

ASRにより劣化したPC試験体に関する実験報告(下)

— PC建協 ASR対策検討委員会報告 —

西村 一紀*1・城代 和行*2・横山 貴信*3・室田 敬*4

(注)プレストレスト・コンクリート建設業協会では、ASRによる劣化を受けたPC部材における基礎的性状の確認および劣化対策について検討することを目的とし、「ASR対策検討委員会」を設置して各種の実験を行っている。実験は大別すると、「シリーズⅠ実験」と「シリーズⅡ実験」であり、本稿はこのうち、「シリーズⅡ実験」について述べるものである。

「シリーズⅡ実験」は、ASRにより劣化し、スターラップが破断したPC部材におけるせん断耐力の確認およびせん断補強工法の効果を検証することを目的としている。具体的には、PC梁試験体を製作し、長期屋外暴露実験を行い、ASR劣化を生じさせたのち、3種類のせん断補強を行った。そしてさらに暴露を継続後、せん断載荷試験を実施した。本稿はシリーズⅡ実験および実験全体を通じて得られたASR劣化PC部材の性状に関する知見について報告する。

キーワード：ASR、スターラップ破断、せん断耐力、せん断補強

52巻第3号では一連の実験のうち、実験の全体計画およびシリーズⅠ実験について報告した。本号では引き続き、スターラップ破断およびせん断補強に着目したシリーズⅡ実験および研究全体の考察について述べる。

5. シリーズⅡ実験^{1)~6)}

5.1 実験目的

シリーズⅡ実験の主目的は、「2. 全体計画」(52巻第3号)で述べた課題のうち、ASR劣化によるスターラップの破断や軸方向ひび割れが「せん断耐力」に与える影響を確認することである。

加えてせん断耐力の回復に有効な補強方法の提案も目的としている。ASRの場合、補強材には補強後の劣化進行による残存膨張の影響が付加される。本実験ではこの点について考慮したうえで、せん断補強技術がASR劣化構造物にも適用できるか検証を行った。

5.2 試験体概要

5.2.1 試験体の種類および形状寸法

シリーズⅡ実験では健全骨材(非反応性骨材)とASR

骨材(反応性骨材)を使用し、ASR劣化の有無、スターラップの有無や破断、せん断補強の有無の組合せから合計7体の試験体を製作した。表-8にシリーズⅡ実験の試験体種類、図-22に試験体の概要図を示す。

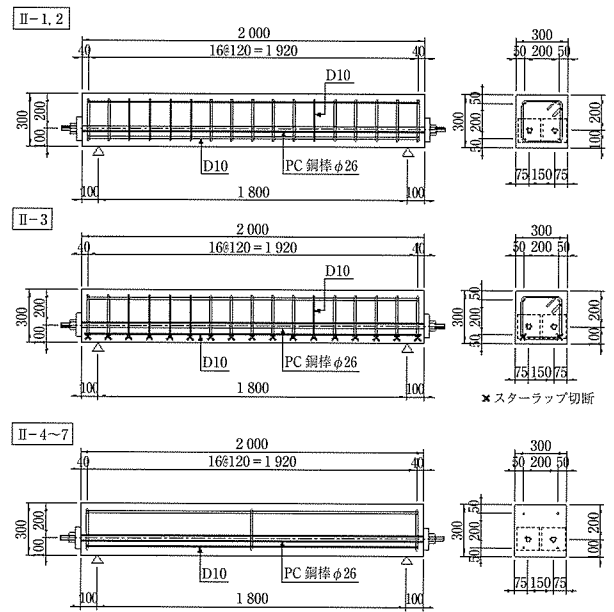


図-22 試験体概要図

表-8 シリーズⅡ試験体種類

試験体種類	ASR劣化	スターラップ配置	せん断補強	備考
Ⅱ-1	×	○	×	
Ⅱ-2	○	○	×	
Ⅱ-3	○	○(切断)	×	
Ⅱ-4	○	×	×	
Ⅱ-5	○	×	○	鉛直外ケーブル工法
Ⅱ-6	○	×	○	大偏心外ケーブル工法
Ⅱ-7	○	×	○	連続繊維補強工法

試験体の寸法や構造は他機関で実施中の研究と相互に補完できることを目的とし決定した。スターラップの鉄筋比は0.5%程度とした。

*1 Kazuki NISHIMURA：極東興和(株) 大阪支店 技術部 技術課

*2 Kazuyuki JODAI：ピーシー橋梁(株) 九州支店 企画推進グループ

*3 Takanobu YOKOYAMA：(株)日本ピーエス 技術施工部 土木・建築・開発・工事課

*4 Kei MURODA：三井住友建設(株) 大阪支店 土木部

各試験体に対する評価方法は図 - 23 のとおりとした。

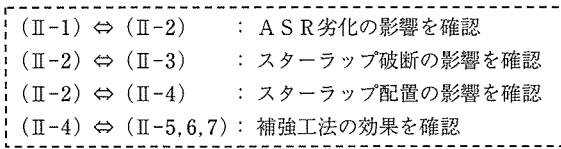


図 - 23 評価方法の設定

5.2.2 せん断補強工法の選定

補強工法は、ASRによりスターラップが破断したPCT桁橋のせん断補強を想定し、実施工への適用が可能で、かつ補強後の目視点検が可能なものとして、鉛直外ケーブル工法、大偏心外ケーブル工法、連続繊維補強工法の3工法を選定した。図 - 24 ~ 26 にPCT桁に対するせん断補強のイメージと各補強試験体の概要図を示す。

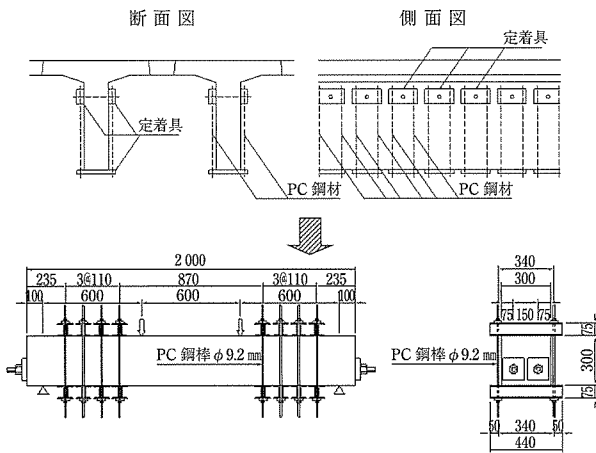


図 - 24 鉛直外ケーブル工法 (II - 5)

