

ASR劣化を生じたコンクリート 構造物の構造性能評価

三方 康弘
大阪工業大学

■ 研究背景

アルカリシリカ反応（ASR）が生じるメカニズム

- ・セメント中のアルカリ成分（ナトリウムイオン、カリウムイオン）
- ・骨材（砂や砂利）中のシリカ成分
（アルカリ骨材反応を生じさせる骨材に含まれている）
- ・水分



図 反応リム



図 ゲル

■ 研究背景

ASRにより鉄筋破断が生じた事例

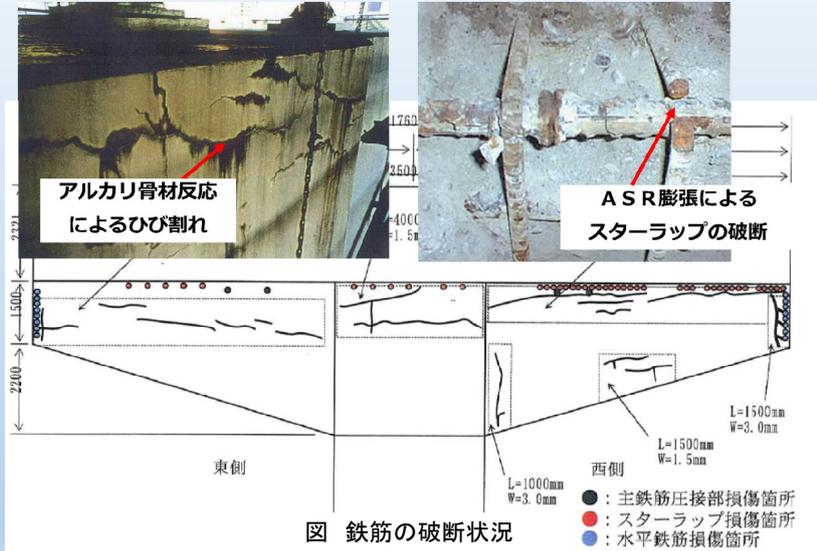


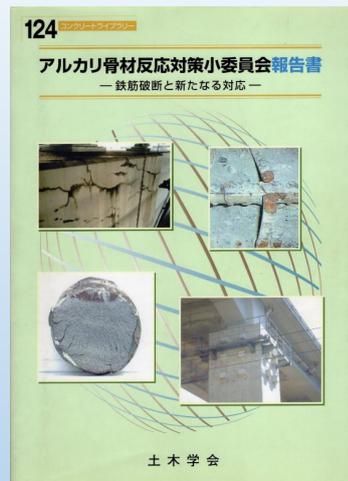
図 鉄筋の破断状況

3

■ アルカリ骨材反応対策小委員会(土木学会), 2005年

宮川豊章先生(京都大学)を委員長として委員会が設置された。

- 第Ⅰ編 アルカリ骨材反応およびそれに伴う鉄筋破断の実態・メカニズム
- 第Ⅱ編 ASRによる鉄筋破断等の影響を受けた構造物の安全性照査
- 第Ⅲ編 ASRによって劣化した構造物の補修・補強



■ 鉄筋破断のメカニズム

鉄筋の曲げ加工部にはアルカリシリカ反応による膨張圧によって、外側に拡がる力が作用します。

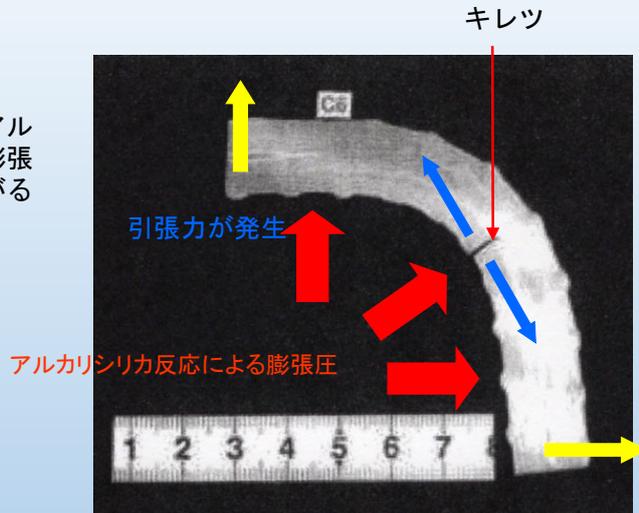
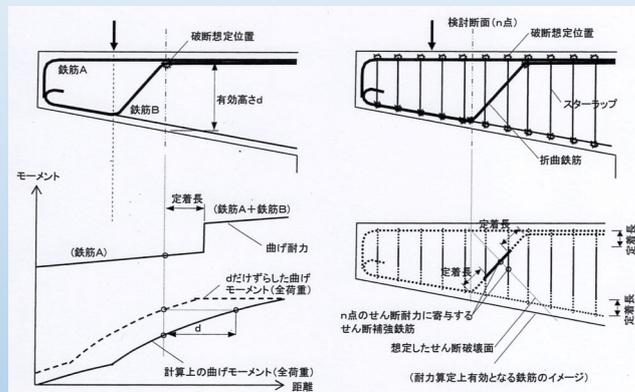


図 鉄筋の曲げ加工内側に発生したクラック

出典：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書（土木学会），2005年

■ 破断した鉄筋の定着長の考え方

スターラップの破断の影響については、破断位置を自由端と考えた鉄筋の定着長さの1/2を無効として、有効なスターラップ長さを考慮してせん断補強筋が受け持つせん断力を評価する。実験供試体での検証結果から定着長さは 30ϕ 程度となり、定着長さの1/2である 15ϕ の鉄筋を無効として考えても同様な結果となる。安全側の評価として破断位置から 20ϕ 区間の鋼材を無視して評価する。



出典：アルカリ骨材反応対策小委員会報告（土木学会），2005年

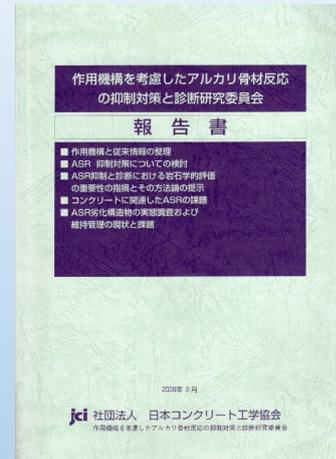
図 引張鉄筋が曲げ加工部で破断すると仮定した場合の曲げモーメントと曲げ耐力

図 せん断補強筋が曲げ加工部で破断すると仮定した場合のせん断を負担する鉄筋

■ 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会 (日本コンクリート工学会), 2008年

鳥居和之先生（金沢大学）を委員長として委員会が設置された。

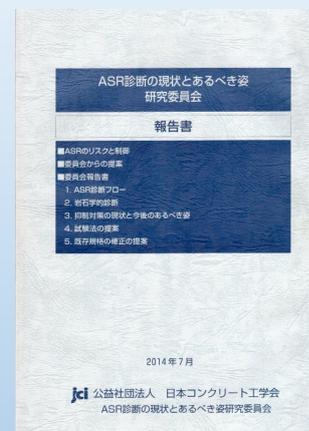
1. 作用機構と従来情報の整理
2. A S R抑制対策についての検討
3. A S R抑制と診断における岩石学的評価の重要性の指摘とその方法論の提示
4. コンクリートに関連したA S Rの課題
5. A S R劣化構造物の実態調査および維持管理の現状と課題



■ ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会 (日本コンクリート工学会), 2014年

山田一夫氏（国立環境研究所）を委員長として委員会が設置された。

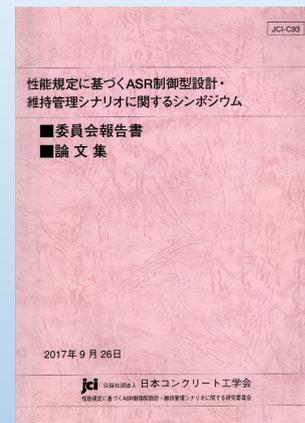
- 第Ⅰ編 A S Rのリスクと制御
第Ⅱ編 委員会からの提案
第Ⅲ編 委員会報告
1. A S R診断フロー
 2. 岩石学的診断
 3. 抑制対策の現状と今後のあるべき姿
 4. 試験法の提案
 5. 既存規格の修正の提案



■ 性能規定に基づくASR制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会（日本コンクリート工学会），2017年

山田一夫氏（国立環境研究所）を委員長として委員会が設置された。

1. はじめに
2. コンクリートプリズム試験による共通試験と予測に向けた技術的課題
3. ASR劣化した構造物の構造性能評価およびASR制御に基づく構造設計の展望
4. 既存ASR劣化構造物の維持管理シナリオ
5. ASR制御型設計・維持管理連係シナリオの委員会提案



■ ASR劣化したPCはりに対する共通解析

○解析対象のPC桁

沖縄県浦添市古島に架橋されていた実橋梁のプレテンションPC桁
 供用開始から数年後にPC桁下面に主軸方向に沿ったひび割れが確認された。膨張量は不明であるが、側面におけるひび割れ幅は最大0.8mm程度、ひび割れ密度9.93m/m²である。

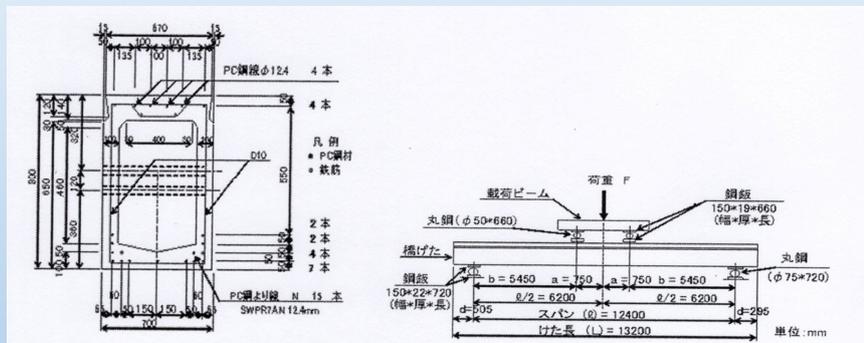


図 解析対象のPC桁

出典：性能規定に基づくASR制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会報告書（日本コンクリート工学会），2017年

ASR劣化したPCはりに対する共通解析

表 解析モデル

基本情報				
	解析コード A	解析コード B	解析コード C	解析コード D
	汎用プログラム[3]	汎用プログラム[4]	自主開発プログラム[5]	自主開発プログラム[6]
ひび割れモデル	固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルのどちらか(直交ひび割れ)	固定ひび割れモデル(直交ひび割れ)	固定ひび割れモデル(非直交多方向ひび割れ)	固定ひび割れモデル(非直交多方向分散ひび割れ)
コンクリートモデル	8 節点ソリッド要素 構成則：全ひずみひび割れモデル 圧縮：放物線モデル	8 節点ソリッド要素 構成則：全ひずみひび割れモデル 圧縮：強度まで放物線モデル[9]を多直線にて任意入力、強度以降は圧縮破壊エネルギー[10]を考慮した直線軟化	8 節点ソリッド要素 構成則：格子等価連続体モデル[7] 圧縮：強度まで Saenz 式、強度以降は圧縮破壊エネルギー[10]を考慮した直線軟化	8 節点ソリッド要素 構成則：弾塑性破壊モデル[8] 圧縮：弾塑性破壊モデル、ひび割れ後：Miyahara-Maekawa model もしくは Vecchio & Collins model
	引張：Hordijk モデル	引張：Hordijk モデル	引張：強度まで直線、強度以降は破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデル	引張：強度まで直線、強度以降は破壊エネルギーを考慮したモデル
	せん断：固定ひび割れモデルの場合はひび割れ後のせん断弾性係数を $\beta \times G$ とするモデル (β は問題に応じて決定)	せん断：ひび割れ後のせん断弾性係数を $\beta \times G$ とするモデル (β は問題に応じて決定)	せん断：ひび割れ面形状をモデル化したモデル[11]	せん断：接触密度関数によるせん断伝達モデル
	多軸の影響：考慮しない	多軸の影響：考慮しない	多軸の影響：圧縮低減係数 η を考慮	多軸の影響：等価応力-等価ひずみ関係
	補強筋	埋込鉄筋要素と軸要素 構成則：鉄筋(完全弾塑性モデル)、PC 鋼より線(バイリニアモデル)	埋込鉄筋要素 構成則：鉄筋=バイリニアモデル(完全弾塑性)、PC 鋼材=トリリニアモデル(道路橋示方書モデル)	軸要素 構成則：バイリニア型
付着	インターフェイス要素 構成則：2 直線モデル[12]	完全付着	ボンドリソク要素 構成則：付着軟化特性を考慮した付着応力-すべり関係[13]	一般的に RC 要素として定義 構成則：付着・すべり・ひずみ関係モデル

出典：性能規定に基づくASR制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会報告書(日本コンクリート工学会)，2017年

ASR劣化したPCはりに対する共通解析

表 解析モデル

ASR の考慮				
	解析コード A	解析コード B	解析コード C	解析コード D
膨張モデル	考慮しない	鉄筋およびPC鋼材への初期応力として考慮	損傷理論に基づいたモデル[14]	Biot 固液二相モデルに基づいたモデル[15]
膨張の考慮		入力：膨張によるプレストレス増分を鋼材応力に入力	入力：等方的な自由膨張を仮定	入力：配合・水分条件・アルカリ濃度条件を入力
		応答：コンクリートのケミカルプレストレス(解析スタート時点では全要素にひび割れは生じさせない)	応答：拘束の影響により方向性のある膨張(3方向で独立の挙動)	応答：拘束の影響により方向性のある膨張
材料劣化	均質化法によりひび割れ密度から強度低下を推定[1]	表面ひび割れを含み、拘束度の小さい表面付近(かぶりの2倍と仮定するなど)と、視認できるひび割れを含み、拘束度の大きい内部とに分ける[16]	膨張量に依存した劣化係数により考慮[17](圧縮強度、引張強度、弾性係数は独立に劣化)、主軸3方向で膨張量は異なるため劣化度も異なる。膨張による初期ひび割れおよび初期ひび割れ幅を考慮	膨張率によってひび割れが生じることにより損傷が考慮される
その他			ASR 膨張の結果、コンクリートおよび補強筋に生じる初期応力ならびに初期ひずみを考慮	ひび割れ中の ASR 割合占有比率により、せん断伝達に関わるひび割れ幅、引張軟化係数を変化

○性能評価解析の要点と課題

解析対象としたプレテンションPC桁のように曲げ変形が卓越する部材では、曲げ剛性に及ぼす要因は断面に垂直な方向のコンクリートの弾性係数である。ひび割れ発生荷重やひび割れ発生後の曲げ剛性にはプレストレス力が影響する。したがって、ASR劣化したPC桁の性能を精度よく評価するためには両者を適切に把握する必要がある。

解析コードA、BはASR膨張を直接評価しないものであり、解析コードC、Dは膨張解析によりASR膨張挙動を評価した上で性能評価を行っている。膨張解析は必ずしも必要ではないが、材料特性値や応力状態の適切なモデル化が重要である。

出典：性能規定に基づくASR制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会報告書(日本コンクリート工学会)，2017年

■ 研究内容

1. ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材の曲げ耐荷特性
2. ASRを生じたPRCはり部材のせん断耐荷特性

1. ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材の曲げ耐荷特性

ASR劣化を生じたコンクリート構造物においては、沿岸部のみならず凍結防止剤の散布の影響により、ASRのひび割れにより水、酸素等の腐食因子が鋼材に供給されやすく、鋼材が腐食しやすい環境にあると言える。



ASRや鋼材腐食等の劣化要因や主鉄筋とコンクリートの付着特性がRCはり部材の曲げ耐荷特性に及ぼす影響について検討を行った。

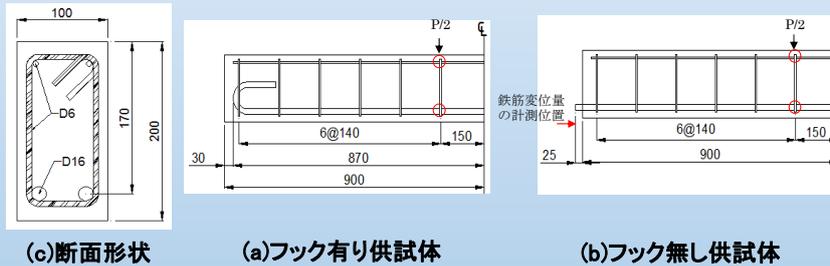
■ 実験概要

1)劣化の種類

- ASR (A-シリーズ)
- 鋼材腐食 (C-シリーズ)
- ASR+鋼材腐食 (AC-シリーズ)
- 健全 (N-シリーズ)

2)フックの有無

コンクリートと鉄筋による付着力の低下が曲げ耐荷特性に及ぼす影響について検討するために、定着部の影響を排除した180度フックを有しない供試体を作製した。



(c)断面形状

(a)フック有り供試体

(b)フック無し供試体

図 供試体の側面図と断面形状 (mm)

■ 実験概要

表 コンクリートの示方配合

シリーズ	G _{max} (mm)	スランプ ^o (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)							
						W	C	*1		*1		NaCl	*2
								S _n	S _r	G _n	G _r		
N	25	8	63	4.0	45.8	183	290	791	0	988	0	0	725
C	25	8	63	4.0	45.8	183	290	791	0	988	0	13.1	725
A, AC	25	8	63	4.0	45.8	183	290	396	411	494	492	13.1	725

*1 S_n: 非反応性細骨材, S_r: 反応性細骨材, G_n: 非反応性粗骨材, G_r: 反応性粗骨材

*2 A: AE減水剤

反応性骨材には輝石安山岩（反応性鉱物：クリストパライト，トリディマイト，火山ガラス）を用いた。

◆AC-シリーズ（ASR+鋼材腐食）

4週間湿布養生後、室内に保管し、温度40℃、相対湿度90%の環境にて促進養生を行うとともに、3%濃度の塩水を週5日散布した。

■ 実験結果

表 はり供試体の詳細

シリーズ	供試体	劣化の種類	フックの有無	*1 材齢 (日)	圧縮強度 (): 材齢28日 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 (): 材齢28日 E_c (kN/mm ²)
N	N-F-08	健全	有り	28	25.0	21.9
	N-08		無し			
	N-F-09		有り	28	32.5	29.6
	N-09		無し			
	N-F-10		有り	28	30.0	26.8
	N-10		無し			
	N-F-11		有り	28	30.4	35.7
	N-11		無し			
	N-F-13		有り	28	26.2	22.5
N-13	無し					
C	C-F-08	鋼材腐食	有り	443	28.2(21.5)	32.1(25.6)
	C-08		無し			
	C-F-09		有り	374	26.7(19.6)	26.7(26.5)
	C-09		無し			
	C-F-10		有り	377	30.9(21.2)	28.0
	C-10		無し			
	C-F-11		有り	759	24.6(13.6)	22.2(28.2)
	C-11		無し			

■ 実験結果

表 はり供試体の詳細

シリーズ	供試体	劣化の種類	フックの有無	*1 材齢 (日)	圧縮強度 (): 材齢28日 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 (): 材齢28日 E_c (kN/mm ²)
A	A-F-08	ASR	有り	761	23.6(31.2)	15.4(28.3)
	A-08		無し			
	A-F-09		有り	368	28.0(23.1)	14.0(28.6)
	A-09		無し			
	A-F-10		有り	740	28.2(27.0)	14.6
	A-10		無し			
	A-F-11		有り	757	22.5(16.9)	6.1(23.5)
A-11	無し					
AC	AC-F-08	ASR+ 鋼材腐食	有り	761*1	38.9(28.1)	13.4(28.0)
	AC-08		無し			
	AC-F-09		有り	745	30.6(26.4)	19.0(28.8)
	AC-09		無し			
	AC-F-10		有り	1134	25.5(26.4)	6.2
	AC-10		無し			
	AC-F-11		有り	757	21.0(17.9)	8.2(25.6)
AC-11	無し					

*1 AC-F-08, AC-08供試体は材齢28日から365日まで養生室に保管し、3%の塩水散布を行った。さらに、材齢365日以降はASRを促進させるために促進養生(温度40℃、相対湿度90%)を行った。

■ 実験結果

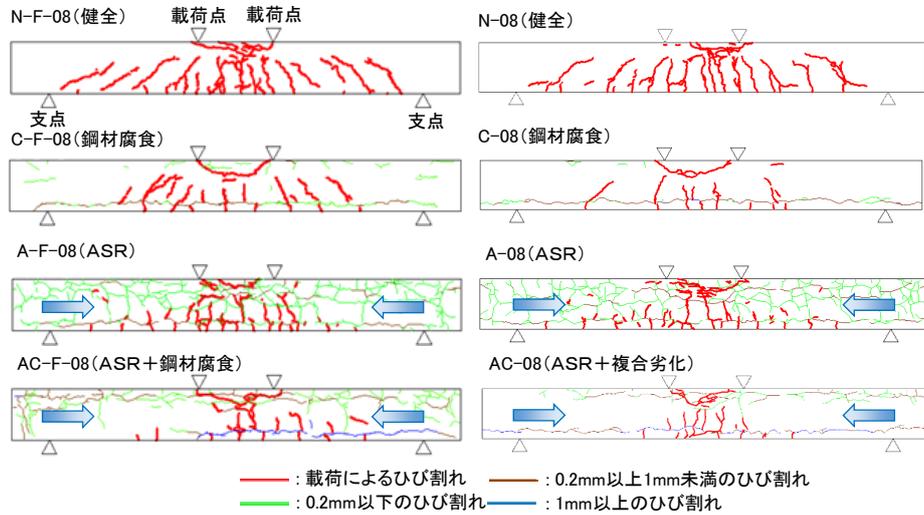


図 载荷終了後のひび割れ状況

■ 実験結果

表 最大荷重と耐力計算値

シリーズ	供試体	劣化の種類	材齢 (日)	圧縮強度 () : 材齢28日 f'_c (N/mm ²)	鉄筋の質量減少率 (%)	ケラ アレストレス (計算値) (N/mm ²)	曲げ破壊荷重 (計算値) P_{ub} (kN)	最大荷重 P_u (実測値) (kN)
N	N-F-08	健全	28	25.0	-	-	62.7	75.2
	N-08				-	-	62.7	76.9
	N-F-09		28	32.5	-	-	66.3	72.2
	N-09				-	-	66.3	74.2
	N-F-10		28	30.0	-	-	65.3	75.7
	N-10				-	-	65.3	75.5
	N-F-11		28	30.4	-	-	64.8	69.8
	N-11				-	-	64.8	73.3
	N-F-13		28	26.2	-	-	62.0	70.3
	N-13				-	-	62.0	70.1
C	C-F-08	鋼材腐食	443	28.2 (21.5)	4.7, 5.4	-	67.1	73.3
	C-08				1.6, 2.4	-	62.5	67.8
	C-F-09		374	26.7 (19.6)	2.1, 2.9	-	63.3	72.5
	C-09				2.6, 2.7	-	62.8	72.8
	C-F-10		377	30.9 (21.2)	1.3, 1.6	-	63.8	75.2
	C-10				1.7, 2.1	-	65.7	71.8
	C-F-11		759	24.6 (13.6)	1.8, 1.0	-	60.1	65.9
C-11	2.2, 1.7	-			59.8	67.1		

