

論文 ASR による劣化を受けた PC はり部材の力学的挙動に関する解析的検討

新名 勉^{*1}, 松本 茂^{*2}, 佐藤 彰紀^{*3}, 久利 良夫^{*4}, 真鍋 英規^{*5}

Analytical Study on Mechanical Behavior of Prestressed Concrete beams
affected by Alkali Silica Reaction

Tsutomu NIINA^{*1}, Shigeru MATSUMOTO^{*2}, Akinori SATO^{*3}, Yoshio HISARI^{*4}, and Hideki MANABE^{*5}

要旨: ASR による劣化が PC 部材の耐荷性能に与える影響を検討することを目的とし, ASR 劣化した PC はりの載荷試験結果に対して, FEM 解析による検証を行った. 着目した項目は, コンクリート物性値, ASR 膨張によるひずみおよびひび割れの影響, せん断補強筋の付着特性などであり, 3次元非線形 FEM により解析を行った. 検討の結果, 着目した項目を適切に考慮することにより, ASR により劣化した PC はり部材の力学的挙動をある程度の精度をもって再現することが可能となった. なかでも, ASR に伴う膨張をスターラップ内部の初期ひずみとして適切に評価することが重要であることが解った.

キーワード: ASR, 劣化, PC はり, 力学的挙動, 3次元非線形 FEM 解析

1. はじめに

阪神高速道路の一部のコンクリート構造物にアルカリ骨材反応 (以下, ASR) が確認されている. 少数ではあるが, ASR による劣化を受けた PC はり部材において, スターラップ曲げ加工部の破断が生じている事例もあり, 構造物の安全性を含め, 維持管理上重要な課題であると認識されている¹⁾. せん断補強筋であるスターラップの破断は, せん断耐荷力の低下に直接繋がるものであるが, ASR 劣化を受けスターラップが破断した PC 部材の耐荷力評価に関する研究は少なく, 耐荷力機構等は十分には明らかとされていないのが現状である. 阪神高速では, ASR 劣化によりスターラップに破断が生じた場合の PC はり部材の力学的挙動の解明を目的として, 実験および解析を実施してきた^{2,3,4)}.

本稿では, 反応性骨材を用いた約 4 年間自然暴露した PC はり部材の載荷試験結果を解析的に検証し, ASR により生じる劣化が部材の耐荷性に与える影響の評価を試みた. ASR の進行により健全なコンクリートに生じた劣化項目として, ①コンクリートの物性値, ASR 膨張による②ひずみおよび③ひび割れの影響, ④せん断補強筋の付着特性などに着目し, 解析を実施した.

2. 載荷試験結果^{2,3,4)}

図-1 に解析対象とした供試体を, 表-1 に供試体諸元およびせん断耐荷力試験結果を示す. 反応性骨材を用いた ASR 供試体は, 2004 年 1 月~2 月にかけて作製し, 約 4 年間の自然暴露により ASR を発現させた. 健全供試体は 2007 年 12 月に作製し, 2008 年 2 月に全供試体のせん断

*1 阪神高速道路(株) 技術部 技術開発課 主任

*2 (財)阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 企画課 課長

*3 阪神高速道路(株) 神戸管理部 保全工事課

*4 (財)阪神高速道路管理技術センター 調査研究部 調査研究課 課長補佐

*5 (株)国際建設技術研究所 構造設計部 部長

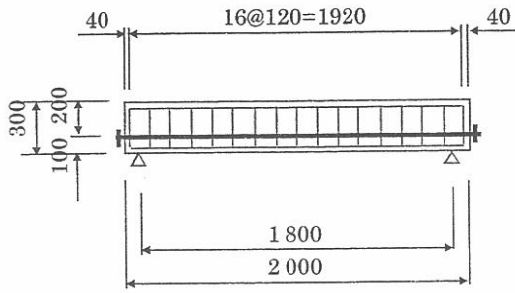


図-1 供試体概要図

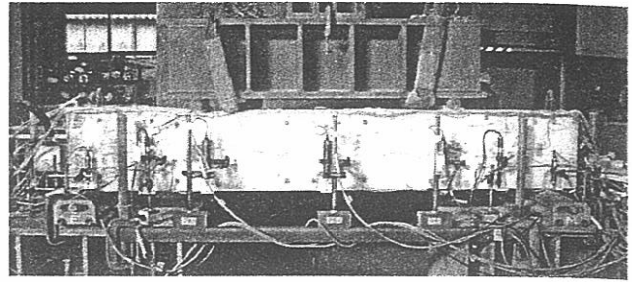


図-2 せん断載荷試験状況 (ASR 供試体)

