(偏光顕微鏡の観察に基づき，ASR生成物（主にASRゲル）の組成の調査)
 - ⇒促進膨張試験
(将来の膨張可能性を評価)
- 圧縮強度試験・静弾性係数試験
- 曲げ[〃]載荷試験

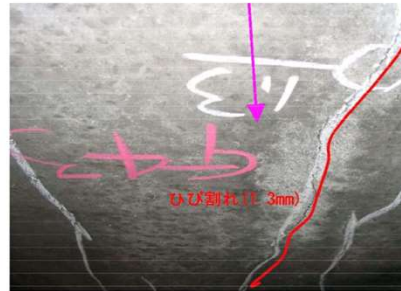
劣化試験桁の損傷状況



劣化試験桁G47のひび割れ状況展開図(単位:mm)



(a) ひび割れ発生状況



(b) ひび割れ部の拡大

写真-1 実橋 PC 桁のひび割れ状況

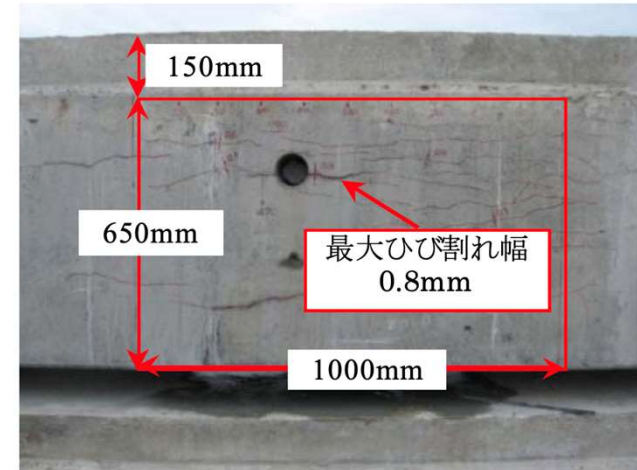


写真-3 代表箇所のひび割れ密度



写真-2 劣化試験PC桁の状況写真

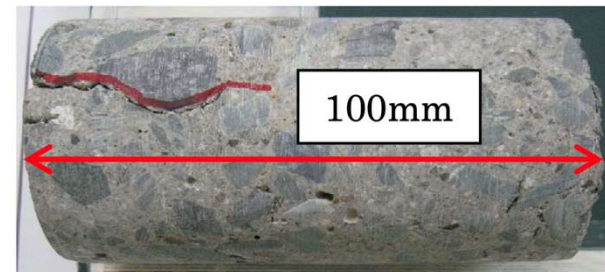
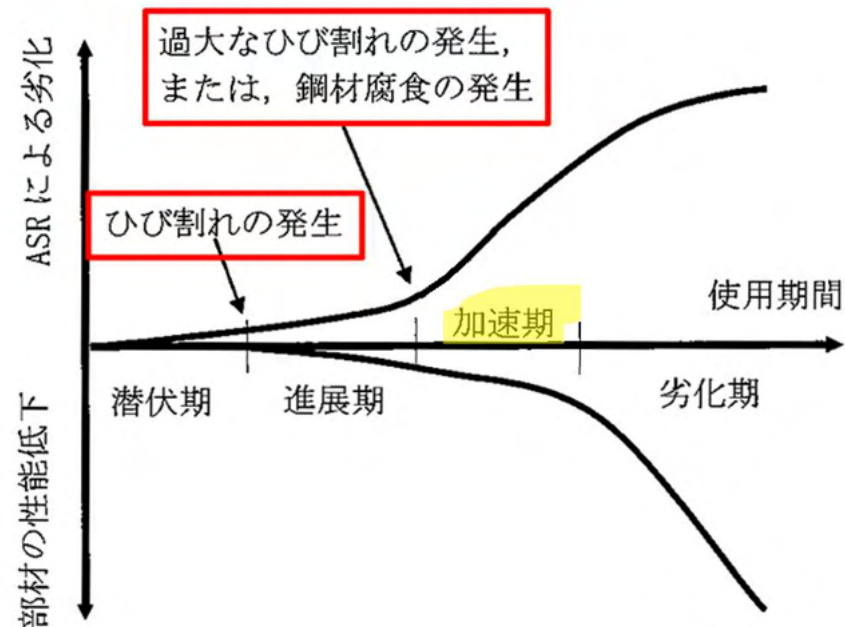


写真-4 コアおよびひび割れ深さ

劣化試験桁の損傷状況

表-1 ASRによる影響を受けた構造物のグレーディング⁹⁾

グレード	劣化の状態
状態1 (潜伏期)	ASRは発生しているが、外観上の変化が見られない。
状態2 (進展期)	ASRによる膨張によってひび割れが発生し、変色ゲルの滲出が見られる。
状態3 (加速期)	ASRによる膨張によるひび割れが進展し、ひび割れの本数、幅および密度が増大する。
状態4 (劣化期)	ASRによるひび割れが多数発生し構造物の変位・変形が大きくなる。段差およびずれが見られる場合がある。かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鋼材腐食が進行し、錆汁が見られる。状況によっては鋼材の降伏および破断が発生する。



ASRによる劣化グレード

岩石学的試験の結果（一例：偏光顕微鏡観察）

< ASR劣化に起因した岩石の特定 >

岩石学的検討の結果，**細骨材**に含まれる**安山岩**ならびに**安山岩質溶結凝灰岩**がASR劣化の主要因であることが判明した．それ以外に粗骨材に含まれる泥質片岩および砂質片岩中の隠微晶石英（遅延膨張性）も若干関与している．

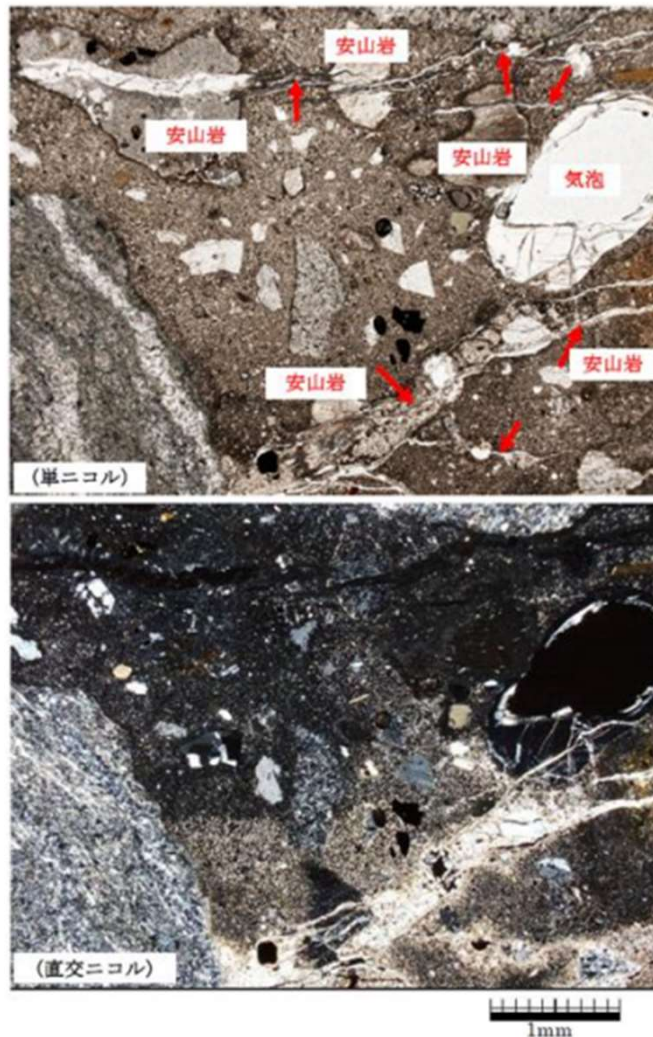


写真-11 ASR発生状況（矢印はASRゲル）

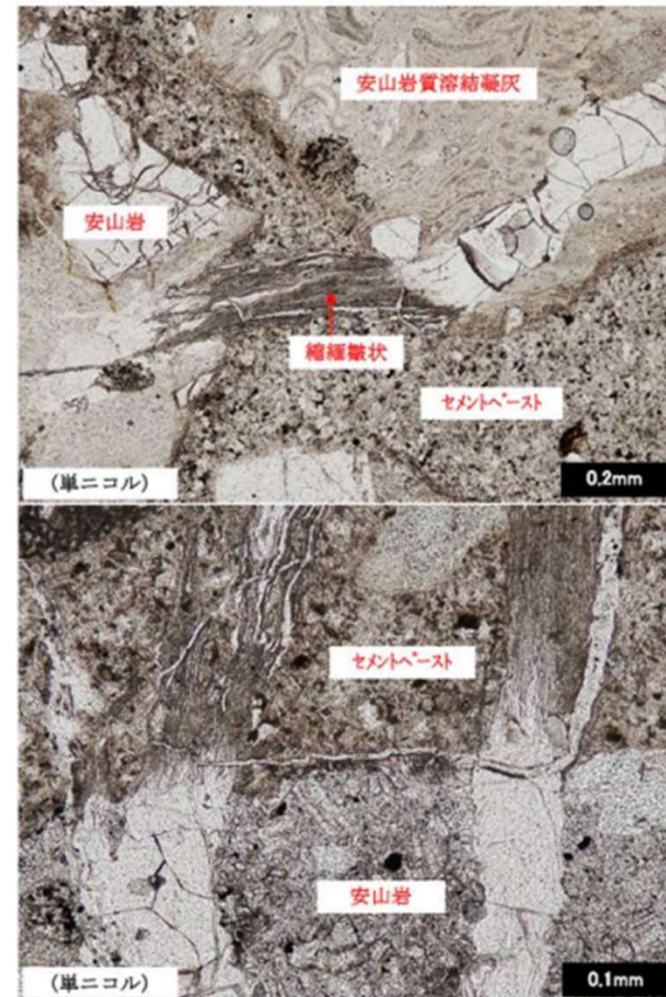


写真-12 ASRゲルの形態変化

岩石学的試験の結果（促進膨張試験）

表-2 促進膨張試験概要

試験項目	試験方法	判定基準
JCI-DD2	コンクリートコアを温度 $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 95%以上の湿気槽に保存し、膨張率の経時変化を測定する。	試験開始後 91 日の膨張率で、 0.05%以上：「有害」
デンマーク法	コンクリートコアを温度 50°C の飽和 NaCl 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。	試験開始後 91 日の膨張で 0.4%以上：「膨張性あり」 0.1~0.4%：「不明確」 0.1%未満：「膨張性なし」
カナダ法	コンクリートコアを温度 $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する（ASTM C 1260 と同様の条件）。	試験開始後 14 日の膨張率で 0.1%以下：「無害」 0.10%~0.20%：「有害と無害な骨材」 ※この場合、試験を継続 0.2%以上：「潜在的に有害」