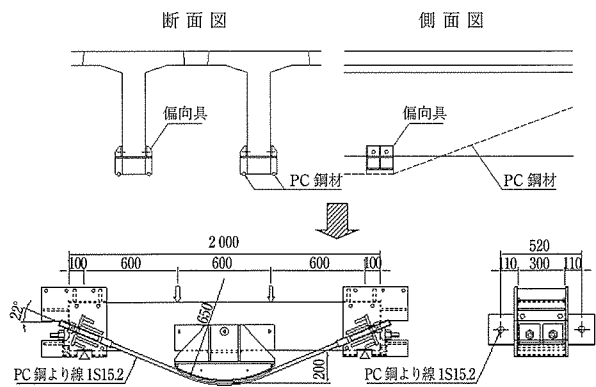


図 - 25 大偏心外ケーブル工法 (II - 6)

補強設計は、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾に示される棒部材の設計せん断耐力式を基本とし、 V_{sd} または V_{ped} を各補強材で補うこととした。なお補強量は、補強後の残存膨張を受けた場合でも補強効果が確実に得られることを目的に、スターラップ負担分のおおむね2倍程度とした。

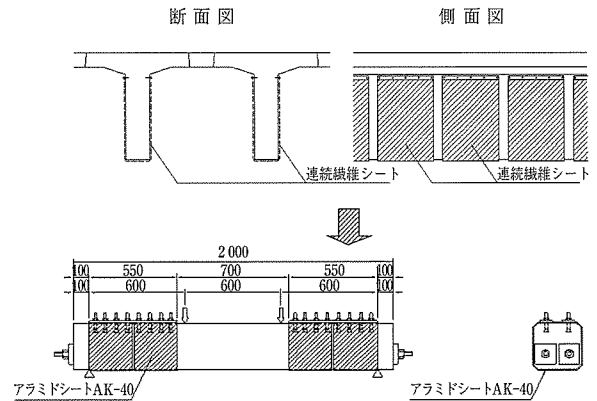


図 - 26 連続繊維補強工 (II - 7)

(棒部材の設計せん断耐力式)

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped}$$

ここに、 V_{yd} : 棒部材の設計せん断耐力

V_{cd} : コンクリートが受け持つせん断耐力

V_{sd} : せん断補強材が受け持つせん断耐力

V_{ped} : 軸方向緊張材のせん断方向分力

(1) 鉛直外ケーブル工法 (II - 5)

鉛直方向にせん断補強材としてPC鋼材を配置し、プレストレスを導入する。せん断補強材が受け持つせん断耐力(V_{sd})の向上と膨張拘束効果を期待する工法である。

(2) 大偏心外ケーブル工法 (II - 6)

一般的に曲げ耐力補強に使用されている外ケーブル工法を応用したもので、大偏心配置した外ケーブルPC鋼材のせん断方向分力(V_{ped})の向上を期待する工法である。

(3) 連続繊維補強工法 (II - 7)

試験体の側面および底面にせん断補強材として連続繊維シートを接着する。せん断補強材が受け持つせん断耐力(V_{sd})の向上を期待する工法である。

5.2.3 実験スケジュール

実験の流れを図 - 27 に示す。補強試験体については

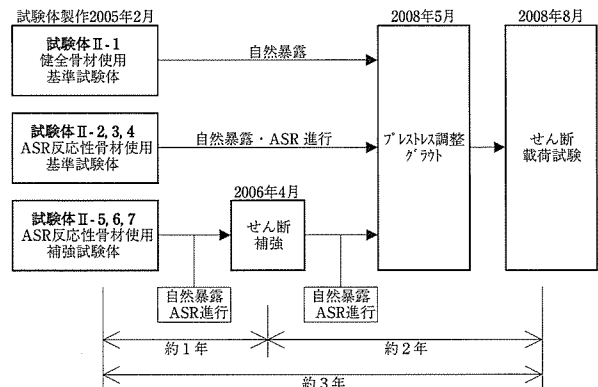


図 - 27 シリーズII実験の流れ

試験体製作後にASR劣化を確認し、対策後にASRの残存膨張が付加できる段階でせん断補強を実施した(製作後約1年)。その後さらにASR劣化を進行させたのち、載荷試

験を実施した。

5.3 計測計画

シリーズⅡ実験では、ひび割れの目視計測やコンクリート内に設置したひずみゲージにより、ASRの劣化状況を確認した。補強後には補強材にひずみゲージと緊張力測定用のロードセルを、載荷試験時には変位計を追加で設置した。自然暴露時の計測頻度を表-9に示す。

表-9 計測頻度

材 齢	計測日	備 考
-	2005/2/28	試験体製作
3日	2005/3/3	
136日	2005/7/14	
12ヵ月	2006/2/3	
13ヵ月	2006/4/7	せん断補強
14ヵ月	2006/4/15	
16ヵ月	2006/7/6	
20ヵ月	2006/10/13	
25ヵ月	2007/3/22	
31ヵ月	2007/9/6	
39ヵ月	2008/5/7	緊張力調整・グラウト
42ヵ月	2008/8/4	載荷試験前

5.4 長期暴露試験結果

長期暴露試験の結果について、「ひび割れ計測」、「ひずみ計測」について記述する。

5.4.1 ひび割れ計測

(1) 無補強試験体 (Ⅱ-2~4)

ひび割れは部材軸方向に卓越した。ひび割れの計測は試験体製作の約1年後から行い、その時点で発生していたものを以後追跡した。自然暴露約3年でひび割れ幅は大きなもので0.45~0.60mmに達した。この段階までは、各試験体でスターラップの有無や切断による明確な差はなかったが、その後(2008年4月)の計測で、突如Ⅱ-3にて大きなひび割れの発生を確認した(写真-4)。新たなひび割れはスターラップの切断付近であり1.80mmに達した。これは、スターラップを切断したことにより下面側の拘束がなくなり、膨張が下面側に卓越したのが原因と考える。



写真-4 Ⅱ-3試験体ひび割れ状況 (2008年4月)

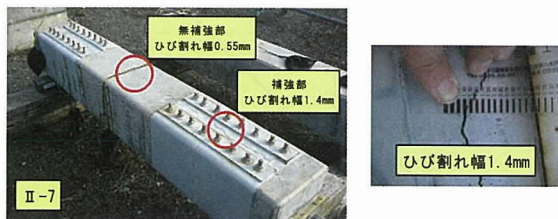


写真-5 Ⅱ-7試験体ひび割れ状況 (2007年12月)