表-1 供試体諸元およびせん断耐荷力試験結果

供試体分類	供試体No.	a/d	プレストレス (N/mm ²)		スターラップ 破断本数(本)	破壊荷重 (kN)		スターラップ 破断0本に対する 破壊荷重比 (実験値)	破壊荷重比 実験値/計算値
			計画	残存プレストレス		計算値	実験値		
健全	V-1	2	10	9.2	0	628	794	—	1.26
ASR	I-1			10.0	0	646	879	1.00	1.36
	I-2			10.1	1	649	780	0.89	1.20
	I-3			8.6	2	615	715	0.81	1.16
	I-4			8.6	3	615	700	0.80	1.14
健全	V-2	2	7.5	6.9	0	576	834	—	1.45
ASR	I-5			8.5	0	613	834	1.00	1.36
	I-6			7.1	1	581	737	0.88	1.27
	I-7			7.4	2	588	750	0.90	1.28
	I-8			8.0	3	601	713	0.85	1.19

載荷試験を実施した。図-2 に試験状況を示す。

載荷試験直前の ASR の進行状況は、0.2mm 以上のひび割れ密度は約 6.0m/m²、コンクリート表面ひずみの最大値は約 8000 μ 、スターラップの最大ひずみは約 2500 μ であった。図-3、4 にコンクリート表面ひずみおよびスターラップひずみの経時変化をそれぞれ示す。これらの経時変化の推移から、ASR 膨張は今後著しく増加する可能性は低く、ひび割れ状況と併せて、せん断耐荷力を検討するレベルに達していると判断し、せん断載荷試験を実施した。

図-5 に ASR 供試体 (I-1)、健全供試体 (V-1) の荷重-変位関係を示す。供試体はいずれも斜め引張破壊した。ASR 供試体と健全供試体を比較した場合、初期剛性はほぼ同様であるが、ひび割れは ASR 供試体のほうが健全供試体より小さい荷重で発生し、ひび割れ発生後の剛性も小さくなった。一方、表-1 によれば、破壊荷重は健全供試体が 794kN (計算値 628 kN) に対し、ASR 供試体は 879kN (計算値 646kN) と大きくなった。導入プレストレスレベルを変えた供試体の破壊荷重は、健全および ASR 供試体

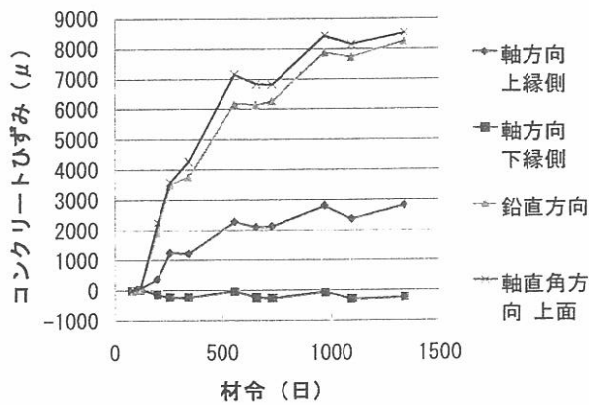


図-3 コンクリート表面ひずみの経時変化

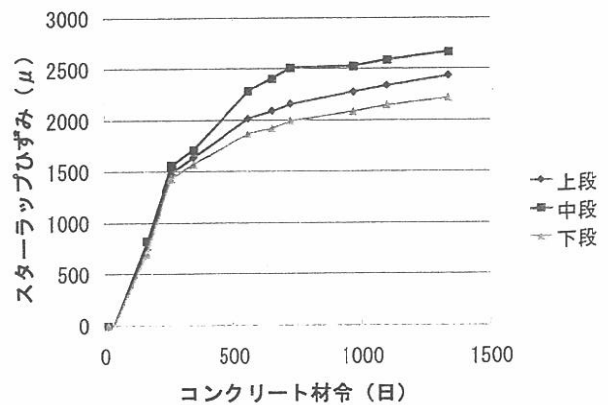
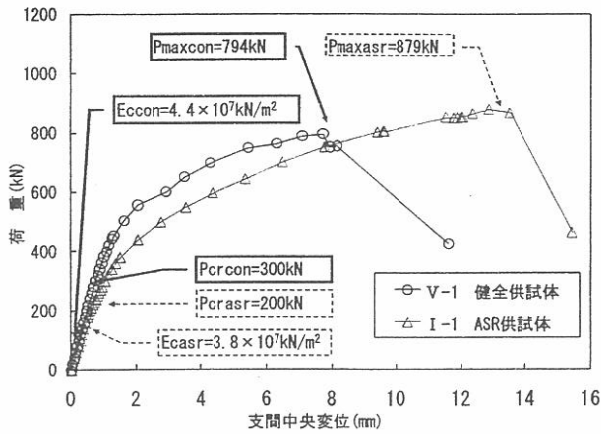