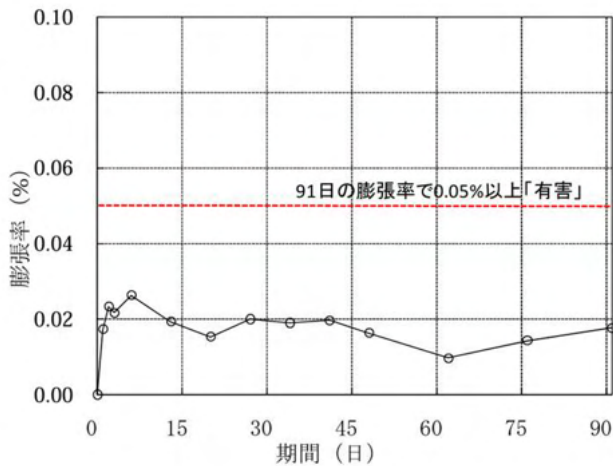


図-4 JCI-DD2による膨張率

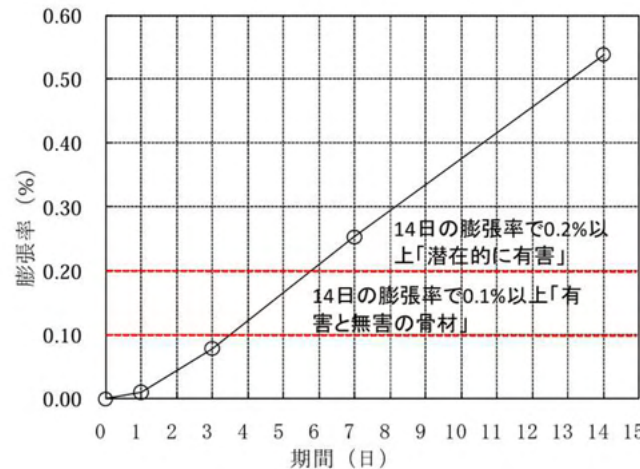


図-6 カナダ法による膨張率

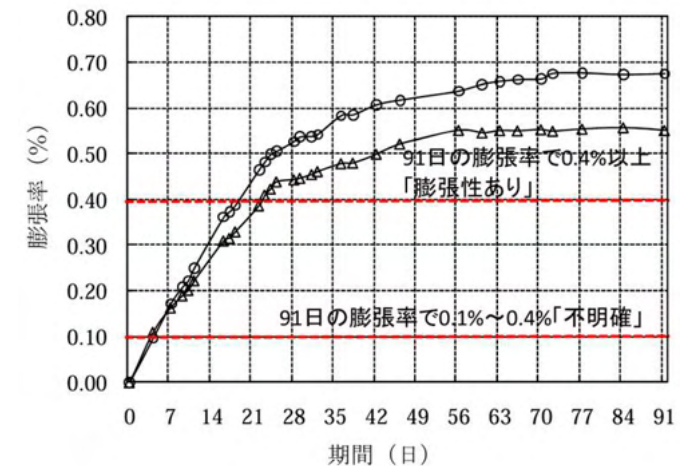
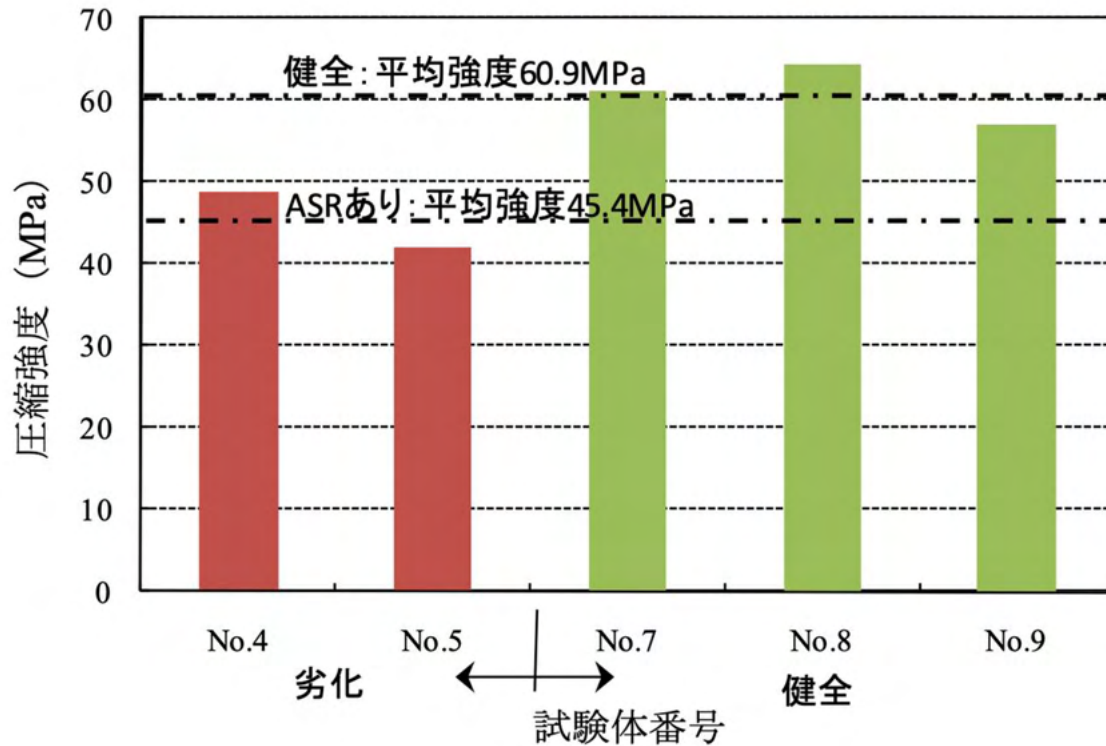


図-5 デンマーク法による膨張率

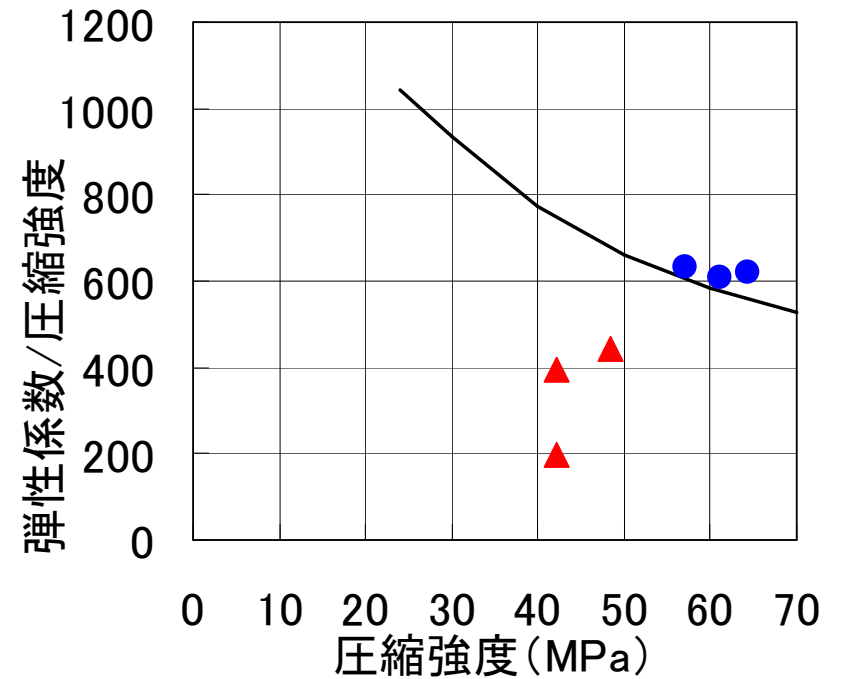
内在アルカリだけでは今後の膨張はないと判断される。

外来アルカリの環境下においては、今後も膨張すると判断される。

強度試験結果



圧縮強度試験結果

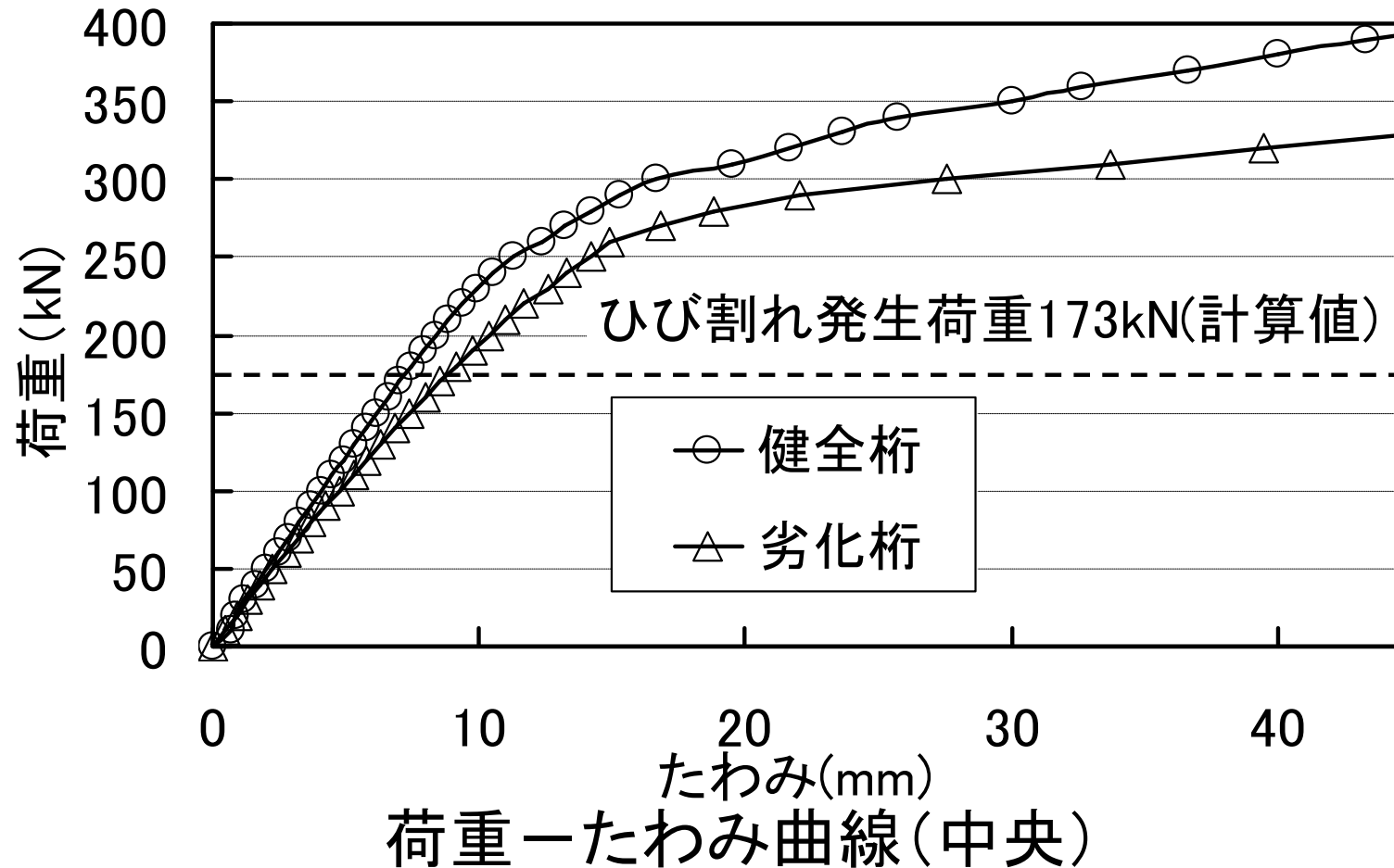


静弾性係数と圧縮強度の関係

静弾性係数

試験桁	静弾性係数(GPa)	備考
劣化試験桁	8.3~21.5 (平均値: 15.2)	ばらつきがあるため試験結果の最小と最大の範囲を示した。
健全試験桁	37.7	平均値を示した。

曲げ載荷試験結果



劣化試験桁において初期の曲げ剛性の低下, ひび割れ後の非線形領域で顕著な差が確認された.