(2) 補強試験体 (Ⅱ-5~7)

ひび割れ幅は無補強試験体に比べて大きく1.00mm程度であった。各試験体とも補強部分のひび割れ幅に変化がない反面、無補強部分では大きく伸展した。これは、補強材によりASR膨張が拘束されたためと考える。写真-5はⅡ-7上面の2007年12月の様子である。実橋を想定して3面補強としたため、補強材のない部分でひび割れ幅は1.40mmまで達した。補強材による拘束効果が得られる反面、補強材が無い部分についてはひび割れ幅が増大する結果となった。このためASR劣化に対する補強には、補強材の配置や補強方法の選定に注意が必要であると考えられる。

5.4.2 ひずみ計測

ひずみ計測はひずみゲージにより行った。図-28に計測結果の一例を示す。なお図内のひずみ値については、プラスが膨張側、マイナスが収縮側を示す。

(1) PC鋼材ひずみ

PC鋼材のひずみは、Ⅱ-1, 2とも緊張後に収縮側(プレストレスが低下する方向)へ移行したが、Ⅱ-2では再び膨張側へ転じた。これはASR膨張の影響と考えられる。なお図内の材齢は、プレストレス導入日を0日としている。

(2) 軸方向鉄筋ひずみ

軸方向鉄筋のひずみは、ASR試験体で膨張側の値を示した。上縁側では3000μ膨張したのもあった。下縁側ではPC鋼材を配置している影響からその量は少ない。なお材齢20ヵ月(600日)以降の膨張が少なくなっており、この時期にはASR反応が収束傾向にあったと考える。

(3) スターラップひずみ

スターラップのひずみはⅡ-2では2500μ、Ⅱ-3で

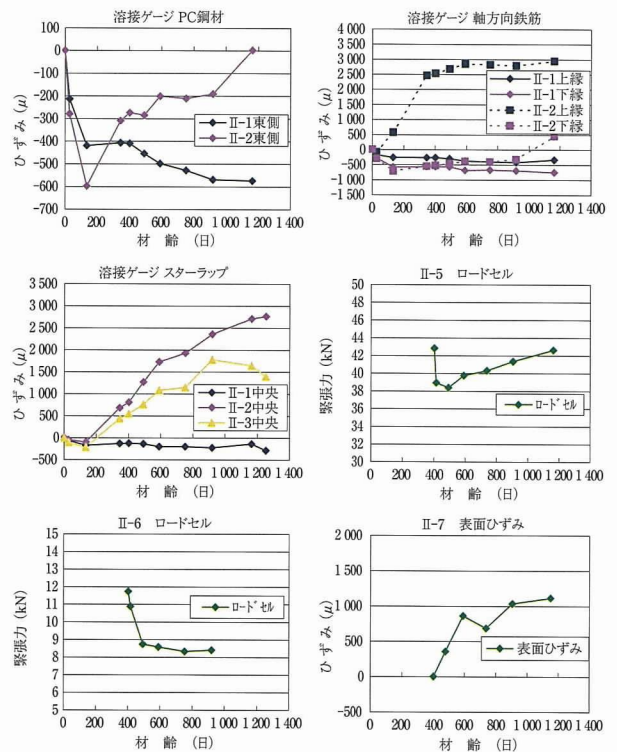


図-28 長期計測結果

は 1500 μ の膨張を確認した。II-3 で少ないのはスターラップの切断により下面側の膨張に対する拘束が少なくなったためと考える。

(4) 補強材のひずみ (緊張力)

1) 鉛直外ケーブル工法 (II-5)

鉛直 PC 鋼棒の緊張力は、一旦収縮側に移行したのち、再び膨張側へ転じた。部材に対する拘束効果がうかがえる結果となった。

2) 大偏心外ケーブル工法 (II-6)

大偏心外ケーブルの緊張力は、収縮側へ移行し、その後はほぼ一定であった。

3) II-7 連続繊維補強工法 (II-7)

連続繊維補強材の表面に設置したひずみゲージは、計測直後から膨張ひずみが生じたが、ひずみの大きさは、スターラップを配置した II-2 と同等であり、スターラップと同程度の拘束効果がうかがえる結果となった。

5.5 載荷試験

5.5.1 目的

載荷試験の目的は以下のとおりである。

- 1) ASR 劣化の有無に着目し、せん断耐力に与える影響を確認する。
- 2) スターラップの配置や鉄筋破断の有無に着目し、せん断耐力に与える影響を確認する。
- 3) ASR により劣化が顕れた試験体に、あと施工したせん断補強材に対し、ASR の残存膨張が加わった後のせん断補強効果を確認する。

5.5.2 載荷試験計画

(1) 載荷試験時のプレストレス調整

本実験では、せん断補強効果の確認を、せん断耐力の比較により得ようとしている。このため、少なくともスターラップを配置していない II-4 が確実にせん断破壊しなければ、せん断補強効果を確認することができない。

梁のせん断耐力算出式は土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾に示されているが、評価値は構造物にとって安全側となることが一般的に知られている。また、田村らの研究によると、比較的精度が良いせん断耐力評価法は M_{cr} 法でありその計算値と実験値の比は 1.11 ~ 1.51 の範囲であったと報告されている⁸⁾。このため実験から得られるせん断耐力はコンクリート標準示方書に示される評価式よりも大きく、かつばらつくと予想され、本実験では $M_{cr} \times 1.5$ までせん断耐力を有する場合を想定した。

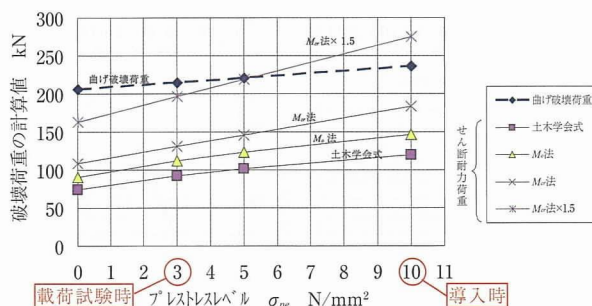


図 - 29 プレストレス量と破壊荷重の関係

土木学会式および M_0 法、 M_{cr} 法⁸⁾ の各評価式におけるプレストレス量とせん断耐力の関係を図 - 29 に示す。これより、 $M_{cr} \times 1.5$ においても確実にせん断破壊が先行するように、載荷試験直前に部材下縁に対するプレストレスによる応力度が 3 N/mm² になるまで低減した。表 - 10 に破壊荷重の計算値を示す。