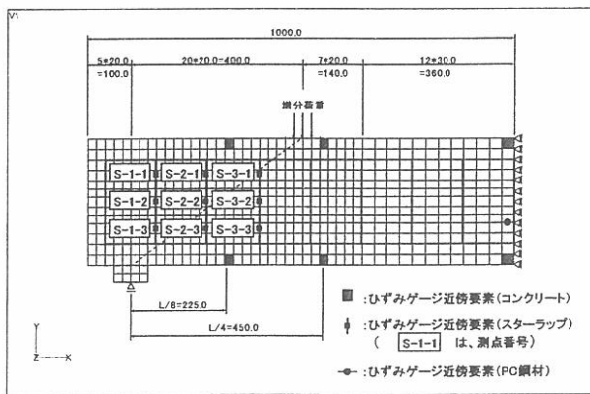
図-4 スターラップひずみの経時変化



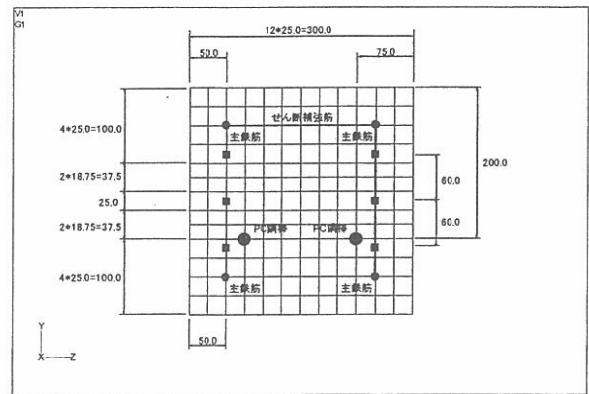
con : 健全供試体
 asr : ASR供試体
 Pmax : 最大荷重 (kN)
 Pcr : ひび割れ発生荷重 (kN)
 Ec : コンクリートの弾性係数 (kN/m²)

図-5 荷重-変位関係 (I-1, V-1)

ともほぼ同値 (834kN) であり、本試験において ASR 劣化によるせん断耐荷力の低下は認められなかった。また、ASR 供試体におけるスターラップ破断の影響は、破壊荷重の低下 (15~20%) として顕著に表れた。

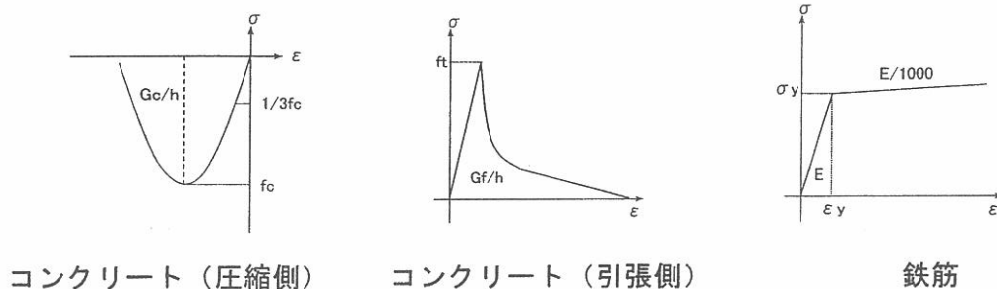


部材軸方向要素分割



部材断面方向要素分割

図-6 解析モデル



コンクリート (圧縮側)

コンクリート (引張側)

鉄筋

図-7 応力-ひずみ関係

3. FEM 解析

3.1 FEM 解析概要

PC 梁部材のせん断載荷試験における力学的挙動の解析は、弾性域およびコンクリートのひび割れ発生後から終局状態に至る非線形域を再現する必要がある。また、ASR 膨張による内部ひずみやひび割れ (方向、長さ、深さ等) を適切に評価することが重要となる。本解析には、コンクリートの非線形挙動の評価が可能である非線形有限要素法解析プログラム「DIANA」を使用した。また、ASR による劣化の方向性を考慮するため、コンクリートをソリッド要素とする 3 次元モデルとして扱った。図-6 に解析モデルを示す。

3.2 材料モデル

図-7 にコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの応力-ひずみ関係では破壊エネルギー⁵⁾を考慮し、圧縮破壊エネルギーは式(1)により算出した。

$$G_c = 8.770 \cdot (f'_c)^{1/2} \quad (1)$$

ただし、 G_c : 圧縮破壊エネルギー (N/mm), f'_c :

コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

また、引張破壊エネルギーは式(2)より算出した。

$$G_f = 0.0345 \cdot (f'_c)^{1/2} \quad (2)$$

ただし、 G_f : 引張破壊エネルギー (N/mm)

コンクリートに生じるひび割れは、分散ひび割れとして扱い、回転ひび割れモデルを適用した。回転ひび割れモデルは RC 梁のせん断挙動解析に有効であり、ひび割れの回転により間接的にせん断伝達特性の劣化を表現しているものと考えられている。