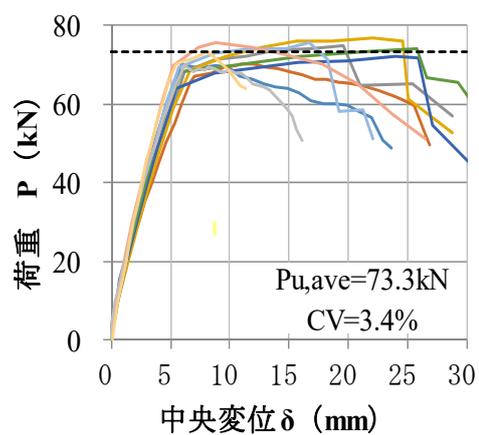
■ 実験結果

表 最大荷重と耐力計算値

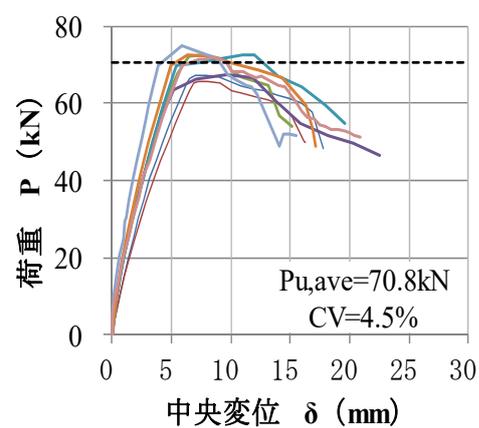
シリーズ	供試体	劣化の種類	材齢 (日)	圧縮強度 () : 材齢28日 f'_c (N/mm ²)	鉄筋の 質量 減少率 (%)	ケミカル プレストレス (計算値) (N/mm ²)	曲げ破壊 荷重 (計算値) P_{ub} (kN)	最大荷重 P_u (実測値) (kN)
A	A-F-08	ASR	761	23.6(31.2)	5.5, 5.4	4.02	60.9	74.7
	A-08				3.7, 2.8	4.58	61.0	75.2
	A-F-09		368	28.0(23.1)	1.8, 3.1	6.67	64.2	72.0
	A-09				4.1, 3.7	6.69	62.9	73.5
	A-F-10				2.8, 3.2	6.79	58.1	68.4
	A-10		3.4, 3.1	4.96	62.3	64.9		
	A-F-11		757	22.5(16.9)	0.7, 0.2	3.66	59.0	63.5
A-11	0.9, 0.9	2.75			59.5	67.6		
AC	AC-F-08	ASR+ 鋼材腐食	761 ^{*1}	38.9(28.1)	6.9, 8.5	2.44	63.3	67.4
	AC-08				3.6, 5.4	2.00	63.5	65.2
	AC-F-09		745	30.6(26.4)	4.2, 3.7	4.67	60.8	68.4
	AC-09				3.0, 4.3	5.74	63.7	69.8
	AC-F-10				1.9, 1.7	7.28	61.3	68.8
	AC-10		1134	25.5(26.4)	3.4, 3.2	5.30	60.2	66.9
	AC-F-11				1.5, 1.3	2.87	57.6	66.6
AC-11	757	21.0(17.9)	3.2, 2.0	3.57	56.9	65.7		

*1 劣化したコンクリートの圧縮強度、腐食鉄筋の引張強度を用いてファイバーモデルにより算定した

■ 実験結果



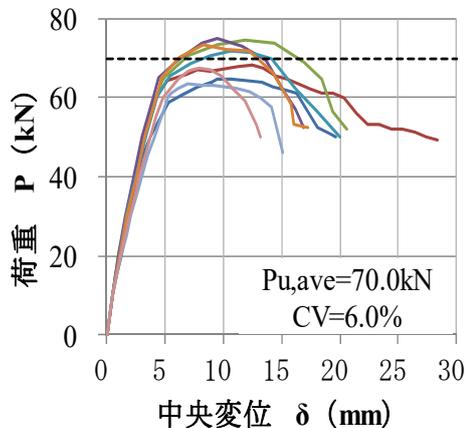
(a) Nシリーズ供試体(健全)



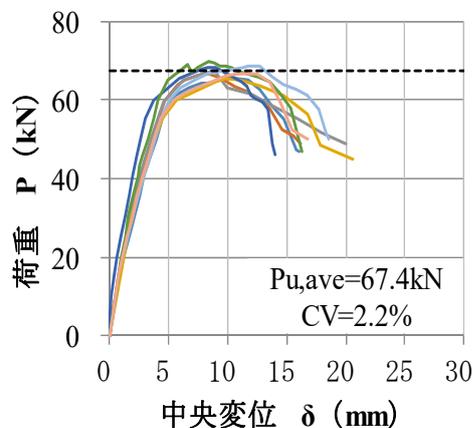
(b) Cシリーズ供試体(鋼材腐食)

図 荷重-中央変位関係

■ 実験結果



(c) Aシリーズ供試体(ASR)



(d) ACシリーズ供試体(ASR+鋼材腐食)

図 荷重—中央変位関係

■ 非線形有限要素解析

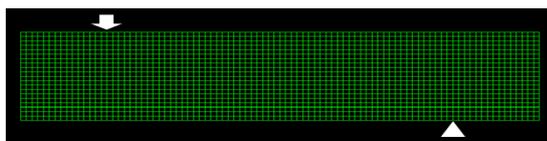


表 解析条件

	コンクリート	鉄筋
要素タイプ	ソリッド要素	トラス要素
材料条件	テストピースの圧縮強度試験の実測値を使用	載荷試験後のはり供試体から取り出した鉄筋の引張試験の実測値を使用
幾何学条件	要素の体積 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$	主鉄筋2-D16 せん断補強筋D6
材料特性	圧縮特性 : 中村らのモデル* 引張特性 : コンクリート標準示方書	バイリニアモデル

概要

3次元非線形解析モデル

変位制御とし、実験供試体の終局時の変位を強制変位として与える
汎用有限要素解析プログラム
DIANAver9.4.3

参考文献 : Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, Ja-pan Concrete Institute, pp.259-272.1999.

■ 付着特性

コンクリートと鉄筋の付着特性を検討するため、以下の付着供試体を作製した。

設計基準強度・・・24N/mm² 使用鉄筋・・・D19(SD345), D6(SD345)