表 - 10 破壊荷重の計算値

(単位: kN)

		II-1 健全	II-2 ASR	II-3 切断	II-4 無筋	II-5 鉛直外	II-6 大偏心外	II-7 連続繊維
case-1 土木学会式	V_{sd}	61.0	61.0	61.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	V_{sd}	0.0	0.0	0.0	0.0	164.2	101.1	91.0
	V_{sd}	107.5	98.3	96.6	98.6	95.2	96.0	100.0
	V_{sd}	168.5	159.3	157.6	98.6	259.4	197.1	191.0
	V_{sd}	267.3	219.1	219.1	219.1	219.1	381.0	219.1
case-2 M_{cr} 法	破壊形態	せん断	せん断	せん断	せん断	曲げ	せん断	せん断
	V_{sd}	130.8	119.6	117.5	120.0	115.9	116.7	121.7
	V_{sd}	191.8	180.6	178.5	120.0	280.1	217.8	212.7
	V_{sd}	267.3	219.1	219.1	219.1	219.1	381.0	219.1
	破壊形態	せん断	せん断	せん断	せん断	曲げ	せん断	せん断
case-3 M_{cr} 法	V_{sd}	157.1	140.8	138.0	141.2	135.8	137.0	143.6
	V_{sd}	218.1	201.8	199.0	141.2	300.0	238.1	234.6
	V_{sd}	267.3	219.1	219.1	219.1	219.1	381.0	219.1
	破壊形態	せん断	せん断	せん断	せん断	曲げ	せん断	曲げ
	case-4 $M_{cr} \times 1.5$	V_{sd}	235.7	211.2	207.0	211.8	203.7	205.5
V_{sd}		296.7	272.2	268.0	211.8	367.9	306.6	306.4
V_{sd}		267.3	219.1	219.1	219.1	219.1	381.0	219.1
破壊形態		曲げ	曲げ	曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ

V_{sd} : せん断補強鋼材が受け持つせん断耐力 (スターラップ) V_{sd} : 設計せん断耐力
 V_{sd} : せん断補強材が受け持つせん断耐力 (後施工補強材) V_{sd} : 設計曲げ耐力
 V_{sd} : コンクリートが受け持つせん断耐力 破壊形態: 曲げ耐力との比較

(2) 荷重載荷要領

載荷位置は $a/d = 3$ とした。載荷荷重は 20 kN ごとに 100 kN まで増加させたのち一旦荷重を除去し、この作業を 2 回繰り返す、3 回目に 20 kN ごとに 100 kN まで増加させたのち、50 kN ずつ破壊荷重まで単調増加させた。載荷位置と載荷ステップについて図 - 30 に示す。

5.5.3 載荷試験結果

(1) 破壊荷重および破壊形態

破壊後の試験体写真を写真 - 6 に示す。また計算値と実験結果の比較を表 - 11、図 - 31 に示す。

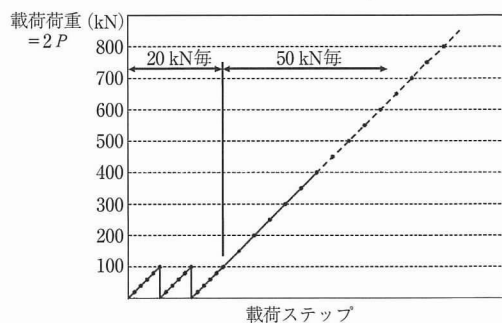
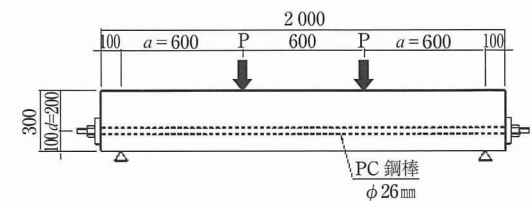


図 - 30 載荷位置と載荷ステップ

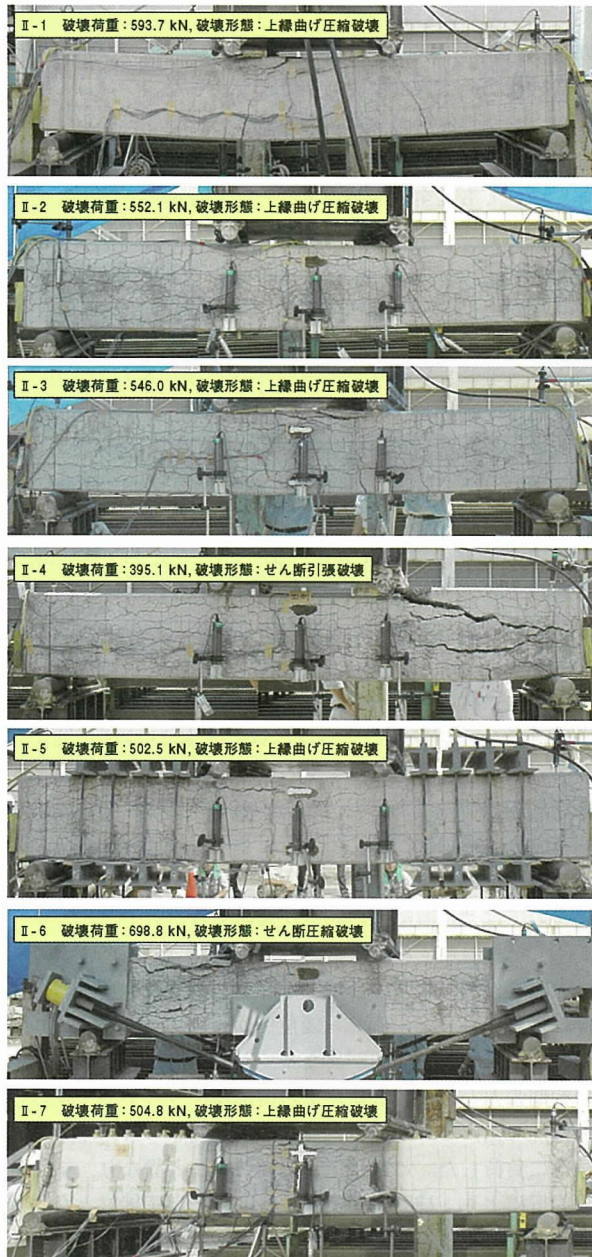


写真 - 6 試験体破壊写真

表 - 11 計算値と実験結果の比較 (単位: kN)