鉄筋および PC 鋼棒はトラス要素としてモデル化した。鉄筋は VonMises の降伏条件を適用し、降伏後の 2 次勾配は $E/1000$ とした。

3.3 解析手順

解析は 3 段階で検討した。まず、健全供試体を解析対象として実験結果の挙動を確認した [STEP1: 健全解析モデル]。次に、STEP1 の解析条件を基本として、ASR の進行によって生じた各劣化項目の解析を行い、実験挙動と比較した。劣化項目は、①コンクリートの物性値、ASR 膨張による②ひずみおよび③ひび割れの影響、④せん断補強筋の付着特性の 4 項目に着目し、個々の項目が PC はり部材の力学的挙動に及ぼす影響をふまえ、ASR 供試体の挙動の再現を試みた [STEP2: ASR 解析モデル]。最後に、実験挙動との再現性がある ASR 解析モデルを用いて、スターラップ破断の影響を検討した [STEP3]。

4. 解析結果

4.1 健全供試体に関する解析 [STEP1]

健全供試体を対象とする解析では、弾性域、塑性域、終局荷重、破壊モードなどに着目し条件を設定した。最終的に供試体の挙動に最も整合した解析ケースとして、図-8 に荷重-変位関係の比較を示す。終局荷重は、実験値 $P_{\max} = 794\text{kN}$ に対し、解析値 $P_{\max} = 820\text{kN}$ となり、両者とも斜め引張破壊であった。

STEP 1 の解析条件は、STEP2 における基本ケースとなるため、慎重に条件を設定した。弾性

域では、コンクリートの弾性係数を、載荷試験の初期剛性からの推定値 44000N/mm^2 に対し、供試体の断面寸法の誤差を考慮し 50000N/mm^2 としたところ初期勾配が一致した。コンクリートの圧縮破壊エネルギーおよび引張破壊エネルギーは 3.2 材料モデルで示した式により算出した値を用いた。コンクリートの引張強度はコンクリート標準示方書⁶⁾の式 (3) を用いた ($f_t = 2.8\text{N/mm}^2$)。

$$f_t = 0.23 f'_c k^{2/3} \quad (3)$$

ただし、 f_t : コンクリートの引張強度 (N/mm^2)、 $f'_c k$: コンクリートの圧縮強度
残存プレストレスは設計値の 25% 増加として与えた。

図-9~10 にスターラップの荷重-ひずみ関係の解析値と実験値の比較を示す。スターラップの荷重-ひずみ関係についても、実験値と解析値は概ね一致する傾向となった。特に、スターラップ S-2、S-3 は、ひずみが増大し始める荷重レベル (載荷荷重 $P=700\text{kN}$ 付近) が整合しており、耐荷機構が曲げからせん断へ移行する挙動を再現できたと考える。なお、解析値の荷重は対称モデルを用いているため実測値の載荷荷重の 1/2 である。

4.2 ASR 供試体に関する解析 [STEP2]

ASR 供試体の解析では、健全供試体の解析条件を基本ケースとし、以下に示す個々の劣化項目に着目し条件を設定した。

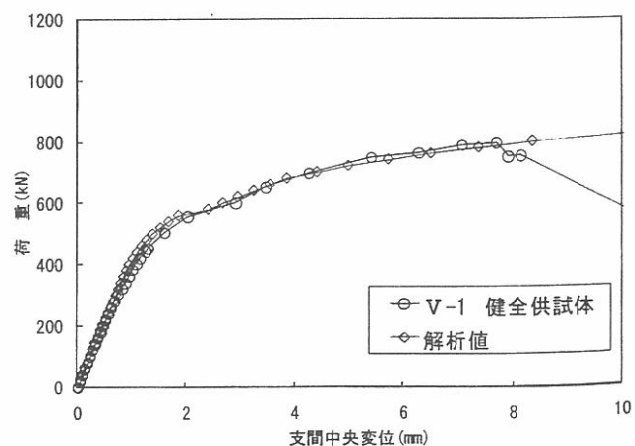


図-8 荷重-変位関係の比較 (V-1)