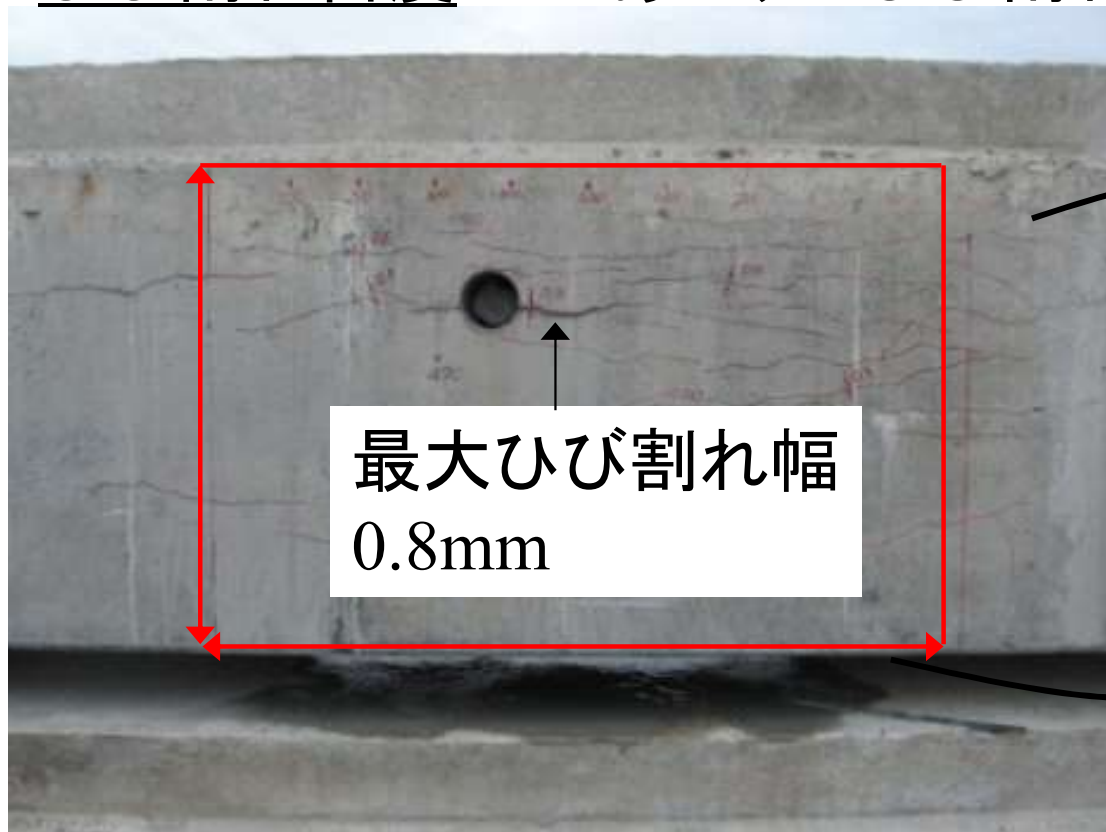
→ASR劣化による弾性係数の低下, プレストレスのロス, 付着力の低下などが原因と考えられる.

ASR劣化したコンクリートの弾性係数評価

数値解析において、劣化構造物の弾性係数をどのように評価するかがポイント⇒均質化法を用いてASR劣化したコンクリートの弾性係数を評価

均質化弾性係数の低下とひび割れ密度との関係を検討

ひび割れ密度: 1m^2 あたりのひび割れ長さ (m/m^2)



橋軸方向のひび割れ

ひび割れ密度 $9.9\text{m}/\text{m}^2$

劣化試験桁の側面図

コンクリート表面のひび割れから弾性係数を推定

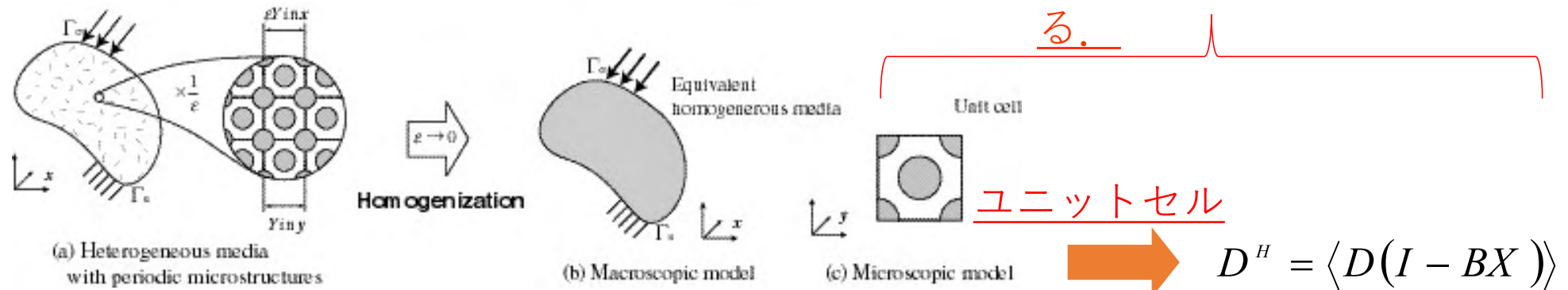
ひび割れを考慮した材料特性の推定 → 劣化度（健全度）評価・耐荷性能評価

デジタル画像からひび割れを検出する大成建設の技術を用い、そのひび割れの情報（幅，長さなど）を基にひび割れの生じたコンクリートの弾性係数を推定する方法を検討する．具体例には，均質化法におけるミクロスケール均質化過程に基づき，ひび割れの幅，長さ，方向などを考慮した均質化弾性係数を求めることで評価する．

ミクロスケールにおける均質化過程（Homogenization）

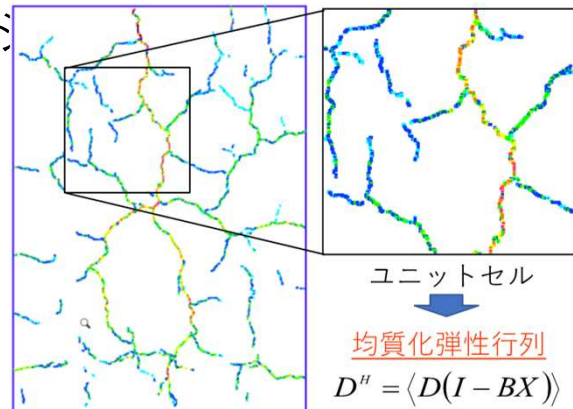
➡ 非均質材料からなる構造物の平均的な変形を左右する，等価な材料定数を見つけること（均質化弾性係数）