	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7
計算値							
M_{cr} 法	218.1	201.8	199.0	141.2	300.0	238.1	234.6
$M_{cr} \times 1.5$	296.7	272.2	268.0	211.8	367.9	306.6	306.4
曲げ耐力	267.3	219.1	219.1	219.1	219.1	381.0	219.1
破壊荷重(2P)	593.7	552.1	546.0	395.1	502.5	698.8	504.8
破壊荷重(P)	296.9	276.1	273.0	197.6	251.3	349.4	252.4
破壊形態	曲げ	曲げ	曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ
M_{cr} 法との比率	-	-	-	1.4	-	-	-
実験結果							

破壊形態はII-4およびII-6でせん断破壊, そのほかは曲げ破壊となった。

破壊荷重は各試験体とも計算値を上回る結果となった。せん断破壊したII-4の破壊荷重は, 計算値(M_{cr} 法)に対して1.4倍となった。この比率は前出の田村らの研究⁸⁾

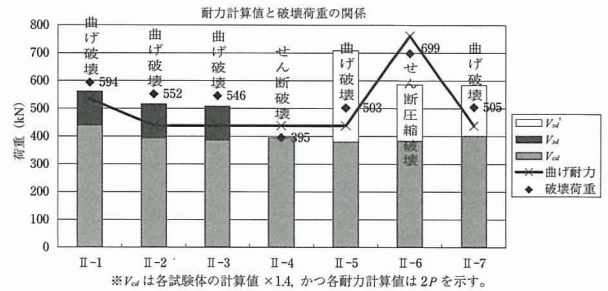


図 - 31 計算値と実験結果の比較

にはほぼ一致している。このため本実験では, ひび割れなどの影響を無視した既存の計算式が適用できる範囲であったと判断する。ただし, 実構造物においては, 寸法やひび割れの程度, ASR劣化によるコンクリート強度のばらつきなどが不明確であることから, 今後の適用には注意が必要であり, ASR劣化を適切に評価できる計算手法の確立が重要であるとする。

破壊に至った状況は, 荷重試験前にASR劣化により発生していたひび割れが荷重荷重の増加とともに幅の増大や長さの伸長が進み, さらに新たなひび割れの発生が加わることで, 最終的にひび割れに沿った形となった。せん断破壊したII-4, 6では破壊面が端部までおおよぶ状況であった。これは荷重前に橋軸方向に発生していたひび割れの影響と考える。

(2) 計測結果

各試験体の計測結果として, 荷重-変位図を図-32, スターラップひずみを図-33, 各補強材ひずみの計測結果を図-34に示す。

① 荷重-変位図

II-1とII-6以外では大きな差が見受けられなかった。II-6では荷重に対する変位が小さく, 補強材が引張弦材,

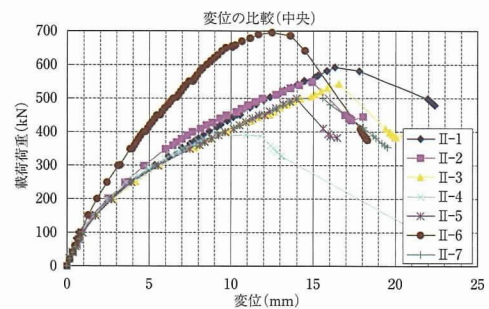


図 - 32 荷重 - 変位図

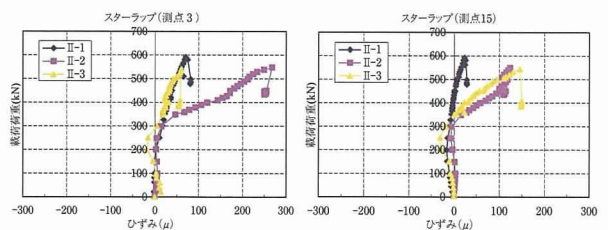


図 - 33 スターラップひずみ

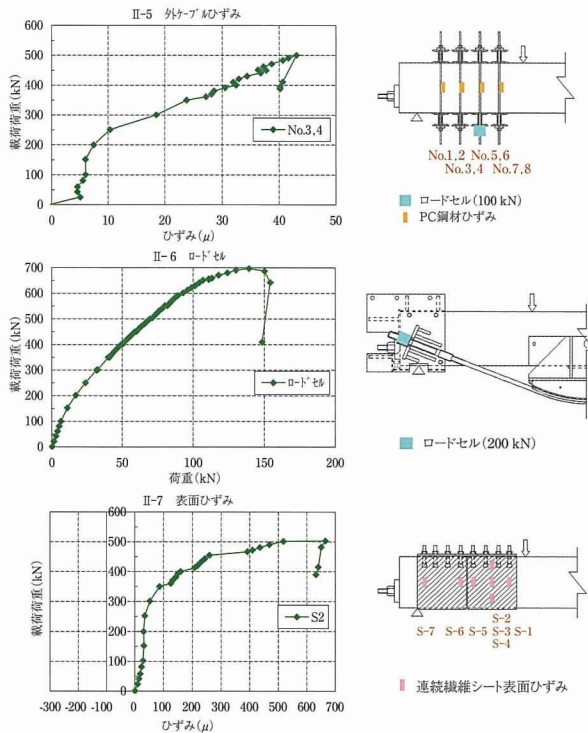


図 - 34 補強材ひずみ

主桁が圧縮材となるようなトラス構造を形成したためと考える。なお図 - 32 は前出の荷重載荷要領の載荷ステップの3回目を示している。

② スターラップひずみ

II - 2, 3では載荷荷重 200 ~ 300 kN あたりからひずみが増加している。この要因として 1) 荷重載荷前の初期ひずみの影響, 2) ひび割れの影響, 3) ASR 劣化によるコンクリート材料としてのせん断耐力の低下に伴うスターラップ負担増などが推察される。以降にその要因について考察する。