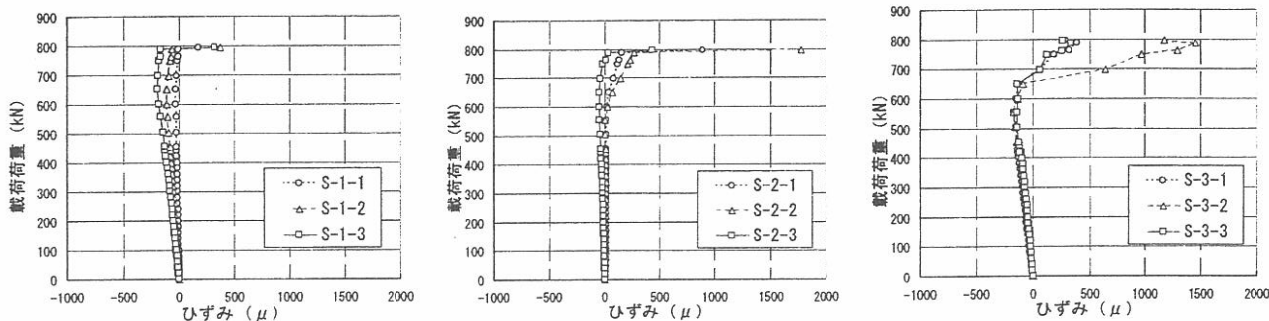


図-9 スターラップの荷重-ひずみ関係 (V-1, 実験値)

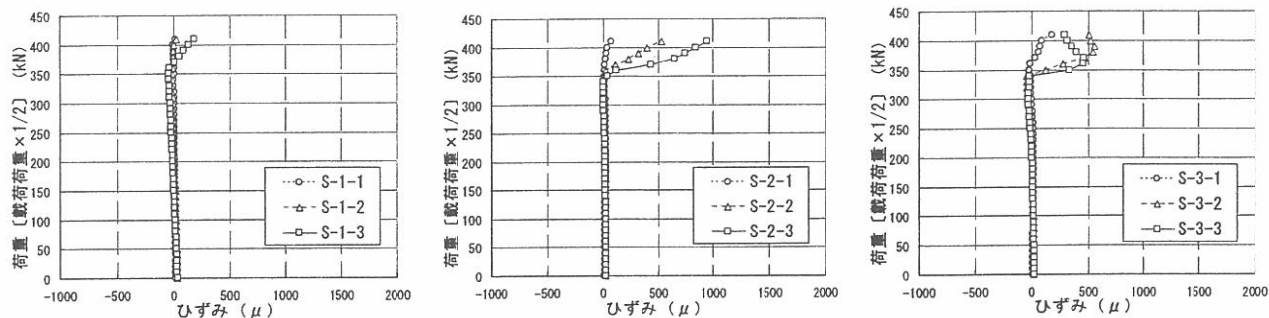


図-10 スターラップの荷重-ひずみ関係 (V-1, 解析値)

(1) コンクリート物性値の影響

ASRによる劣化を受けたコンクリートは、弾性係数が著しく低下すること、併せて圧縮強度および引張強度も低下することが解っている。これらのコンクリート物性値の低下がPCはりの力学的挙動に与える影響を検討した。

実験供試体と同時に作成した円柱供試体(Φ10×20cm)のせん断載荷試験時における測定値は、圧縮強度が40.0N/mm²(健全試験体の95%)に対して、静弾性係数は9300 N/mm²(同35%)であった。載荷試験における初期剛性からの弾性係数の推定値は、健全供試体は44000 N/mm²、ASR供試体は38000 N/mm²(健全供試体の86%)となり、円柱供試体の測定値とは一致しない。解析では、載荷試験時の初期剛性と一致するように静弾性係数を設定した。

2. 載荷試験結果で述べたように、ASR供試体は健全供試体と比較して、初期～ひび割れ発生後の剛性が低下するものの、終局破壊耐荷力は健全供試体と同等以上有していた。また、ASR供試体の剛性の変化は載荷荷重200kN付近と340kN付近で2度現れており、健全供試体とは

明らかに挙動が異なる。これらを踏まえた上で解析を行ったが、初期～ひび割れ発生後の剛性と耐荷力を同時に実験値と一致させるようなコンクリートの物性値の組合せは設定できなかった。載荷荷重200kN以降の剛性低下は、曲げひび割れの発生が原因とすると、コンクリートの引張強度と導入プレストレスを低下させる必要がある。一方、終局荷重を増大させるには、コンクリートの圧縮強度、引張強度、圧縮破壊エネルギー、引張破壊エネルギーおよび導入プレストレスをそれぞれ増加させる必要がある。

(2) ASR膨張によるひずみの影響

ASRにより劣化した部材の耐荷性能に関する既往の研究⁷⁾によれば、ASR膨張が鉄筋に拘束されている場合は、部材断面に発生する「ケミカルプレストレス」の効果により、ASRが静的耐荷性能に与える影響は少ないとされてきた。本実験においてもスターラップが破断していないASR供試体では、健全供試体と同等以上のせん断耐荷力を有しており、これは鉄筋拘束によるケミカルプレストレスの効果と考えられる。解析では、(1)コンクリート物性値の結果に対し、