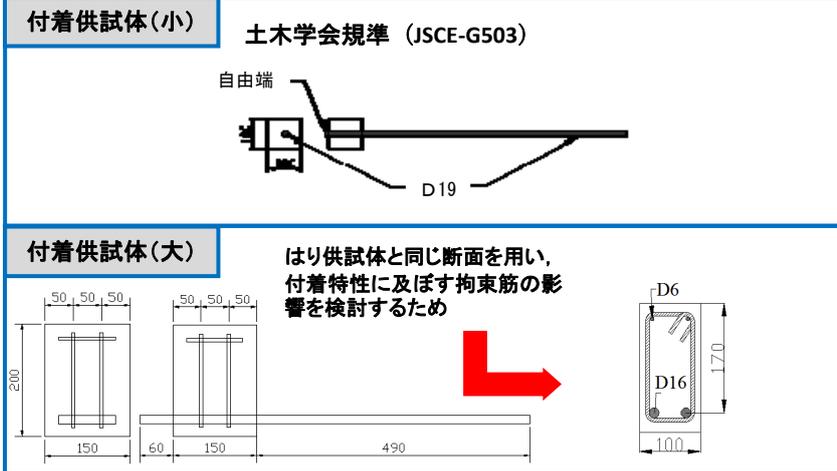


図 付着供試体

■ 実験結果

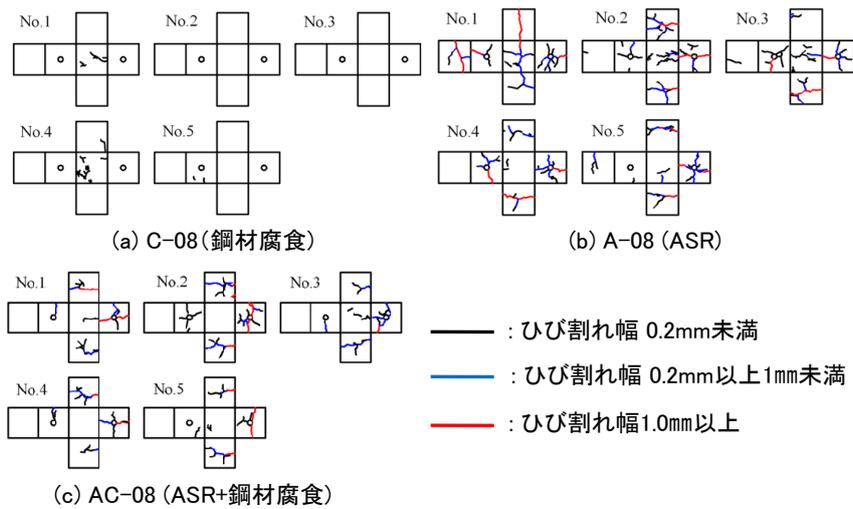
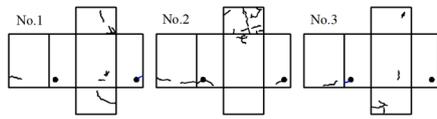
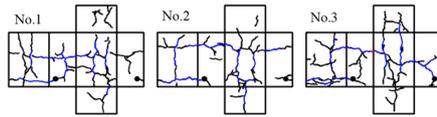


図 載荷試験前のひび割れ状況 (付着供試体(小))

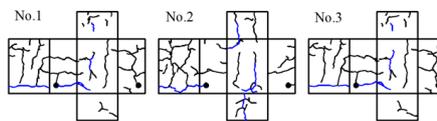
■ 実験結果



(a) C-08 (鋼材腐食)



(b) A-08 (ASR)



(c) AC-08 (ASR+鋼材腐食)

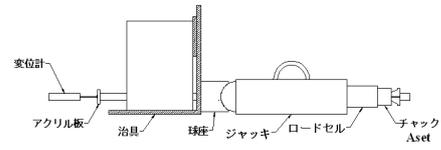


図 引抜き試験の状況

- : ひび割れ幅 0.2mm未満
- : ひび割れ幅 0.2mm以上1mm未満
- : ひび割れ幅1.0mm以上

図 載荷試験前のひび割れ状況 (付着供試体(大))

■ 実験結果

表 付着強度

供試体	付着供試体(小) 平均値		付着供試体(大) 平均値	
	最大荷重 (kN)	最大付着応力度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	最大付着応力度 (N/mm ²)
N-08	40.7	12.74	41.0	5.46
N-13	38.6	11.99	44.3	5.91
C-08	38.0	11.77	49.2	6.56
C-11	27.7	8.61	43.1	5.75
A-08	28.2	8.87	63.5	8.47
A-10	25.7	7.98	53.8	7.17
A-11	17.1	5.31	49.6	6.62
AC-08	18.5	5.81	52.0	6.93
AC-10	29.0	9.02	64.5	8.60
AC-11	23.0	7.16	52.1	6.95

■ 解析概要

実測モデル

鉄筋は軸力のみを伝達するトラス要素で表現しているため、フープ筋の拘束効果が付着応力度に及ぼす影響は、付着供試体(大)の試験結果から作成した付着応力度-すべり関係のモデルにより考慮した

表 モデルの作成

各供試体の平均値を用いて算出	
1点目	原点
2点目	最大付着応力度の1/3の値
3点目	最大付着応力度の0.9倍の値
4点目	最大付着応力度
5点目	自由端変位2mmの値
6点目	自由端変位5mmの値

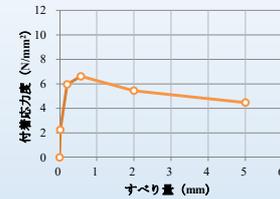


図 付着応力度-すべり量関係

島モデル※1

健全な鉄筋コンクリートに用いる,
付着応力度-すべり関係

$$\tau_s = 0.9 f'_c{}^{2/3} (1 - e^{-40.5s^{0.6}})$$

$$s = S/D$$

S: すべり量

D: 鉄筋径

f'_c : コンクリート圧縮強度

塩害モデル※2

塩害が生じた鉄筋コンクリートに用いる,
付着応力度-すべり関係

$$\tau_{se} = \tau_s \times e^{-1.523 \times w}$$

w: 最大ひび割れ幅

参考文献:

※1: 島 弘, 岡 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987, 土木学会

※2: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書(1998.10), 日本コンクリート工学会

■ 解析概要

ASRの膨張を鉄筋が拘束することにより、ケミカルプレストレスが生じるが、上田ら※は膨張予測モデルを用いたケミカルプレストレスの算定方法を提案している。膨張に伴い生じる応力は無拘束の場合に生じる自由膨張ひずみと、拘束を受けた場合に実際に生じる膨張ひずみの差とコンクリート内部の微細な損傷を表すパラメータを用いて算定される。

$$\sigma(t) = (1 - \Omega) E_{c0} \cdot (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_0(t))$$

$\sigma(t)$: 膨張に伴い生じる応力

$\varepsilon_c(t)$: 拘束を受けた場合に実際に生じる膨張ひずみ

$\varepsilon_0(t)$: 無拘束の場合に生じる自由膨張ひずみ

Ω : コンクリート内部の微細な損傷を表すパラメータ

E_{c0} : コンクリートの初期剛性

$$\Omega = \begin{cases} 0 & \varepsilon_c(t) \leq \varepsilon_{cr} \\ 1 - \left(\frac{1}{1 + 1000 \sqrt{\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cr}}} \right) & \varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} \end{cases}$$

参考文献: アルカリ骨材反応によるRC部材の膨張予測解析, 上田尚史, 澤部純浩, 中村光, 国枝稔, 土木学会論文集E, Vol.63, No.4, pp.532-548, 2007.10

■ 解析概要

表 ケミカルプレストレス

供試体	$\epsilon_c(t)$ ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_0(t)$ ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{cr} ($\times 10^{-6}$)	E_{c0} (kN/mm ²)	$\epsilon_s(t)$ ($\times 10^{-6}$)	*1 みかけの 弾性係数 E_s (kN/mm ²)	ケミカル プレストレス (実測値) $\sigma(t)$ (N/mm ²)	ケミカル プレストレス (計算値) $\sigma(t)$ (N/mm ²)
A-F-11	231	2509	46	23.45	309	183.3	3.55	3.66
A-11	349	2509	46	23.45	307	185.3	2.79	2.75
AC-F-11	423	2656	65	25.59	204	181.9	1.82	2.87
AC-11	314	2656	65	25.59	355	178.9	3.12	3.57

*1 荷重試験終了後の供試体から腐食鉄筋を取り出し、引張試験を実施した。みかけの弾性係数の算定には公称断面積を用いた

■ 解析概要

ASR膨張を表現するために、モデルのコンクリート部分に温度による膨張を与え、はり中央の主鉄筋位置のコンクリート応力が算出したケミカルプレストレスと同等になるように逆解析を行った。