1) スターラップの初期ひずみの影響

約 3 年間の自然暴露による ASR 劣化により II - 2, 3 において、載荷試験前のスターラップひずみは膨張傾向を示しており、鉄筋の降伏ひずみ 1475 μ に対して荷重載荷前で II - 2 では 1500 ~ 3000 μ 、II - 3 では 500 ~ 2000 μ の初期ひずみを有していた (図 - 28 参照)。しかし、荷重載荷前に降伏ひずみを超過していた II - 2 についても載荷荷重 300 kN までは II - 1 と同等の履歴を有し、かつ測定ひずみの多くは荷重除荷後において、II - 1, 2 ともに原点回帰の傾向を示した。このため図 - 33 に示すように、ひずみの増加と初期ひずみの有無について相関性は認められないと考える。

2) ひび割れの影響

スターラップに配置したひずみゲージの測定値は、ゲージ周辺部のコンクリートのひび割れの影響を大きく受ける。ゲージを跨ぐような位置にひび割れが発生すると、それまでコンクリートが負担していた引張力を鋼材に負担することとなる。よって ASR 試験体において載荷荷重 300 kN 程度からスターラップひずみが増加した要因とし

て、ひび割れの影響が関与していたものと考えられる。しかし、試験体のゲージ位置とコンクリートのひび割れ発生位置の相関性は見出すことができなかった。

3) コンクリートのせん断耐力低下の影響

コンクリートが受け持つせん断力の算定は、ASR 試験体についても健全試験体 (II - 1) と同式にて算出している。しかし、前述のように II - 2 のひび割れ状況は載荷荷重 300 kN 時で斜めひび割れは顕著ではないものの、II - 4 のひび割れ状況は、300 kN 程度より顕著なせん断ひび割れが発生した。よって、コンクリートの引張抵抗性の低下により、II - 1 と比較して早期に斜めひび割れが発生し、スターラップの増分ひずみが 300 kN 程度より発生したものと考える。なお、載荷試験時にコア採取したシリンダーテストピースによる強度試験の結果から、ASR 劣化による強度低下が確認され、コンクリートが受け持つ終局せん断耐力の低下は約 85% 程度であった。ただし、本実験での終局せん断耐力については、II - 1, 2 において、曲げ破壊が先行したため、せん断耐力の低下を検証することができなかった。

③ 補強材ひずみ【鉛直外ケーブル (II - 5)】

鉛直外ケーブルのひずみは、載荷荷重 250 kN 程度よりひずみが増加しており、スターラップひずみと同様なひずみ増加開始荷重であった。一方、補強材の無い II - 4 の破壊荷重が 395 kN であったことより、少なくとも II - 5 の破壊荷重である 503 kN との差分 (= 503 - 395 = 108 kN) についてはせん断耐力の向上が確認できた。

④ 補強材ひずみ【大偏心外ケーブル (II - 6)】

大偏心外ケーブルの緊張力は、載荷初期より荷重増加に伴い増加している。荷重 - 変位図が示すように、II - 6 のみほかの試験体と傾向が異なっており、大偏心外ケーブルの初期張力ならびに載荷荷重の増加に伴う外ケーブルの張力増加の鉛直成分が、載荷荷重とは逆向きのせん断力を試験体に負荷した。これはほかの補強工法と異なり、補強材の設置により、補強材が引張弦材、主桁が圧縮材となるようなトラス構造を形成したためと考えられる。

⑤ 補強材ひずみ【連続繊維 (II - 7)】

せん断破壊面近傍に貼り付けたひずみゲージの計測値は、載荷荷重 200 ~ 300 kN より増加した。その平均増分ひずみは約 600 μ であった。また、増加ひずみの開始荷重は II - 2 のスターラップひずみと同等であった。補強材の無い II - 4 の破壊荷重が 395 kN であったことより、少なくとも II - 7 の破壊荷重である 505 kN との差分 (= 505 - 395 = 110 kN) については、せん断耐力の向上が確認できた。

6. シリーズ II 実験のまとめ

シリーズ II 実験のまとめを、図 - 23 に示す評価方法に従い述べる。

(1) ASR 劣化の影響

ASR 劣化の影響について、II - 1 と II - 2 を比較し検証した。破壊性状はいずれも“曲げ破壊”であり、II - 1 に比較して II - 2 の破壊荷重 (健全 \rightarrow 2P = 594 kN, ASR

→ $2P = 552 \text{ kN}$) は約 7% の低下が見受けられた。この低下の原因は ASR 劣化によるものとする。載荷試験は 3 ステップで実施しており、最終ステップである終局荷重時の荷重-変位図は、II-1, 2 でおおむね整合している。一方、使用限界状態相当の載荷荷重では、シリーズ I 実験の結果と同様に剛性低下の影響が見受けられる。荷重-変位図は、II-1 で載荷荷重 80 kN より変位が増大しており、これは曲げひび割れの発生に伴うものと推察する。また II-2 では、II-1 と異なり曲げひび割れ発生に伴う変位の増大は見受けられず、これは ASR 劣化の影響により、載荷前よりひび割れが多数発生していたことより、初回荷重からひび割れによる剛性低下の影響が生じていたものと推察する。また、2 ステップ時の荷重-変位図では、初回に比較して変位が増大している。これは、初回荷重時に発生した曲げひび割れの影響による剛性の低下に起因するものと推察する (図 - 35)。

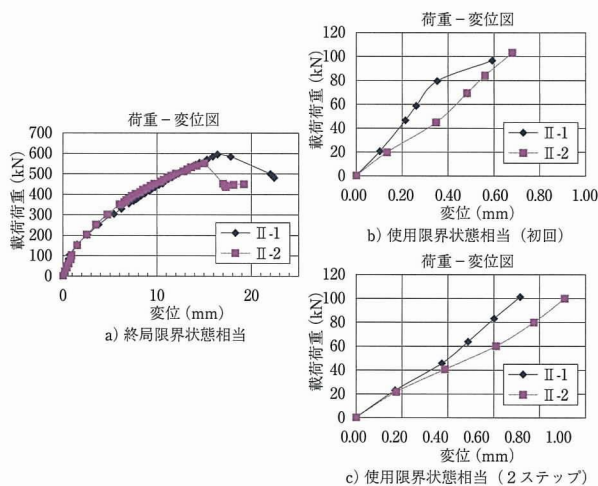


図 - 35 荷重-変位図 (II-1, 2)

(2) スターラップ破断の影響

スターラップ破断の影響について、II-2 と II-3 を比較し検証した。II-2, 3 ともに破壊形態が曲げ破壊先行であり、最終耐力値に両者の差異は見受けられず、終局せん断耐力に対するスターラップ破断の影響について確認するには至らなかった。ただし荷重-変位図では、II-2 に比較して II-3 の変位が増大していることを確認した。載荷試験中のスターラップひずみの増分については、II-1 と II-2, 3 の間でその差異が確認できたものの II-2 と II-3 においては、明確な差異は見受けられなかった (図 - 33, 36)。