ASR 膨張によりスターラップ内部で拘束される初期ひずみの状態を再現し、PC はりの力学的挙動に与える影響を検討した。

本来、ASR は膨張性の骨材が膨張することによって生じるが、本 FEM 解析モデルでは骨材膨張の再現は困難であるため、コンクリート要素を膨張させることを試みた。種々のケースをトライアルした結果、試験結果と整合するモデルとして、ASR 膨張による初期ひずみ状態を、かぶり部分を除くスターラップ内部のコンクリートに温度上昇(+20°C)を与えることにより再現した。図-11 にかぶりおよびスターラップ内部コンクリートの応力状態を示す。スターラップ内部のコンクリートでは鉄筋拘束により部材軸、水平、鉛直の 3 方向に圧縮応力が生じるが、かぶりでは部材軸方向に引張応力が生じるとともに、側面および上下面の部材軸直角方向にも引張応力が生じていることが解る。

図-12 に荷重-変位関係の実験値と解析値の比較を示す。これは、(1)コンクリート物性値の結果に、本項の検討を統合した最終結果である。実験値と解析値は概ね整合しており、載荷荷重 200kN 付近と 340kN 付近で 2 度生じた ASR 供試体の剛性変化の傾向も一致した。1 回目の剛性低下は、かぶりに生じた曲げひび割れの影響

であり、2 回目はスターラップ内部のコンクリートに生じた曲げひび割れの影響である。1 回目の剛性低下後も剛性が直線性を有しているのは、導入プレストレスと ASR 膨張によるケミカルプレストレスにより内部コンクリートの曲げひび割れの発生を抑制し、剛性を維持しているためと考えられる。

終局荷重は実験値 $P_{max}=879kN$ に対し、解析値は $P_{max}=720kN$ となり、終局耐荷力は整合しなかった。

図-13、14 にスターラップの荷重-ひずみ関係の実験値と解析値との比較を示す。スターラ

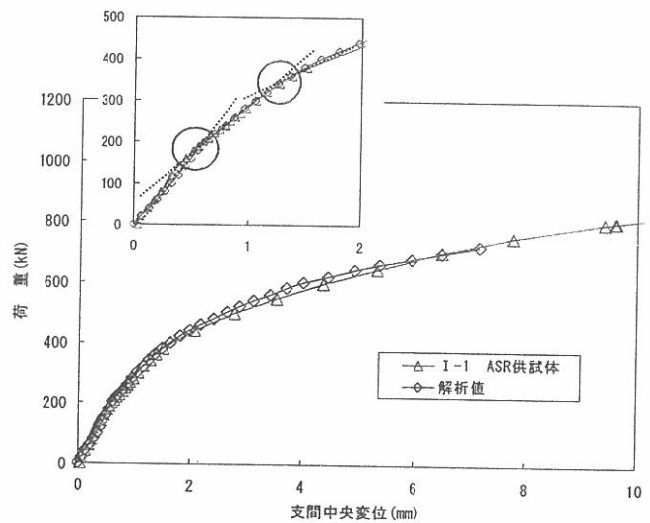


図-12 荷重-変位関係の比較 (I-1)