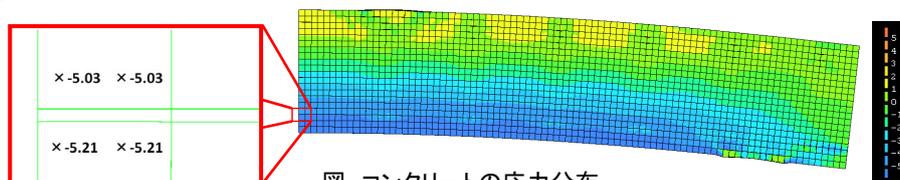


図 コンクリートの応力分布

表 ケミカルプレストレスの導入量

解析モデル	付着モデル	導入温度荷重 (°C)	導入時間 (s)	ケミカルプレストレス(N/mm ²)	
				導入量	目標導入値
A-10	実測モデル	9.37	0.1	-5.12	-5.12
	鳥モデル	9.37		-5.12	
A-11	実測モデル	5.62		-3.09	-3.09
	鳥モデル	5.62		-3.09	
AC-10	実測モデル	11.12		-5.585	-5.59
	鳥モデル	11.12		-5.585	
	塩害モデル	11.26		-5.52	
AC-11	実測モデル	6.74		-3.675	-3.68
	鳥モデル	6.74		-3.675	
	塩害モデル	6.76		-3.675	

■ 解析結果

A-11供試体

ASR膨張解析によるケミカルプレストレスの導入により、降伏に至るまでの剛性が向上した。

実測、島モデルともに解析値の降伏荷重が実験値よりも若干低下したが、最大荷重付近まで精度よく再現できている。

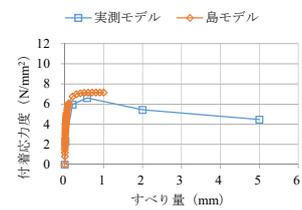


図 付着応力度—すべり量関係

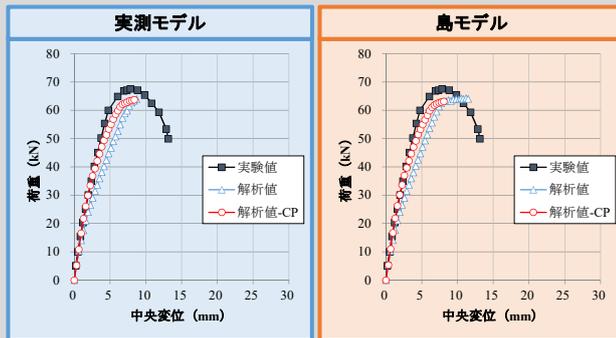


図 荷重—中央変位関係

33

■ 解析結果

AC-10供試体

ASR膨張解析によるケミカルプレストレスの導入により、降伏に至るまでの剛性が向上した。

全モデルとも最大荷重まで精度よく再現できている。

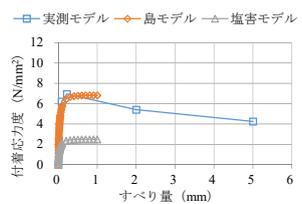


図 付着応力度—すべり量関係

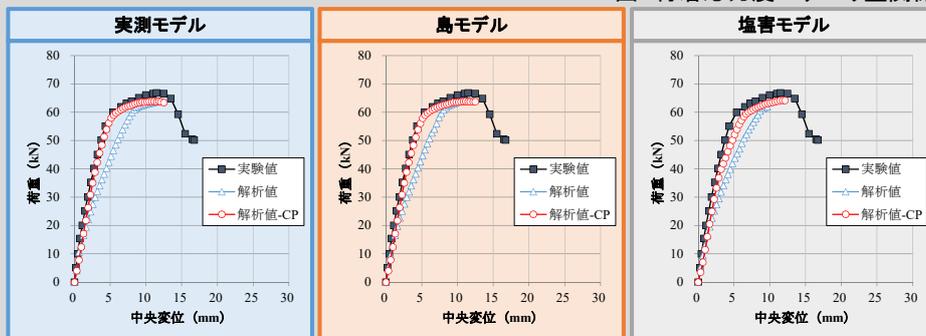


図 荷重—中央変位関係

34

■ 結論

(1) 載荷試験結果から、ASR劣化を生じた供試体はケミカルプレストレスの影響により、コンクリート負担せん断力 V_0 が向上したため、せん断ひび割れが確認されなかった。とりわけ、複合劣化を生じた場合には、鉄筋腐食の影響により損傷が曲げスパンに集中した。

(2) 今回の試験体に対する解析条件では、鉄筋とコンクリートの付着特性の違いが曲げ耐荷特性に及ぼす影響は軽微であった。また、ASR膨張解析によってケミカルプレストレスを導入することにより、降伏に至るまでの剛性を向上させ、実験値を精度良く表現することができた。以上のことから、ASR劣化を生じたコンクリート部材を解析的に評価する上では、ASR膨張による部材内の応力状態(ケミカルプレストレス)を適切にモデル化することが重要である。

2. ASR劣化を生じたPRCはり部材のせん断耐荷特性

土木学会のアルカリ骨材反応対策検討小委員会報告書によると、鉄筋破断が生じている場合に、破断位置から20φ区間の鋼材を無視して評価する考え方が示されている。しかしながら、ASR劣化を生じたはり供試体にてせん断補強筋の破断を再現させたケースや、ASR劣化を生じたPC部材のせん断耐力に関する知見が少ないのが現状である。



このような背景を踏まえて、断面幅200mm×断面高さ500mm×全長3400mmのPRCはり供試体を製作し、ASR劣化の進展状況やせん断耐荷特性を検討することとした。なお、供試体の破壊形式をせん断破壊先行型とするため、導入プレストレス量を低いレベルとし、曲げ耐力を確保するために鉄筋を配筋することとし、PRC供試体を製作することとした。

■ 実験概要

コンクリートの種類: ASR, 普通 (設計計基準強度: 40N/mm²)
 PC鋼材: SWPR19L (導入時; 緊張力: 108kN, 上縁: 0.1N/mm², 下縁: 2.1N/mm²)
 主鉄筋: 3-D19 (SD345), せん断補強筋: D6 (SD345)
 a/d=1.95とした1点集中荷方式にてスターラップの破断を模擬したスパンとスターラップが健全なスパンに分けて荷重実験を行った。試験区間でないスパンは補強を実施した。

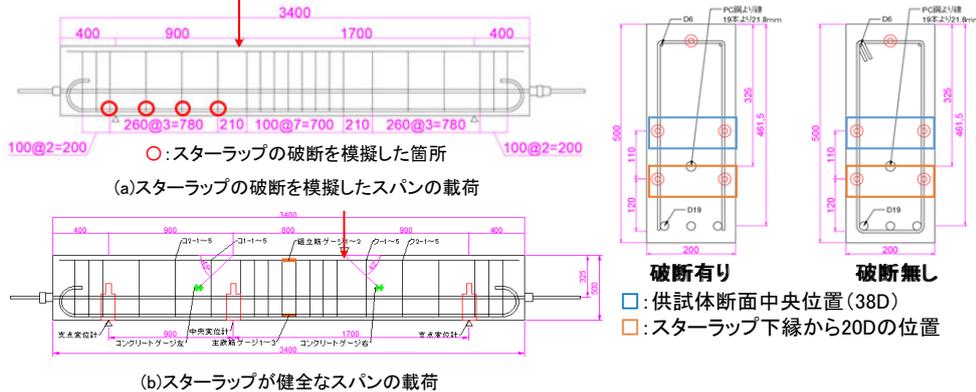


図 補強状況

図 供試体の側面図と断面形状 (mm)