(3) スターラップ配置の影響

スターラップ配置の影響について、II-2 と II-4 を比較し検証した。破壊形態は、ほかの試験体がすべて曲げ破壊であったのに対し、スターラップを配置しない II-4 のみせん断破壊であった。II-2 が曲げ破壊、II-4 がせん断破壊であったため ASR 劣化時のスターラップのせん断力に対する負担について定量的に把握するには至らなかったが、破断の有無に関わらずスターラップがせん断耐力に

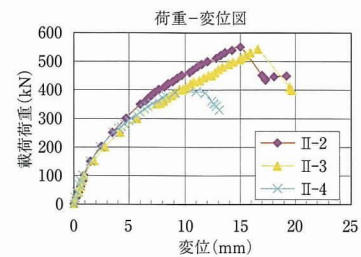


図 - 36 荷重-変位 (II-2, 3)

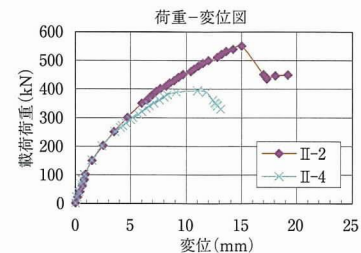


図 - 37 荷重-変位図 (II-2, 4)

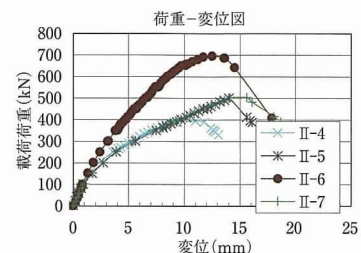


図 - 38 荷重-変位 (II-4 ~ 7)

寄与することが確認できた (図 - 37)。

(4) 補強工法の効果

補強工法の効果の確認を無補強試験体と補強試験体と比較した。II-5 および II-7 では、各計測項目とも同様な傾向を示しており、ともにせん断耐力の向上が確認できた。II-6 では、せん断耐力の向上とともに曲げ耐力の向上にも大きく寄与する結果となった。今回の 3 工法は、ASR 劣化による残存膨張を受けた場合においても、せん断耐力の向上が期待できることが確認できた (図 - 38)。

7. 全体考察および今後の課題

ASR により劣化した PC 試験体の実験について、(上)、(下) 2 回にわたって報告した。ここでは、本実験の着眼点である、「残存プレストレス」、「長期劣化性状」、「体積効果」、「せん断耐力」の 4 つのキーワードに基づき、本実験で得られた知見を整理し、全体考察および今後の課題について述べる。

7.1 知見の整理と全体考察

(1) 残存プレストレス (シリーズ I)

ASR 劣化した試験体は、外観変状としてひび割れ密度が 6.0 m^2 (0.2 mm 以上のひび割れ幅を方法 A にて算定) を超過し、コンクリート内部ひずみが 4500μ を越えるような劣化が非常に進行した状態においても、残存

プレストレスは健全試験体と同程度であった。

- ・使用限界状態荷重での載荷試験では静弾性係数の低下が確認されたが、プレストレスについては健全試験体との差異は見受けられなかった。静弾性係数が低下した場合、一般的にプレストレスは減少するが、本実験でプレストレス減少の挙動が顕著とならなかった原因として、ASRによるケミカルプレストレスの影響が考えられ、弾性係数の低下とバランスの取れた状態となっていたものと推察する。

- ・本試験体は、PC鋼材を軸力配置とし一軸方向に拘束しているが、ASR膨張は部材断面で均等に生じているわけではなく、環境条件により劣化度は異なっている。よって、部材断面内では圧縮から引張まで広範なひずみ分布が生じていると考えられる。ASRによるケミカルプレストレスと残存プレストレスによる拘束作用が、内部のひずみ分布にどのような相関性をもって影響しているかについては、さらなる知見・データの蓄積が必要であると考えられる。

(2) 長期劣化性状の把握 (シリーズI)

- ・ASR劣化の進行は環境条件に影響を受け、夏場の降雨量や気温上昇による影響が顕著となった。また、部位別には環境条件の影響を受けやすい上面の劣化がほかの部位に比べ顕著であった。

- ・試験体におけるASR劣化によるひび割れは、主に部材拘束のあるプレストレス導入方向に沿った長軸方向に発生した。そのほか、定着部端部や支点部などプレストレス力が一様でない箇所は亀甲状に発生した。

- ・ASRによるひび割れは、劣化初期はひび割れ本数、ひび割れ長さのみが増加したが、その後ひび割れ本数、ひび割れ長さの増加傾向は減少し、ひび割れ幅が拡大する傾向となった。この傾向を踏まえ、実構造物においてひび割れ密度を算定する場合、本実験で試みたひび割れ幅を考慮した算定方法B法⁹⁾を併用した方が望ましいといえる。

- ・特筆すべき事項として、ASR劣化が進行するとともに、上縁側の軸方向鉄筋に膨張傾向を呈する引張ひずみが生じ始めた。一般的にPC部材におけるASR劣化による引張ひずみは橋軸直角方向、鉛直方向が主として扱われており、橋軸方向の引張ひずみを捉えている事例は少ない。本実験では特に上縁側軸方向鉄筋に1500 μ 程度の引張ひずみが生じた。しかし、これに連動する上そり傾向などは発生しておらず、また付着切れを示すような急激なひずみ変動も見受けられず、本実験にてこの原因を解明することはできなかった。このひずみ値はあまり大きな値とはなっていないが、今後の研究や実構造物においても同様な傾向を示すか否かの確認が必要である。

- ・使用限界状態荷重における載荷試験の結果、剛性低下の影響はあるものの、全体挙動としては、平面保持性能、弾性挙動とも健全試験体と大きな差異は無く、またPC部材としての復元性能が確認できた。

- ・使用限界状態荷重での載荷試験における特筆事項として、コンクリート表面ひずみ勾配と内部鋼材ひずみ勾配

に差が生じ、内部鋼材ひずみの方が大きな値となっている点あげられる。たとえば本実験において内部鋼材が付着切れを起こしている場合、内部鋼材ひずみ値の方が小さくなるのが一般的傾向である。しかし載荷試験結果では、内部鋼材ひずみ値の方が大きい値を示す結果となったのは、付着が切れる傾向に進行しているのではなく、ASR劣化によるひび割れが内部鋼材まで到達しているためであると推察される。これは、超音波法にてひび割れ深さを測定した結果(ひび割れ深さ4~6cm程度)からも同傾向が示されていると考えられる。