この処理を利用する。



均質化弾性係数

（イメージ）



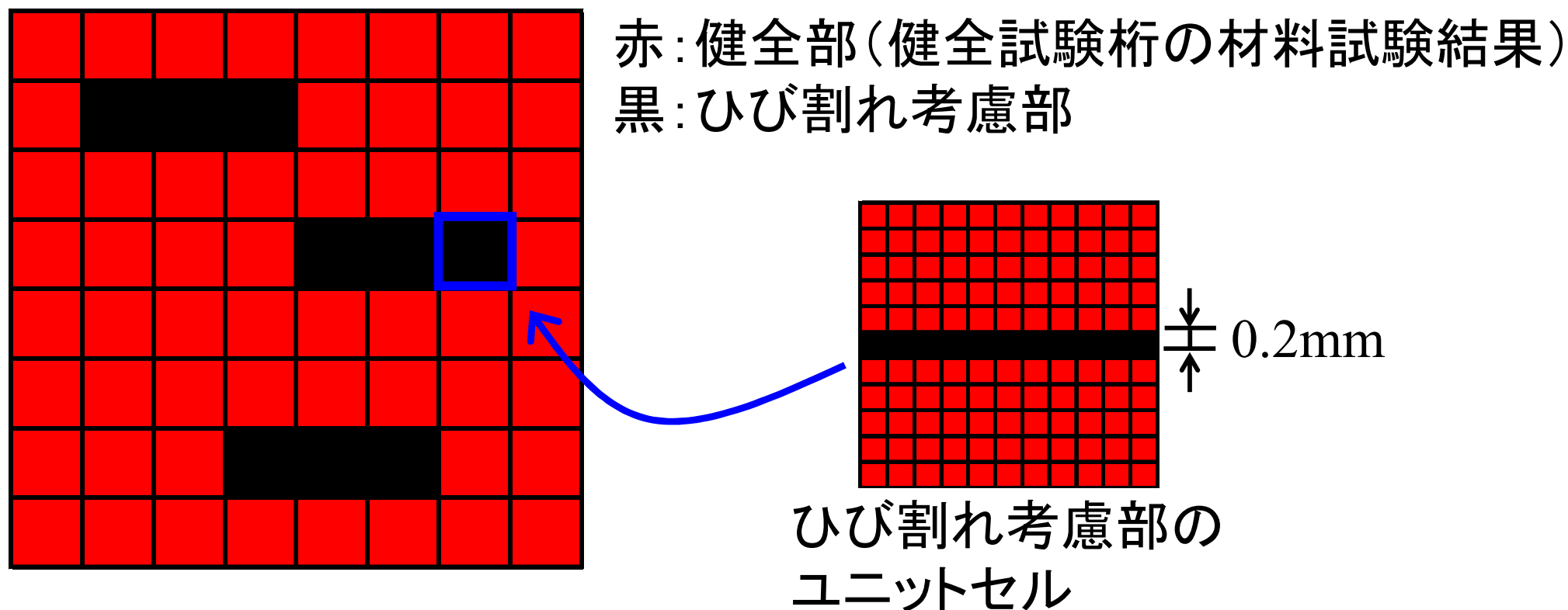
ひび割れ幅を色で識別できる。

ひび割れ幅に応じたひび割れ領域の弾性係数と健全な領域の弾性係数を用いて，ユニットセルの均質化弾性係数を求めることができる。

材料劣化（ひび割れ）を考慮した均質化弾性係数

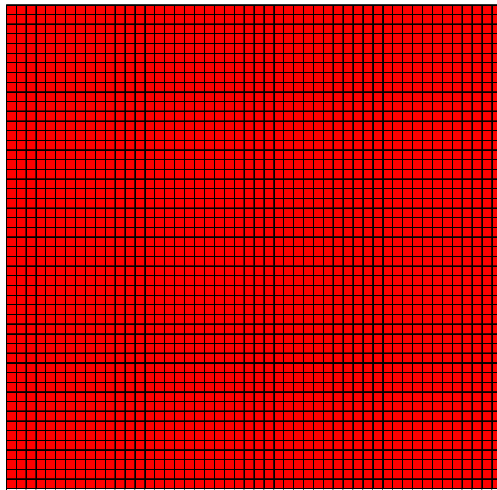
今回採用したユニットセルのイメージ

- 検討する際の仮定として、応力状態は平面ひずみ状態を仮定
- 均質化法で用いるユニットセルは健全部とひび割れ考慮部の二相材料とした

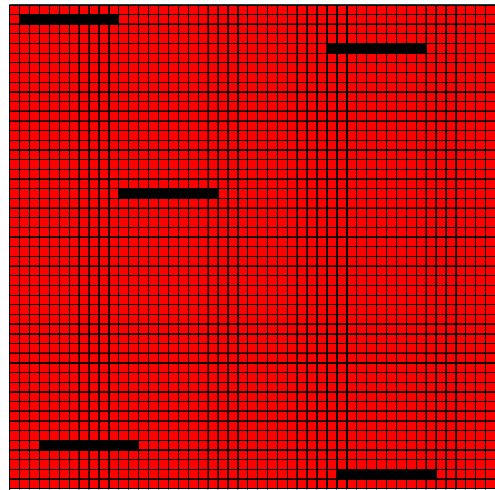


均質化法に用いるユニットセルの概念図

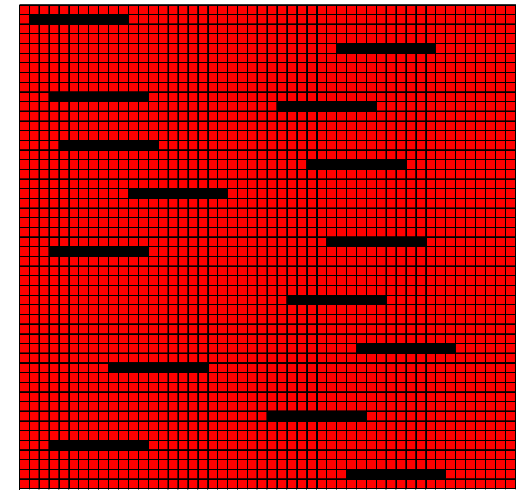
ひび割れ密度を考慮したユニットセル



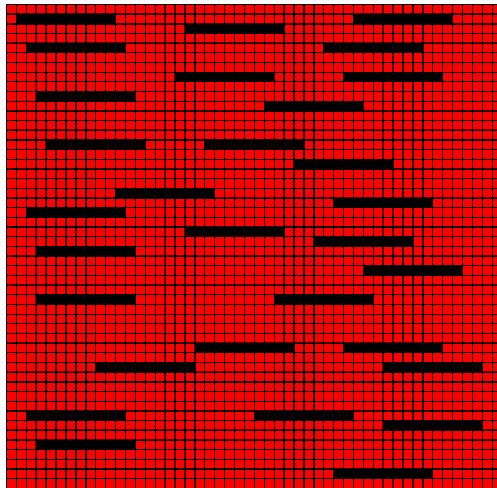
(a) 0 m/m²



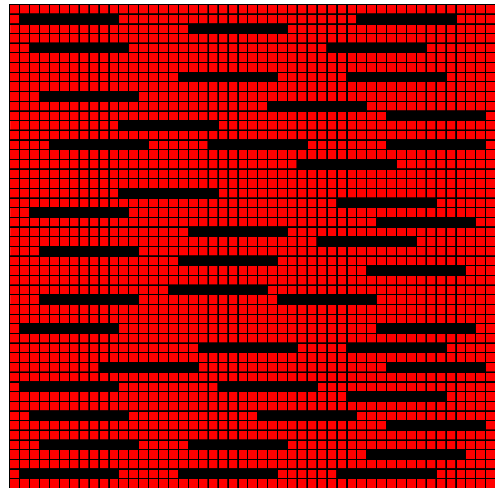
(b) 1 m/m²



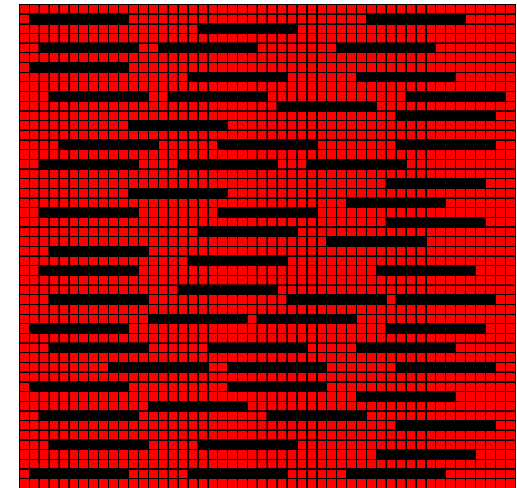
(c) 3 m/m²



(d) 6 m/m²



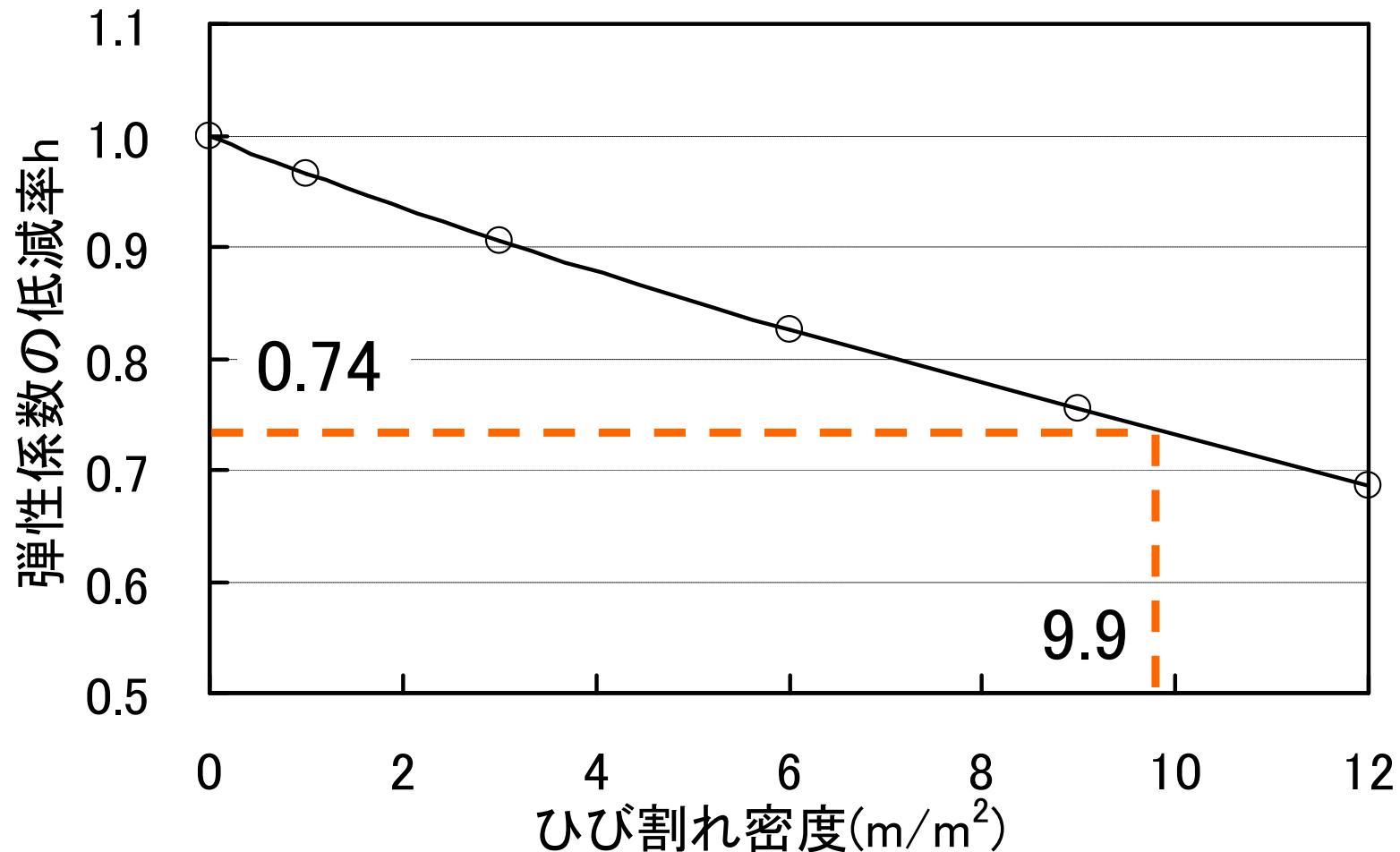
(e) 9 m/m²



(f) 12 m/m²

* 図中の水平方向のひび割れは、橋軸方向のひび割れを表す
均質化法で用いたユニットセル

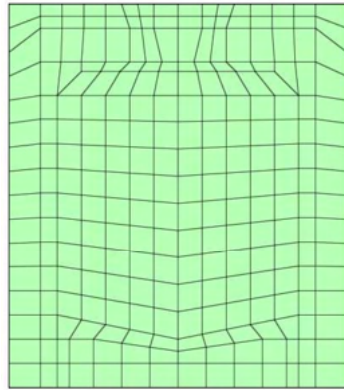
均質化弾性係数の低減率



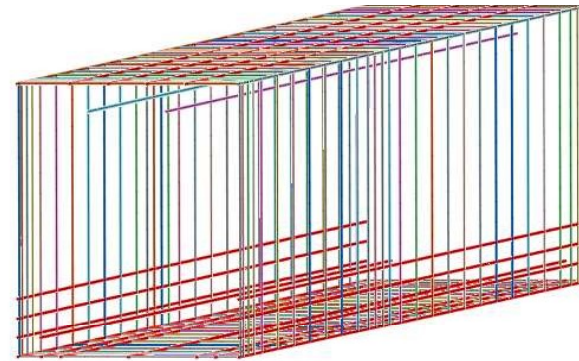
均質化弾性係数の低減率とひび割れ密度の関係

非線形有限要素解析で用いる劣化試験桁の弾性係数は、健全試験桁の弾性係数37.7GPaに0.74を乗じた27.9GPaを用いる。

有限要素モデル



(a) コンクリート(断面図)