■ 実験概要

表 示方配合

シリーズ	コンクリートの種類	Gmax (mm)	SI (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)							
							W	C	S		G		NaCl	AE剤 (cc)
									非反応	反応	非反応	反応		
NB-16	健全	20	8	45.5	4	44.1	178	391	746	0	1026	0	0	978
AB-16	ASR					41.1	163	358	356	365	550	572	11.6	895

反応性骨材には輝石安山岩 (反応性鉱物: クリストパライト, トリディマイト, 火山ガラス) を用いた。細骨材: 北海道産砕砂 ($\rho_s = 2.67$), 粗骨材: 北海道産砕石 ($\rho_s = 2.58$)



図 はり供試体製作状況

表 養生条件

シリーズ	養生条件	
	脱型後	3年間
NB-16	散水養生 (28日間)	野外曝露
AB-16	散水養生 (28日間)	

材齢28日にてプレストレス導入, グラウト注入を実施

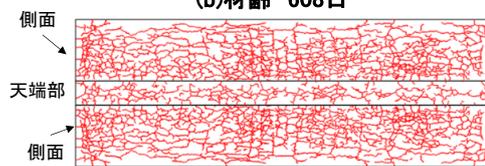
■ 実験結果



(a)材齢 266日



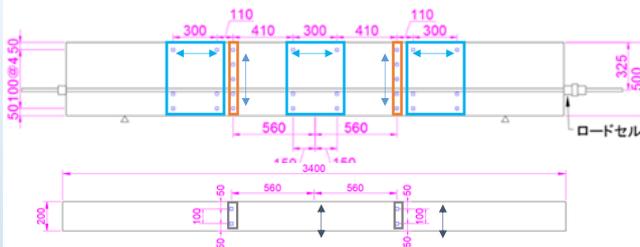
(b)材齢 608日



(c)材齢 976日(載荷試験前)

図 ひび割れ進展状況

■ 実験結果



- :コンタクトチップの測定方向(水平)
上部, PC鋼材位置, 主鉄筋位置の3つに分類
- :コンタクトチップの測定方向(鉛直)
- :コンタクトチップの測定方向(上面)

図 コンクリートひずみの測定位置

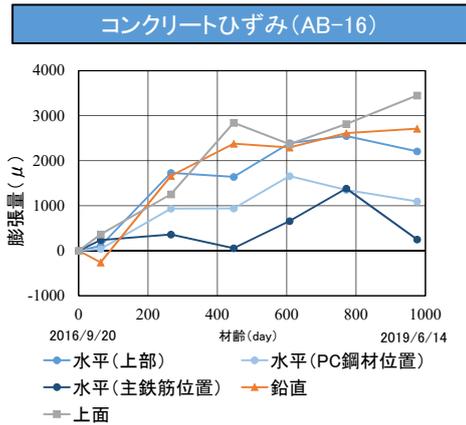


図 コンクリートひずみの膨張挙動

はり供試体の断面上部(圧縮側)は鋼材量が少ないことから、鋼材による拘束効果が小さく、上面と鉛直方向、水平(上部)の膨張量の増加が顕著になった。

■ 実験結果

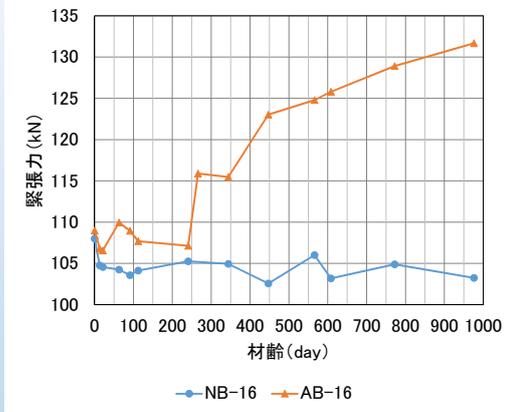


図 PC鋼材の緊張力の変化

NB-16は温度変化による緊張力の増減があるものの大きな変化は見受けられなかった。
 AB-16は温度変化の影響を受けつつ、材齢に伴って増加し続けた。
 緊張力は導入時(109kN)→材齢約1000日(132kN)⇒約20%増加

表 コンクリートの強度特性

コンクリートの強度					
名称	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)
	28日	載荷試験時 (○内は材齢)	28日	載荷試験時 (○内は材齢)	載荷試験時 (○内は材齢)
NB-16	43.8	53.4 (1137日)	37.0	38.0 (1137日)	4.6 (1137日)
AB-16	33.8	36.1 (1137日)	36.5	24.5 (1137日)	2.6 (1137日)



ロードセル

図 ロードセル設置状況

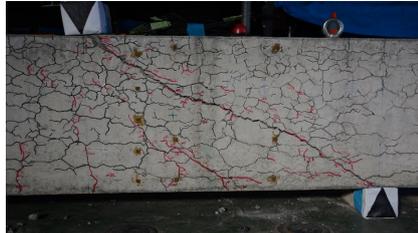
■ 実験結果

載荷点



普通供試体(破断スパン側)

載荷点



ASR供試体(破断スパン側)

載荷点



ASR供試体(健全スパン側)

図 載荷試験後のひび割れ状況

■ 実験結果

表 載荷試験結果

PRCはり供試体の載荷試験結果							
名称	最大荷重 Pu(kN)	曲げ※ 破壊荷重 計算値 Pub(kN)	せん断※ 破壊荷重 計算値 Pus(kN)	せん断耐力※ 計算値(kN)			破壊形式
				Vy	Vs	Vc	
NB-16(普通,破断スパン)	515	437	213	139.4	37.6	101.9	斜め引張
AB-16(ASR,破断スパン)	441	373	216	141.1	50.4	90.7	斜め引張
AB-16(ASR,健全スパン)	397	373	216	141.1	50.4	90.7	斜め引張

※実材料強度を用いてファイバー法により曲げ破壊荷重, コンクリート標準示方書のせん断耐力式によりせん断破壊荷重を算定.

■ 実験結果

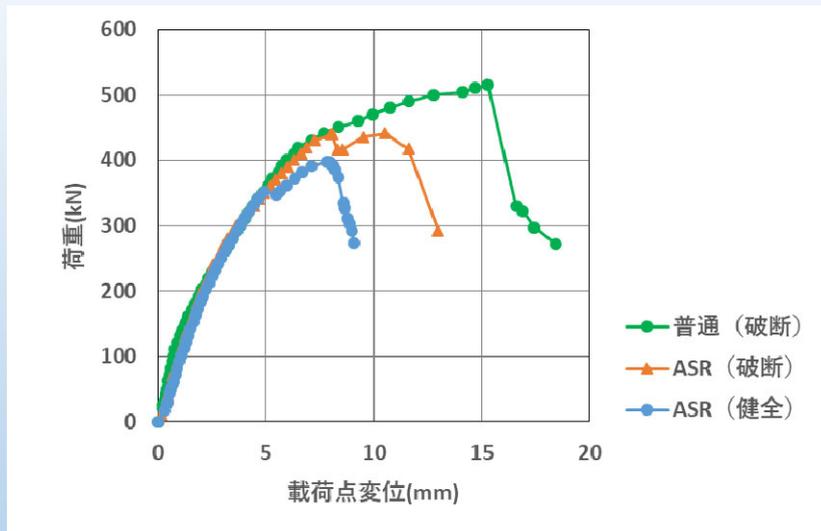


図 荷重—載荷点変位関係

■ 実験結果

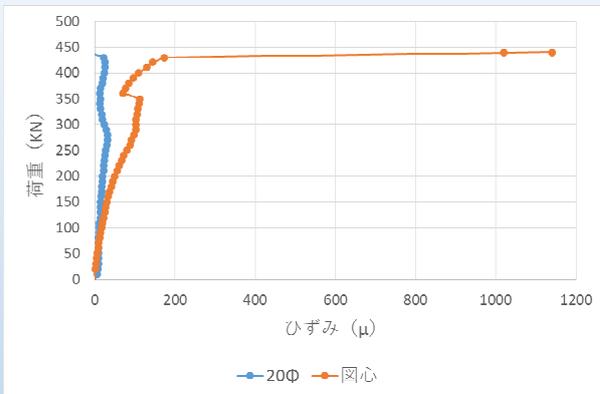
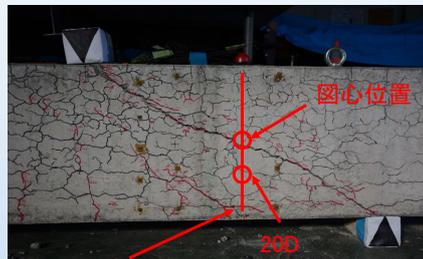