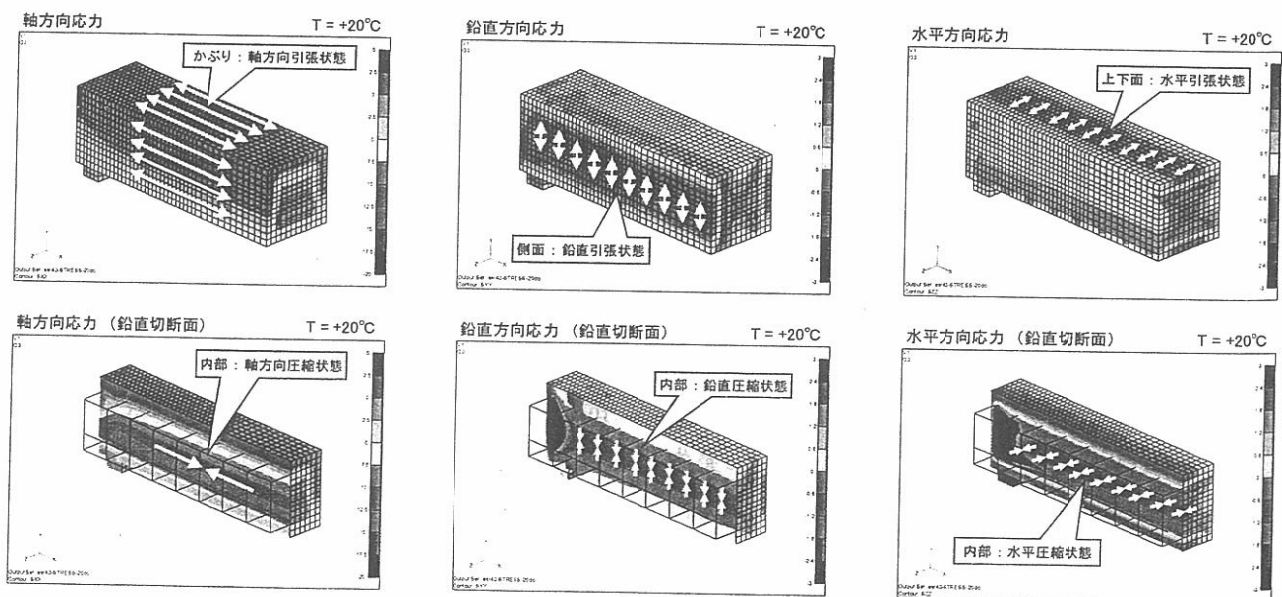


図-11 スターラップ内部コンクリート膨張時の応力状態

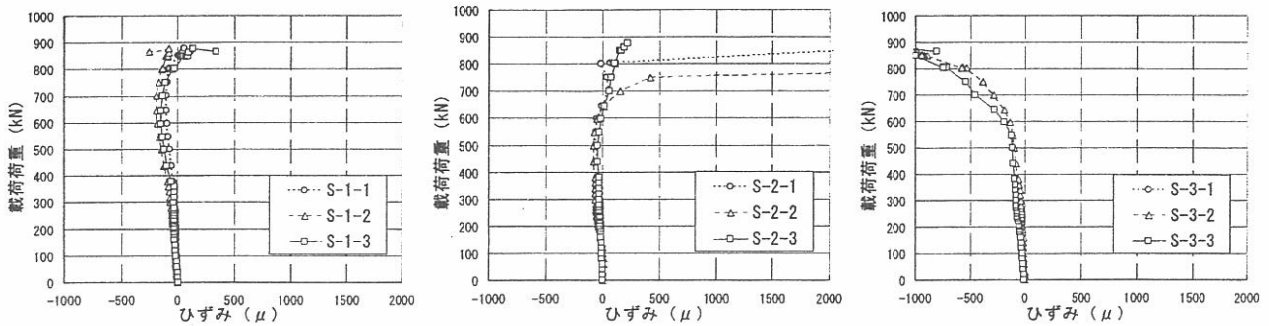


図-13 スターラップの荷重-ひずみ関係 (I-1, 実験値)

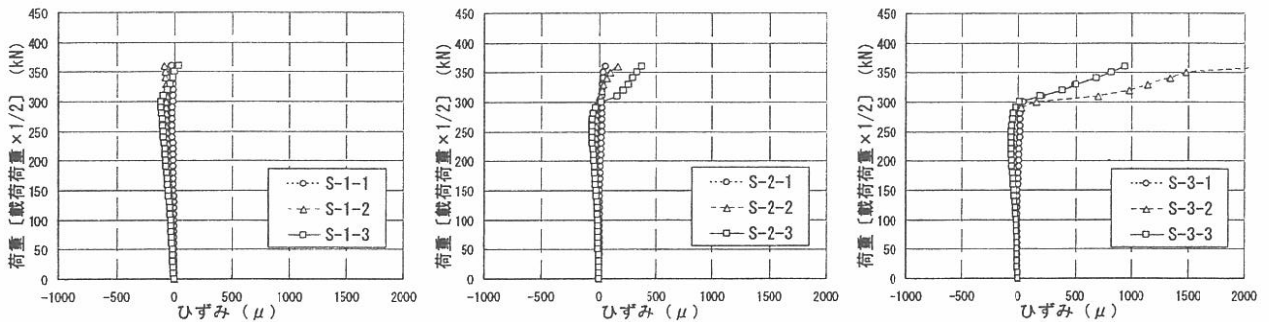


図-14 スターラップの荷重-ひずみ関係 (I-1, 解析値)

ップがせん断力を負担し始める荷重も解析値の方が実験値より低い結果となった。終局荷重付近において、実験値では圧縮ひずみを呈しているスターラップがあるが、これは、ASR膨張によって蓄えられた引張ひずみが、コンクリートのひび割れにより解放されたためと推察される。

(3) ASRに伴うひび割れの影響

図-15にASR供試体のひび割れ状況を示す。何れの供試体も、ASRに伴うひび割れはPC鋼材配置方向である部材軸方向に生じていた。供試体を切断してそのひび割れ深さを確認したところ、何れもかぶり範囲で止まりスターラップ

内部には達していなかった。

解析では、図-16のとおり、モデルの上面および側面のかぶり部に、ひび割れが閉じる方向の支圧力を伝達できるスリットを付加し、供試体のひび割れを模擬した。そして、(1)コンクリート物性値の結果に対し、このASRひび割れの影響を考慮したが、曲げひび割れ挙動は大きく変化せず、ASR供試体の載荷時の挙動は再現できない。また、せん断耐荷力は健全解析モデルに対して2割程度低下することが解った。