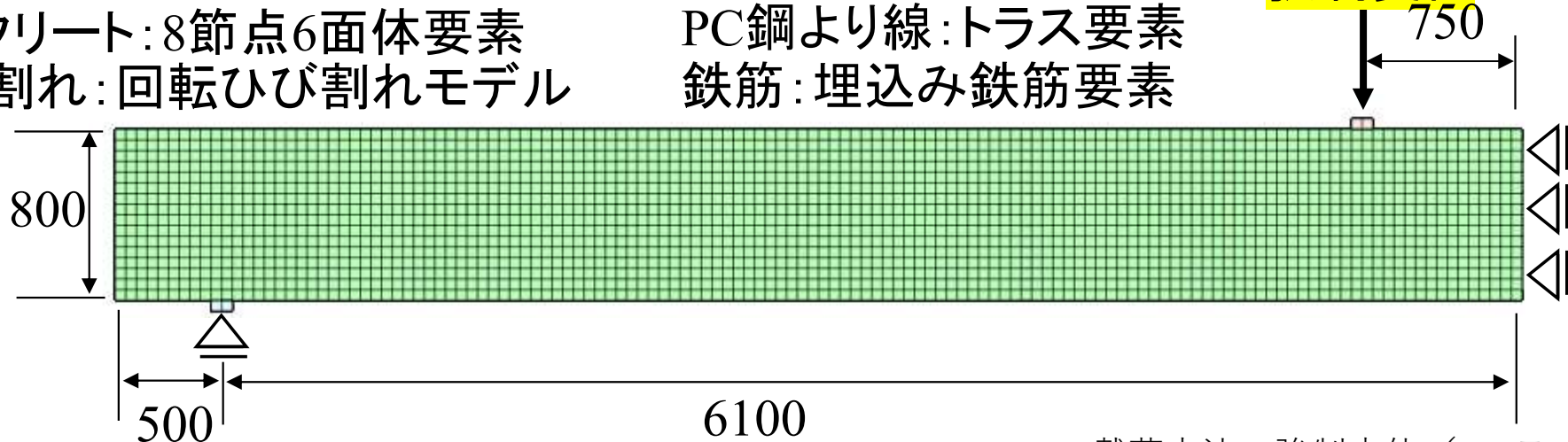


(b) 鉄筋およびPC鋼より線

コンクリート: 8節点6面体要素
ひび割れ: 回転ひび割れモデル

PC鋼より線: トラス要素
鉄筋: 埋込み鉄筋要素

強制変位



(c) 境界条件および荷重条件(側面図, 単位mm)

荷重方法: 強制変位 (1ステップ
0.5mm)

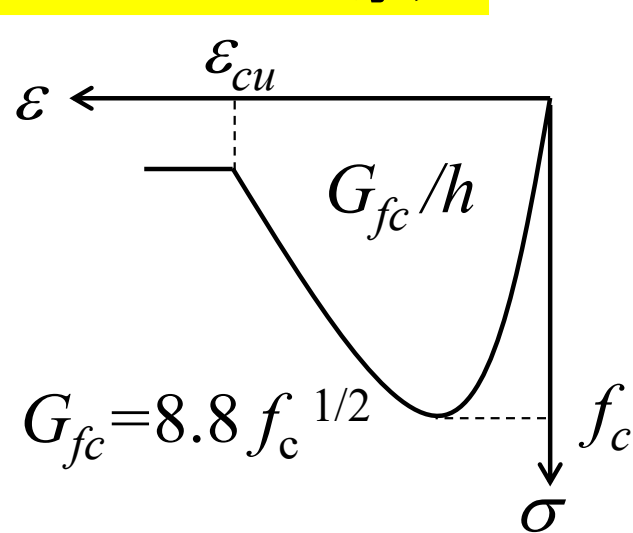
解析モデルおよび解析条件

プレストレスは、長期供用のプレストレスロスを考慮するため、クリープ係数および乾燥収縮度は終局値を用いている。

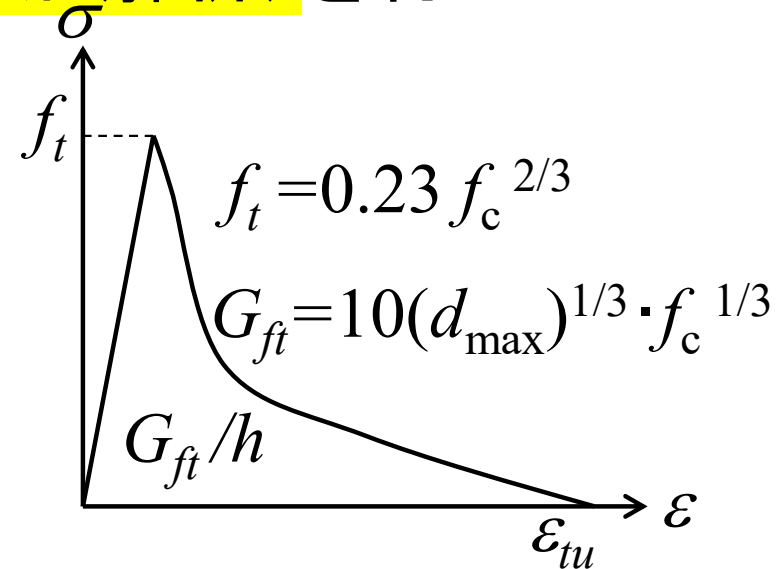
材料モデル（コンクリート）

midas FEA を用いて**施工段階解析**

(**プレストレス導入** → **材料非線形解析**)を行った。



(a) 圧縮モデル(放物線)

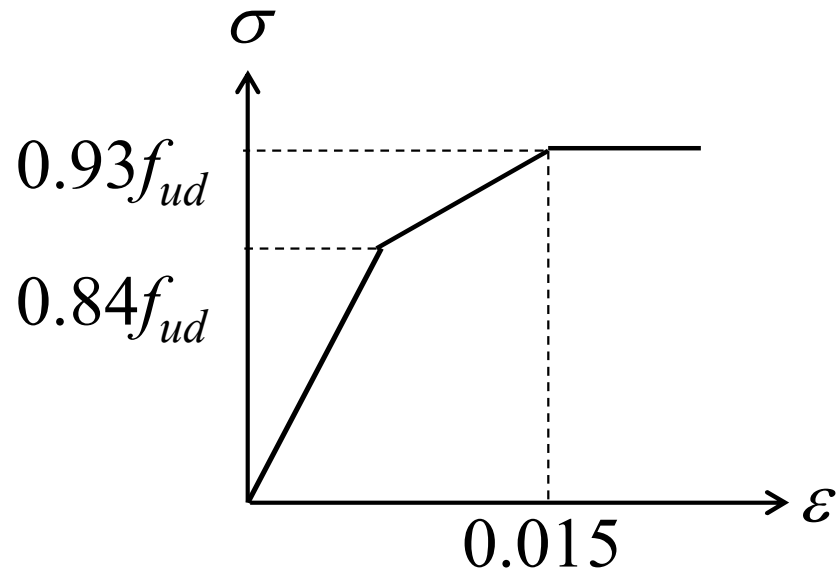


(b) 引張モデル(Hordijk)

G_{fc} : コンクリートの圧縮破壊エネルギー、 f_c : コンクリートの圧縮強度
 G_{ft} : コンクリートの引張破壊エネルギー、 f_t : コンクリートの引張強度
 h : 要素の等価長さ、 d_{\max} : 粗骨材の最大寸法

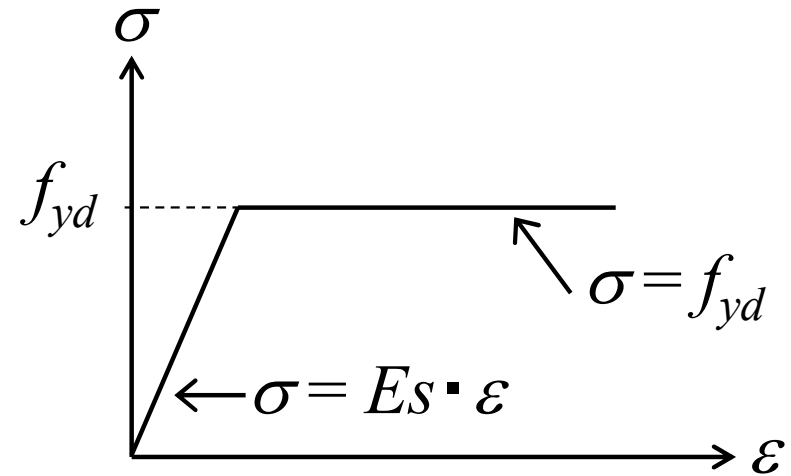
コンクリートの構成モデル

材料モデル (鋼材)