(3) 体積効果 (シリーズI)

- ・大小試験体の比較から、部材体積が大きい程ASR劣化の変状が早期に顕れた。これは乾燥収縮と同様、表面積の影響度(体積 V /表面積 S)が大きいことが劣化促進に影響したと考えられる。また、この傾向はひび割れ密度など表面部のみでなく、内部ひずみ値も同様の傾向が現れた。さらに体積効果の影響は、コンクリートの表面ひずみよりも内部ひずみの方が顕著な傾向として発現した。

- ・劣化進展の速度の違いや膨張挙動の違いから、体積効果の影響は確認できたが、定量的な把握には至らなかった。今後、体積効果を定量的に表すには、他機関の実験結果と照合させることも一つの方法であると考えられる。

(4) せん断耐力 (シリーズII)

シリーズII実験では、せん断破壊していない試験体があるため、ここではせん断耐力を含めた耐荷力について記す。

- ・ASR試験体の最大耐力(曲げ耐力)は、健全試験体に比べ約7%減少したが、荷重-変位図の勾配から静弾性係数の低下は見受けられなかった。

- ・鉄筋を切断した試験体(II-3)の最大耐力(曲げ耐力)は、切断していない試験体(II-2)と比較して大きな差異が認められなかった。よって、スターラップが本実験程度配置されていた場合、ASR劣化によるせん断耐力の減少は小さいと推測される。

- ・本実験にて提案した補強案3工法は、ASR劣化による残存膨張が付加された状態でも補強効果が確認できた。しかし、これらの案を実構造物にて実現化するためにはさらなる検討が必要と考える。ASR劣化進行中の構造物を補強する場合とほかの劣化による補強とのちがいは、相対的に強化してしまうと新たに膨張により脆弱する部位が発現することである。本実験においても、連続繊維補強工法にて試験体上面の無補強部に大きなひび割れが発現したことによりその傾向が実証できた。

7.2 今後の課題

本実験により得られた結果を踏まえ、今後対応すべきと思われる課題を以下に列記する。

(1) さらなる長期性状の確認

本実験でのASR劣化レベルにおける載荷試験では、ASR劣化の影響が顕著な形として現れなかった。しかし、今後さらなる劣化が進行した場合、どのような変状が発現するかの確認が必要である。さらに、ASR劣化PC部材の残存プレストレスについても、劣化の進行度合により断面

内のひずみバランスがさらに複雑化し、PC 鋼材の緊張力にも影響を及ぼす可能性が否定できない。

(2) ASR 劣化度合の定量的評価

現在、PC 構造物における ASR 劣化の確認は、主に外観症状によるところが大きいが、劣化進行の度合を定量的に評価する手法は確立されていない。例えば、力学的挙動により劣化進行度を示すなどの指標を確立することが必要であると考えられる。

(3) 終局限界状態レベルにおける ASR 劣化の影響

今回シリーズ I 実験で行った載荷試験は、使用限界状態までであり、終局限界状態において ASR 劣化した実構造物相当の大型試験体の耐荷性能にどのような影響を及ぼすかは確認できていない。今後、大型試験体における終局限界状態での載荷試験にてどのような挙動を示すか、またその際、体積効果の影響度合はどの程度なのかを確認することが重要であると考えられる。

(4) 補強案の実構造物への対応方法

シリーズ II 実験の補強 3 工法は、主にせん断耐力向上を目的としたものであった。しかし、これらの工法を実構造物においてどのように適用するか、たとえば連続繊維補強工法においてどのようにして上面を固定するかなど、具体的な適用方法についての課題が残存している。

8. おわりに

ASR 劣化は、他のコンクリートの劣化機構に比べ、その対策には多くの施設管理者が悩まされているのが現状である。そんななか、今回の取組みによる成果により、これまで推測の域を出なかった ASR 劣化が PC 構造物に与える影響について、多くの基礎的な定量データや知見を得られたことは意義があると考えられる。

厳しい社会情勢のなかでの活動ではあったが、今後、老朽化や劣化が予想される既設 PC 構造物の維持管理を適切

に行ううえで、本成果が対策立案の一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、多くのご指導とご高配を賜りました本委員会の宮川豊章委員長（京都大学大学院）をはじめ、検討委員各位、民間企業関係各位、ならびに PC 建協関係各位に対しまして心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR 対策検討委員会報告書、2009
- 2) 西村一紀他：ASR により劣化した PC 部材のせん断耐力および補強に関する実験的研究、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 6 巻、pp.123-128、2006
- 3) 村井篤他：ASR により劣化した PC 部材のせん断耐力および補強に関する実験的研究、プレストレストコンクリートコンクリート技術協会 第 15 回シンポジウム論文集、pp.89-92、2006
- 4) Kazuki Nishimura, Kei Nuroda, Yoshinobi Kobayashi, Hideaki Taniguchi, Toyoaki Miyagawa : EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR STRENGTH AND REINFORCEMENT OF PC MEMBERS AFFECTED BY ALKALI-SILICA REACTION (ASR), pp.290-299, 13th ICAAR 2008 Proceedings, 2008
- 5) 奥山和俊他：ASR により劣化した PC 試験体を用いたせん断補強に関する実験報告、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、pp.235-242、2008
- 6) 城代和行他：ASR により劣化を受ける PC 部材の長期性状と補強効果に関する実験報告、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 9 巻、pp.203-210、2009
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、pp.132-141、2007
- 8) 田村他：矩形断面を有する PC はり部のせん断耐力評価に関する一考察、プレストレストコンクリートコンクリート技術協会 プレストレストコンクリート Vol.45, No.6, pp.101-110, 2003
- 9) 奥山和俊他：ASR により劣化した PC 試験体に関する実験報告 (上) - PC 建協 ASR 対策検討委員会報告 -, プレストレストコンクリートコンクリート技術協会 プレストレストコンクリート Vol.52, No.3

【2010 年 5 月 13 日受付】



刊行物案内

第 37 回 PC 技術講習会テキスト

PC 技術・最近の動向

平成 21 年 2 月

定 価 6,000 円 / 送料 500 円

会員特価 5,000 円 / 送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会