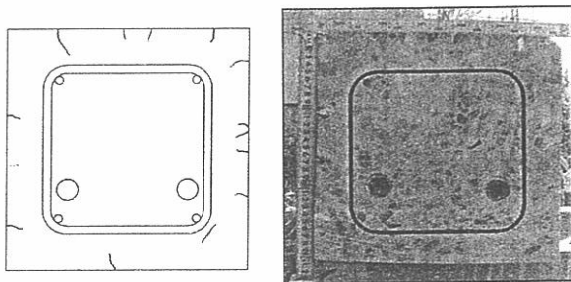


図-15 ASR供試体のひび割れ状況

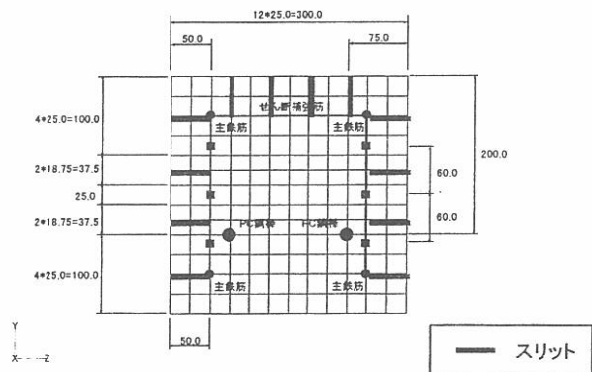


図-16 ひび割れのモデル化

(4) せん断補強筋の付着特性の影響

載荷試験後の供試体を観察した範囲では、スターラップとコンクリートは一体化しており、約4年間の暴露ではASRによる付着劣化は認められなかった。解析では、(2)ASR膨張によるひずみの結果に対し、鉄筋とコンクリートを剛結合したものと、付着特性としてせん断応力-すべり曲線⁸⁾を与えたものを比較した。付着特性を設定したものは、せん断破壊領域での挙動は変化するものの(破壊耐力も低下する)、その領域に至るまでの弾性域～曲げ抵抗領域における挙動はほとんど変化しないことが解った。

以上の(1)～(4)より、本検討では、①コンクリート物性値と②ASR膨張によるひずみの影響を考慮した(2)のモデルが最も実験挙動を再現できており、これをASR解析モデルとした。

4.3 ASR 供試体のスターラップ破断に関する解析 [STEP3]

ASRによる劣化が進行しスターラップが破断した場合の影響を検討した。ASR解析モデルにおいて、スターラップの下端を3本切断したケースと切断しないケースを比較した。

実験においてASR供試体のスターラップ破断を模擬したものは、破壊荷重が15～20%低下したが、解析では約10%の低下にとどまった。ASR供試体のスターラップに生じている初期ひずみ(最大8000 μ)を解析では再現していないことが原因の一つと考えられる。

5. まとめ

本検討で得られた主な成果および今後の課題は下記のとおり。

- (1) 材料モデルに破壊エネルギーを考慮し、ひび割れを分散ひび割れとして扱い、回転ひび割れモデルを適用することにより、健全供試体の挙動を再現することができた。一方、この条件をふまえ、コンクリート物性値を低減しただけでは、ASR供試体の挙動は再現できなかった。
- (2) ASRに伴う膨張をスターラップ内部の初期ひずみとして適切に評価することにより、弾性

域～曲げ抵抗領域において段階的に剛性低下した載荷試験の挙動を比較的精度良く再現できた。

- (3) 本解析モデルは、ある劣化状態の部材試験との整合を図ったものであり、現時点では、ASR部材全般への適用を視野に入れたモデルの精度や妥当性の検討は行っていない。これについては、今後の課題と考えられる。

謝辞

本検討にあたり、「ASR 構造物の維持管理に関する検討会(委員長:京都大学大学院 宮川豊章教授)」においてご指導を賜りました。委員長はじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリートライブラリー124, アルカリ骨材反応対策小委員会報告書-鉄筋破断と新たな対応-, (2005)
- 2) 佐々木一則他:ASR劣化が生じたPC梁の長期暴露試験における膨張挙動, 材料, Vol. 57, No. 10, pp. 973-980, 2008. 10
- 3) 十名正和他:ASRにより劣化したPC梁供試体のせん断耐荷力実験に関する基礎検討, 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7巻, 2007.11
- 4) 佐藤彰紀他:ASRにより劣化したPC梁部材のせん断耐荷力評価に関する検討, 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8巻, 2008.10
- 5) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇:回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No. 620/V-43, pp. 187-199, 1999.5
- 6) 土木学会 コンクリート標準示方書 設計編, 2007.12
- 7) 例えば, 小林和夫:アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能-はり部材-, コンクリート工学 Vol.24, No.11, pp.70-78, 1986
- 8) 杉本訓祥:鉄筋とコンクリート間の付着特性モデル, コンクリート工学 Vol.46, No.7, pp38-43, 2008.7