(a) PC鋼材

f_{ud} : PC鋼材の引張強度



(b) 鉄筋

f_{yd} : 鉄筋の設計降伏強度

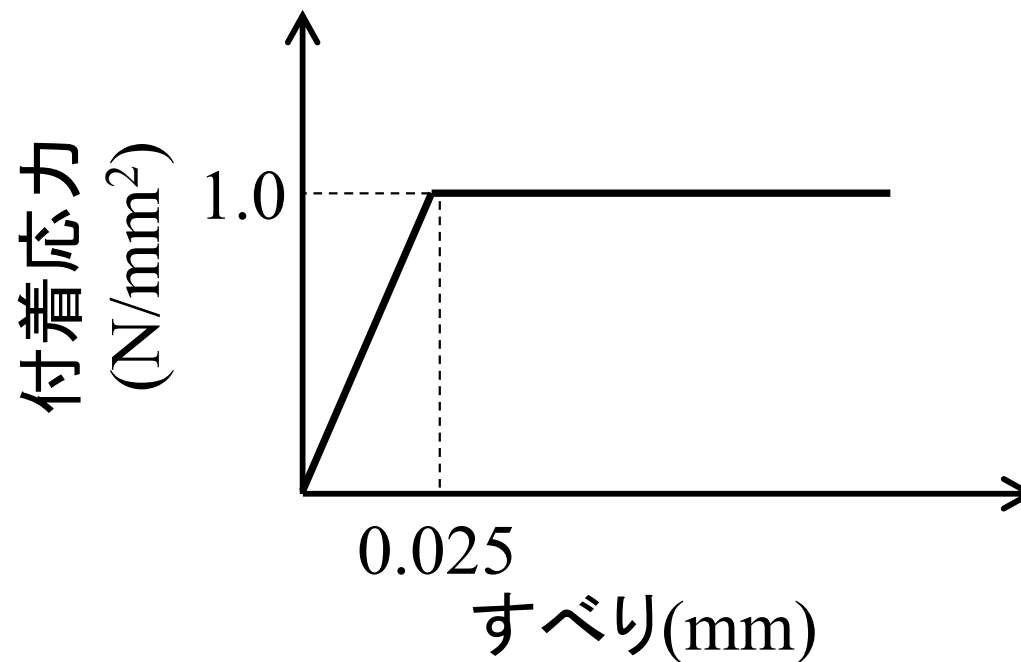
E_s : 鉄筋の弾性係数

PC鋼材と鉄筋の構成モデル

材料モデル（PC鋼より線とコンクリートの付着）

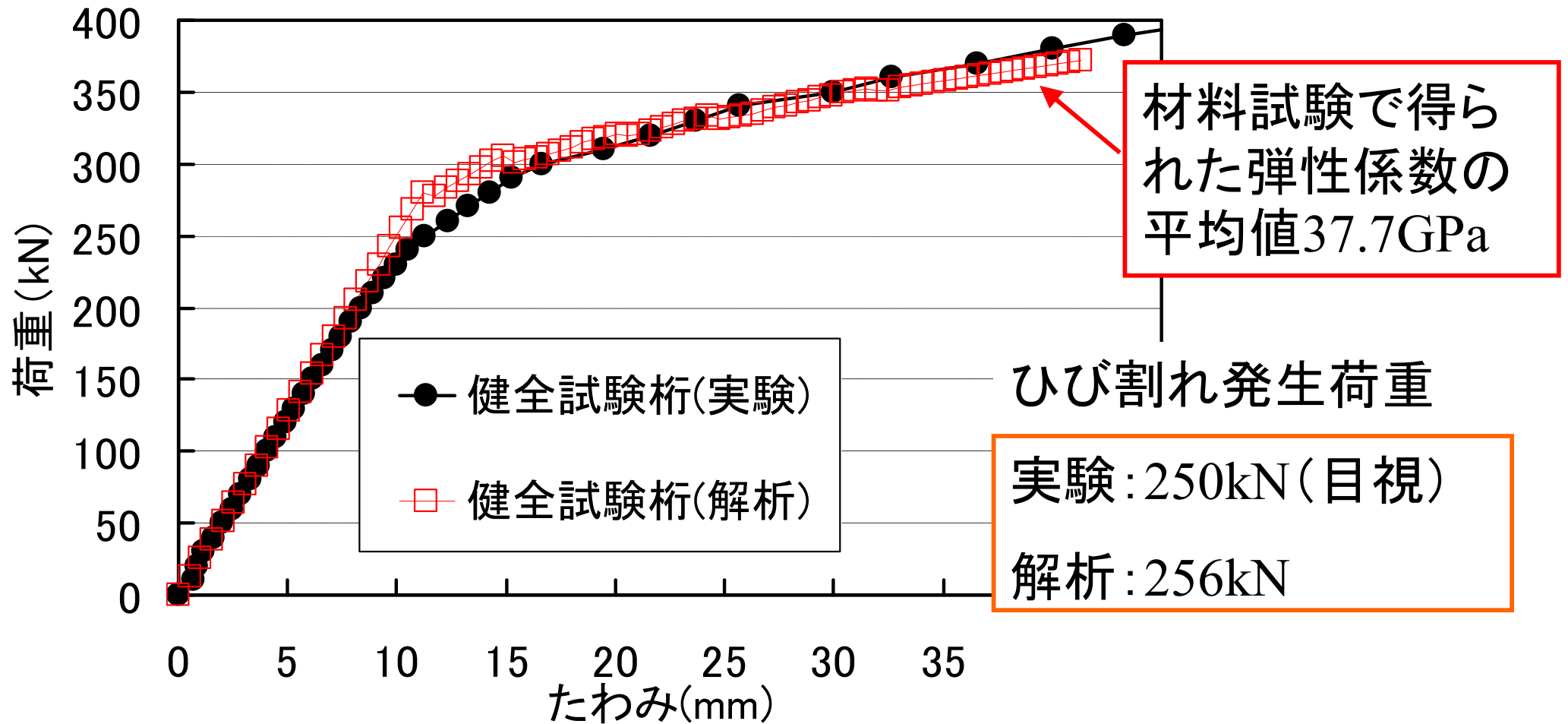
ひび割れ発生に伴う、コンクリートとPC鋼材の付着力の低下を考慮するために、付着応力-すべりモデルを決定した。要素は**インターフェイス要素**を採用した。

モデル形状と閾値は、既往の文献を参考にし、予備解析を行い決定した。



付着応力-すべりモデル

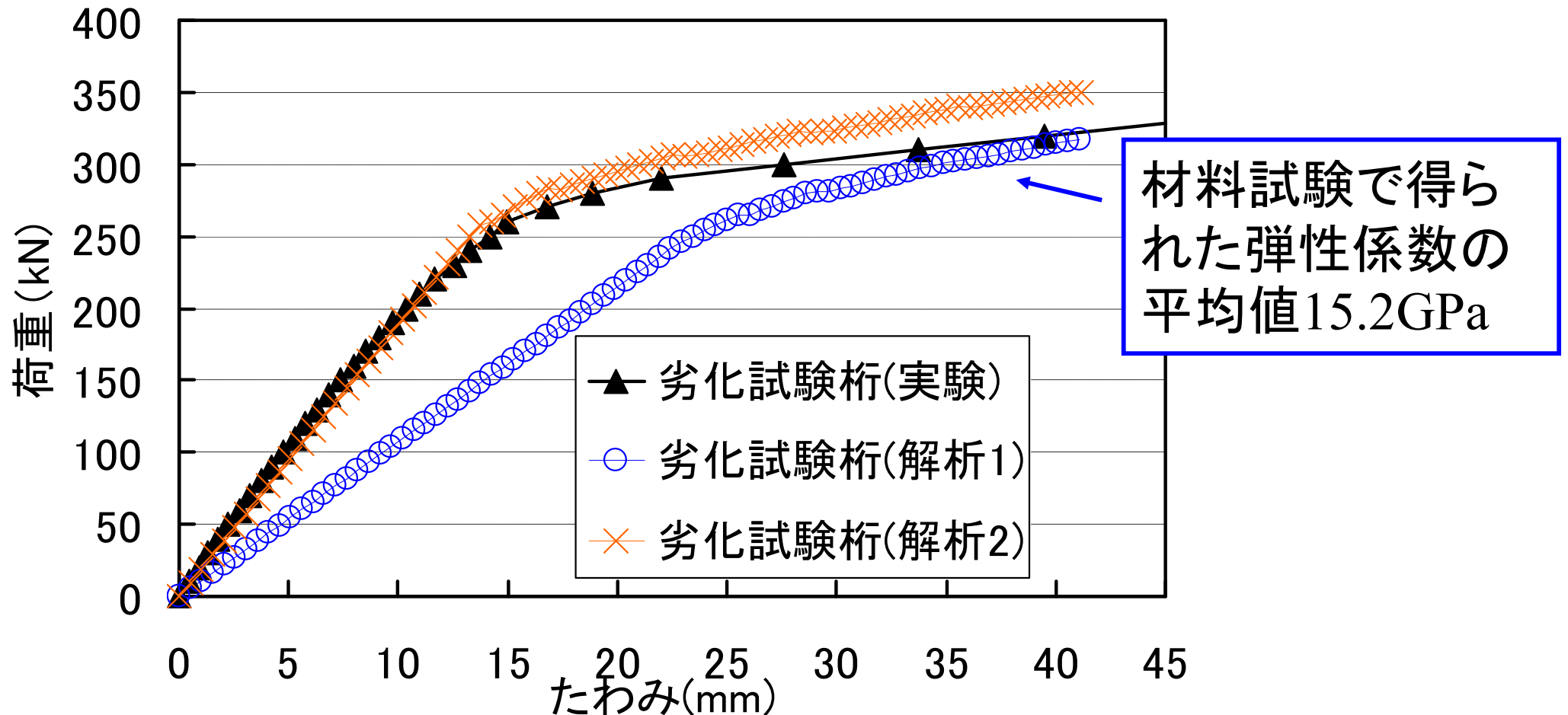
解析結果（健全試験桁）



健全試験桁の荷重－たわみ曲線

健全試験桁の解析結果は、実験結果とほぼ一致している。従って健全試験桁では、コンクリートコアから得られる物性値を数値解析に用いることで耐荷性能を評価できる。

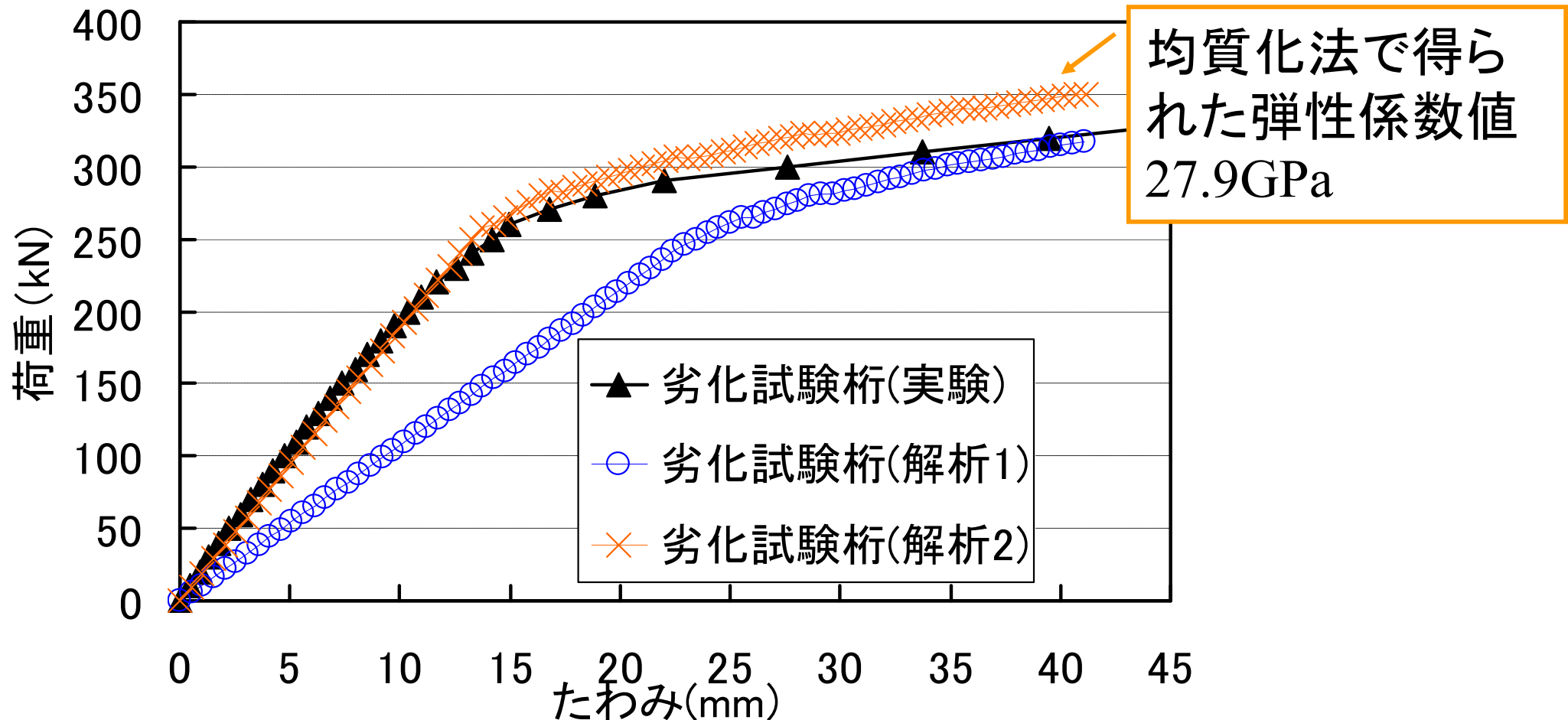
解析結果（劣化試験桁：弾性係数）



劣化試験桁の荷重－たわみ曲線

劣化試験桁(解析1)の結果は、線形および非線形領域ともに実験値と異なっている。従って劣化試験桁では、コンクリートコアから得られる弾性係数を用いると、実験結果を再現できず、正しく耐荷性能を評価できない可能性がある。