図 荷重—せん断補強筋ひずみ関係 (ASR供試体 (破断スパン側))



せん断補強筋の破断位置

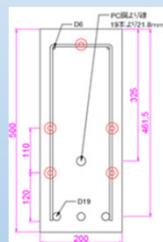


図 せん断補強筋のゲージ添付位置

■ 実験概要

採取コアのX線CT撮影によるASRひび割れ観察

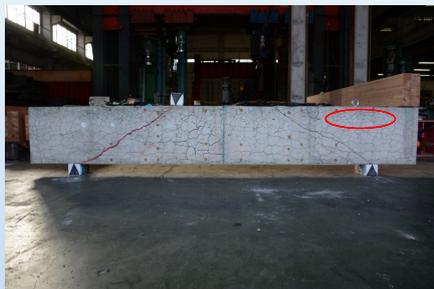


図 供試体全景



図 コア採取位置



図 コア採取状況

■ 実験概要

撮影条件

X線管の照射条件を
密閉型マイクロフォーカスX線管を使用し
電圧150kV, 電流200 μ A
フラットパネルセンサのピクセルサイズ0.127mm
画素数は1856 \times 1472pixels
1回の測定で直径100mm,高さ67mmの範囲が撮影可能

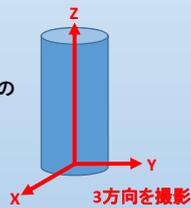
試験に用いた装置

コムスキャンテクノ製X線CT装置
(ScanXmate-D150SS270)

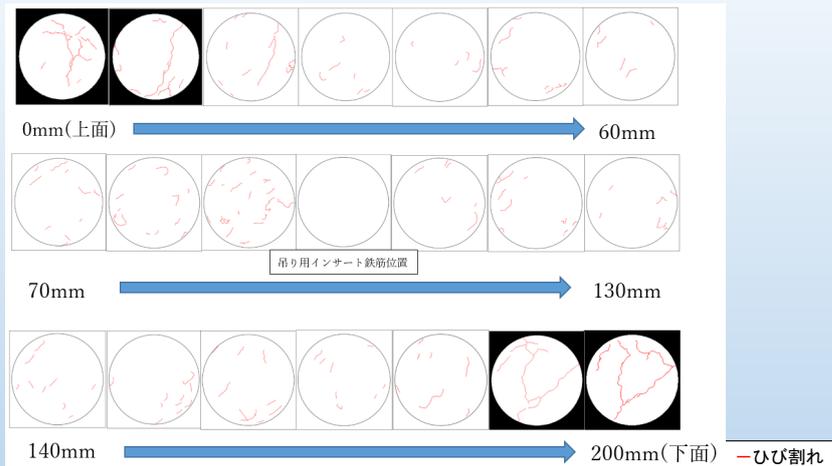


図 X線CT装置の内部

◆ 今回の撮影条件であれば、0.1mm程度のひび割れ幅が観測可能



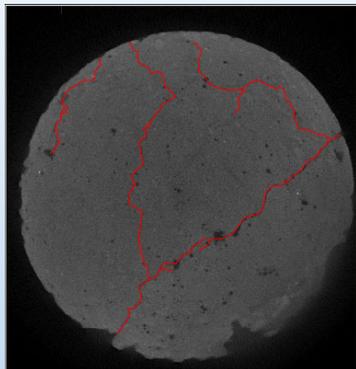
■ 実験結果



XY断面: ASR劣化により0mm(上面),200mm(下面)付近では連続しているひび割れが多く見られ、中心部では骨材の界面に沿ったひび割れが多く見られた。

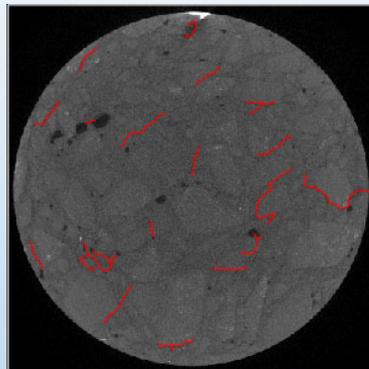
図 コアのひび割れ図

■ 実験結果



上面から200mm(下面)

かぶりコンクリートに見られる連続するひび割れ



上面から90mm

内部に見られる粗骨材の周りがあるひび割れ

図 撮影画像

■ 結論

(1) 荷重試験結果から、ASR劣化を生じたPRCはり部材において、せん断補強筋が破断していても、せん断ひび割れ発生後にせん断補強筋の図心位置(38D)のひずみが増加した。また、荷重-荷重点変位関係から、スターラップの破断スパン側の最大荷重は健全スパン側の最大荷重を上回っていた。以上のことから、せん断補強筋が破断していても、定着長さが確保されていればせん断補強筋として機能し、せん断耐力に寄与することが確認された。

(2) 採取コアのX線CT撮影の結果から、かぶりコンクリートにはASRによるひび割れが連続して発生していたが、せん断補強筋にて拘束を受けているコアコンクリートの部分では、骨材周辺や骨材の割れを伴うひび割れが生じているもののひび割れが不連続な状態であった。このことから、幅0.1mm以上のひび割れに着目すると、コアコンクリートはかぶりコンクリートと比較して、ひび割れの進展状況は軽微となると考えられる。

■ 総括

(1) ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材の曲げ耐荷特性

複合劣化を生じた場合は、ASR単独の劣化を生じた場合と比較して、鋼材腐食の影響等により損傷が局所化する場合があります、部材の曲げ耐力やじん性が低下する恐れがある。

一方、非線形有限要素解析において、コンクリートや鋼材の材料特性、コンクリートと鉄筋の付着特性、ASR膨張により生じるケミカルプレストレスを考慮することにより、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材の曲げ耐荷特性や変形性能を評価できると考えられる。

(2) ASRを生じたPRCはり部材のせん断耐荷特性

ASR劣化によりせん断補強筋が破断していても、鉄筋の定着長さが確保されていればせん断補強筋として機能し、せん断耐力に寄与することが確認された。したがって、アルカリ骨材反応対策小委員会報告書（土木学会）に示された破断位置から20φ区間の鋼材を無視して評価する考え方を裏付ける結果が得られた。

また、採取コアのX線CT撮影結果から、コアコンクリートはかぶりコンクリートと比較して、ひび割れの進展状況は軽微であることが確認された。

51

■ 今後の展望

ASR劣化の空間的ばらつきを考慮した構造性能評価手法の構築

ASRの劣化に伴う構造物の劣化の程度は、構造物に一様に生じるわけではなく、伸縮装置からの水掛かりや温度、湿度等の環境条件、構造物の形状、配筋などの構造的拘束条件によって、構造物中に空間的ばらつきを有する。ASR劣化構造物の安全性を確保する上で、構造物の劣化程度を的確に把握し、その情報を活用した上で力学性能を適切かつ定量的に評価することが、維持管理の高度化に向けて重要な課題である。

52

ご視聴頂きありがとうございました