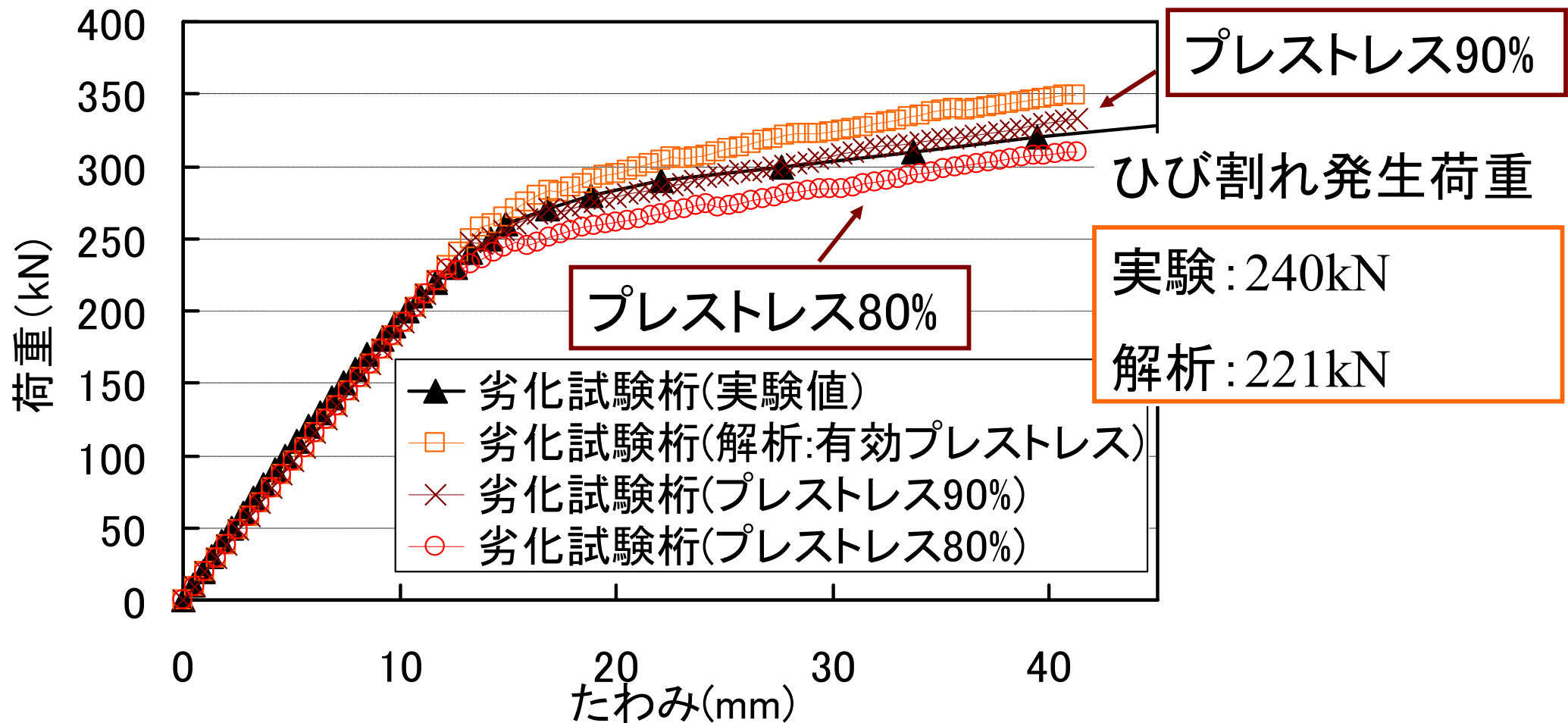
解析結果（劣化試験桁：弾性係数）



劣化試験桁の荷重－たわみ曲線

劣化試験桁(解析2)の結果は、実験値と線形領域で一致している。しかし、非線形領域では実験値に比べ高めの値を示している。

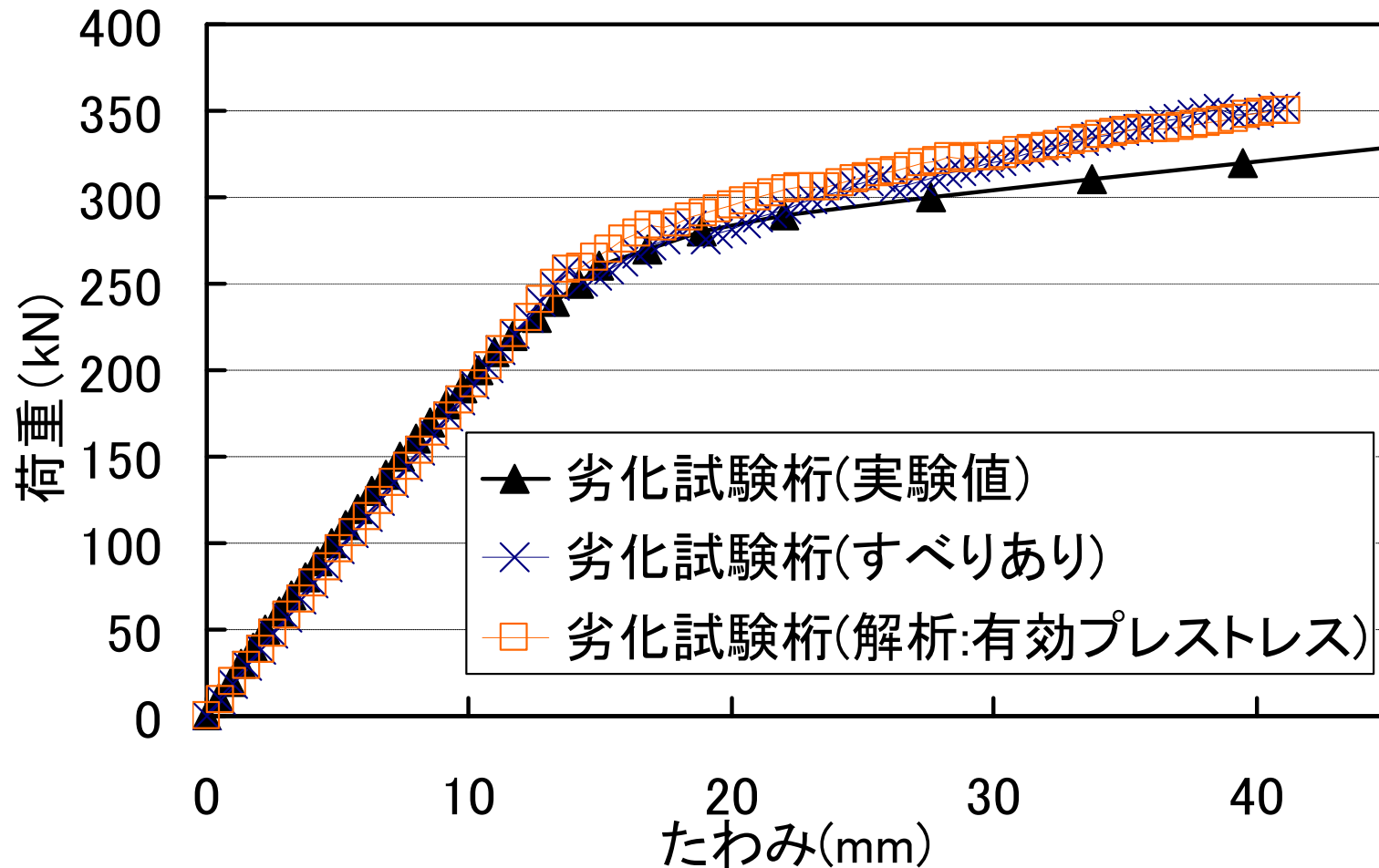
解析結果（劣化試験桁：プレストレス減少）



プレストレスの低下を考慮した荷重-たわみ曲線

劣化試験桁(プレストレス90%)では、実験結果と良く一致している。このように曲げ破壊試験をほぼ再現できたため、数値解析的に耐荷性能評価が可能であると考えられる。

解析結果（劣化試験桁：すべり）

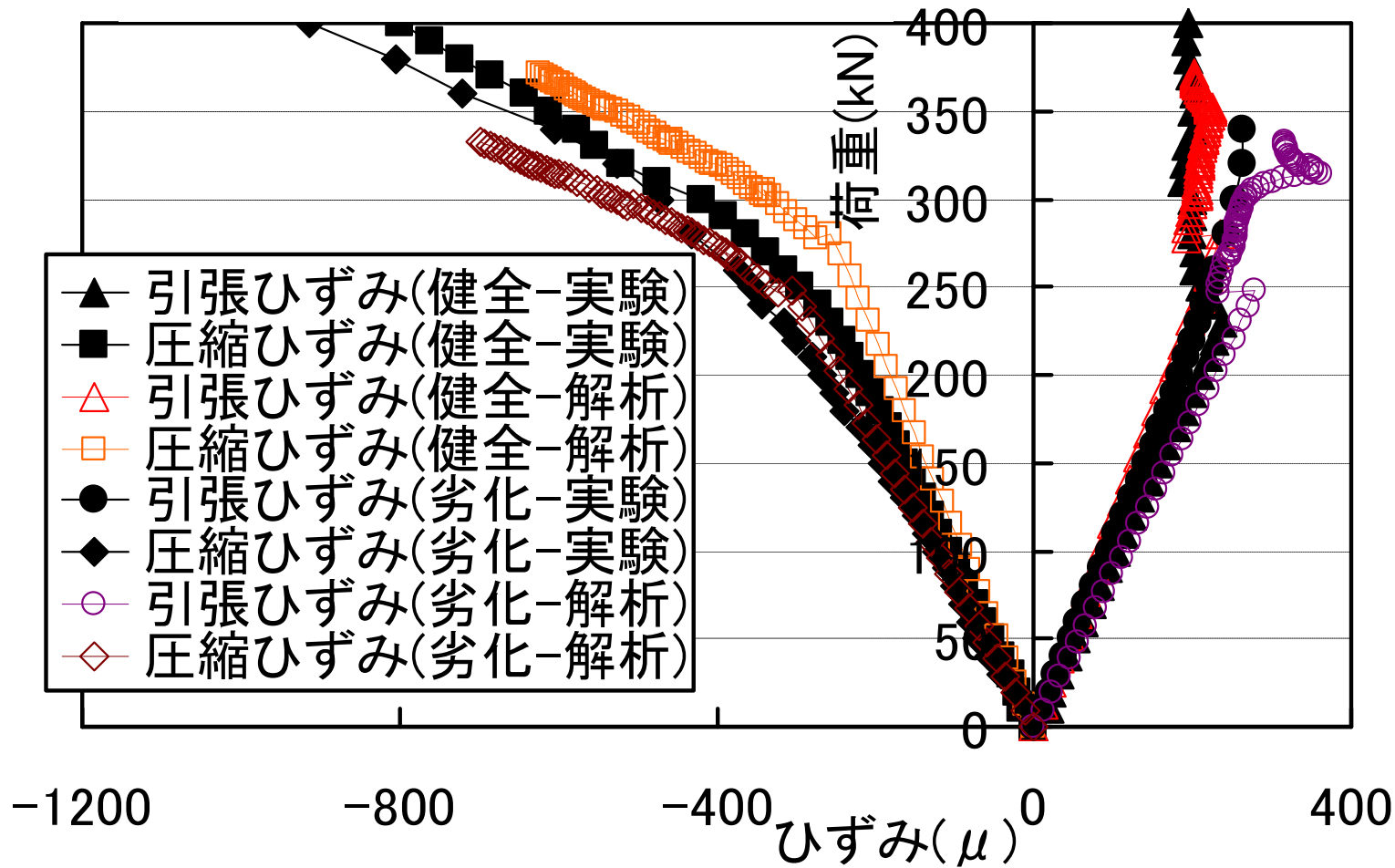


すべりを考慮した荷重－たわみ曲線

劣化試験桁(すべりあり)の結果は、すべりを考慮しない場合とほぼ同じ結果を得た。このことより、付着力低下に伴うPC鋼より線のすべりより、供用時に生じたプレストレス低下の影響が大きいと推察される。

解析結果（劣化試験桁：桁中央上下面のひずみ）

劣化桁プレストレス90%での解析



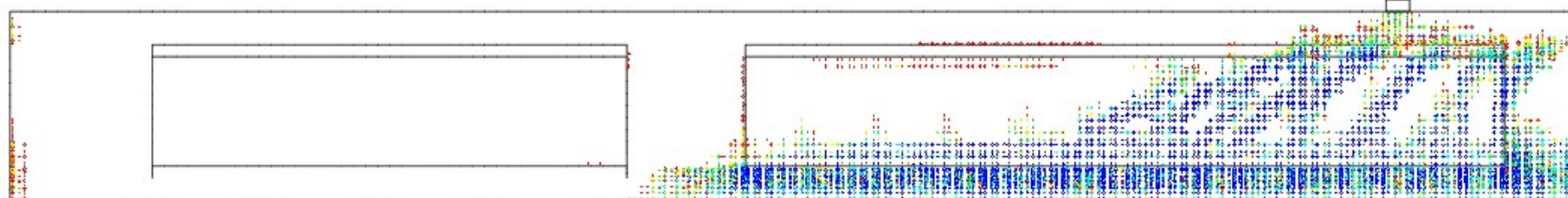
荷重－ひずみ曲線

健全試験桁および劣化試験桁の解析結果は実験結果とほぼ一致していることが確認でき、本解析手法の妥当性を示している。

解析結果（ひび割れ進展状況の比較）



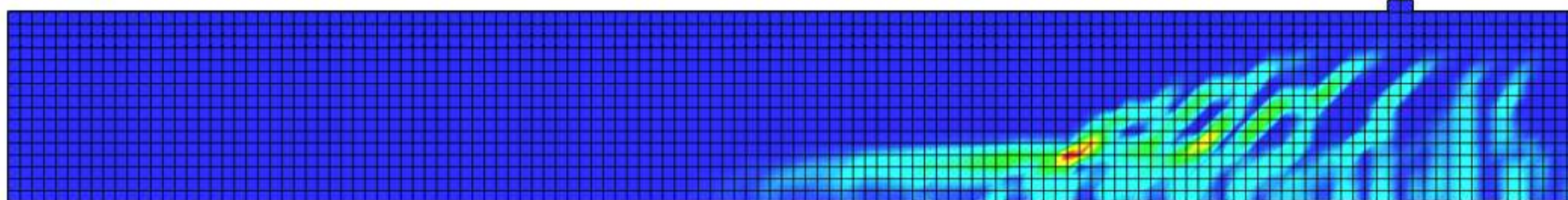
図-21 曲げ破壊荷重でのひび割れ図（実験）



3D ELEMENT CRACK PATTE
Sknn, N/mm²

2.7%	+2.88e+000
2.2%	+2.70e+000
2.2%	+2.52e+000
2.2%	+2.34e+000
2.2%	+2.16e+000
2.2%	+1.98e+000
2.4%	+1.80e+000
2.7%	+1.62e+000
2.7%	+1.44e+000
3.1%	+1.26e+000
3.6%	+1.08e+000
4.4%	+9.00e-001
5.8%	+7.20e-001
8.3%	+5.40e-001
8.5%	+3.60e-001
44.8%	+1.80e-001
	+0.00e+000

図-22 曲げ破壊荷重でのひび割れ図（解析：プレストレス90%）

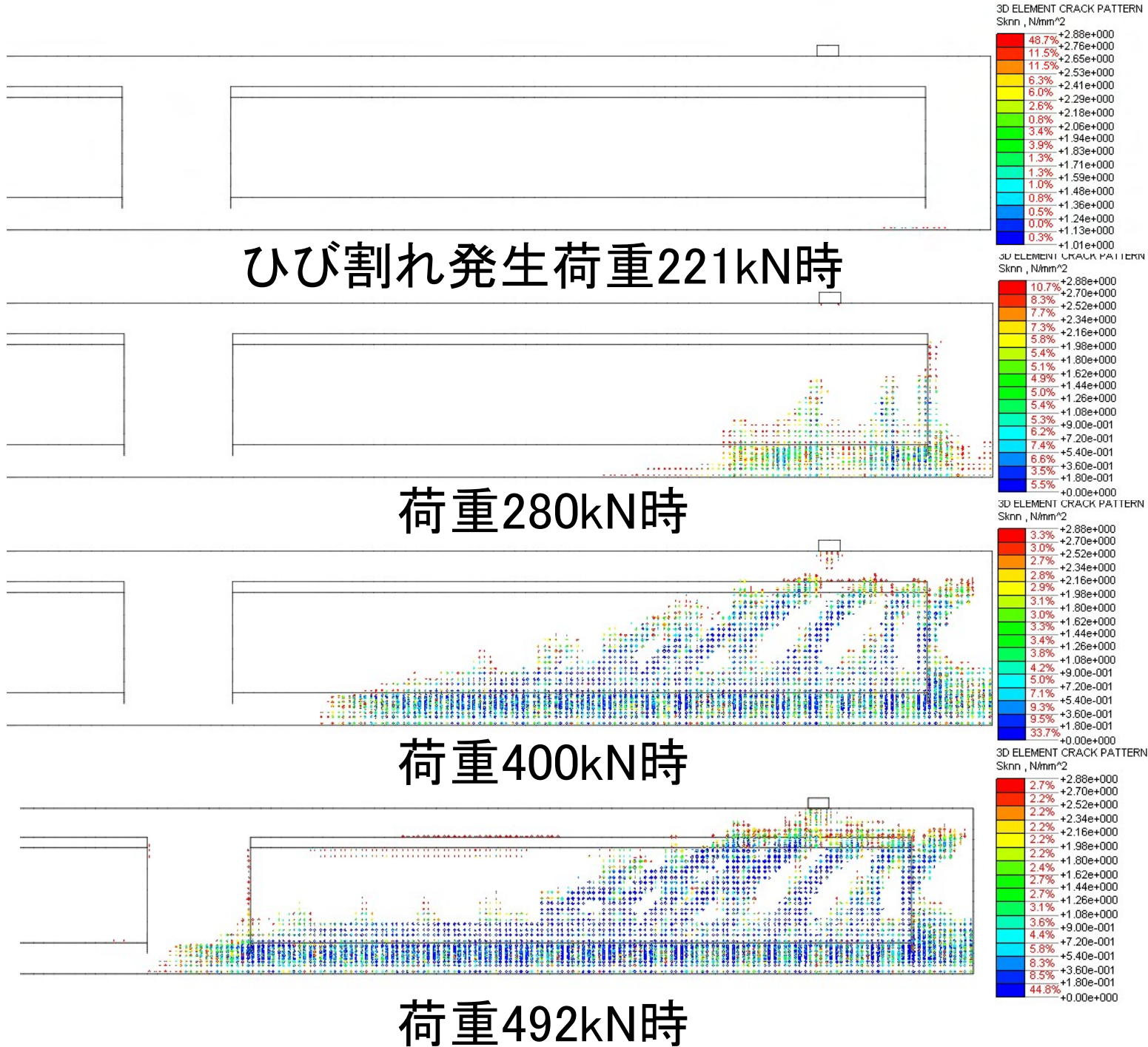


3D ELEMENT STRAIN
E1, None

0.0%	+5.65e-002
0.1%	+5.30e-002
0.1%	+4.94e-002
0.1%	+4.59e-002
0.2%	+4.24e-002
0.3%	+3.88e-002
0.6%	+3.53e-002
1.0%	+3.18e-002
1.9%	+2.82e-002
2.9%	+2.47e-002
4.2%	+2.12e-002
6.8%	+1.77e-002
10.8%	+1.41e-002
14.9%	+1.06e-002
15.1%	+7.06e-003
40.9%	+3.52e-003
	-8.23e-006

図-23 曲げ破壊荷重での主ひずみ図（解析：プレストレス90%）

解析結果（ひび割れ進展状況の比較）



まとめ

1. ASRの生じている劣化試験桁では、コンクリートコアの材料試験から得られる弾性係数を用いると、実現象とは異なる解析結果になる可能性がある。
2. ASR劣化したプレテンションPC桁の弾性係数およびプレストレスの低下に対する適切な評価により、劣化試験桁の曲げ破壊試験をほぼ再現でき、耐荷性能を数値解析により評価可能であることが示された。
3. 本研究で対象としたASR劣化試験桁では、プレストレスが設計の有効プレストレスから10%程度低下している可能性がある。
4. 本研究で用いたコンクリートとPC鋼より線の付着応力-すべりモデルでは、載荷時のすべりの影響はほぼ見られなかった。しかし、今後詳細な検証が必要である。