

論文 アルカリ骨材反応が生じた鉄筋コンクリート部材の物性確認試験と部材試験

村角保行*1・細川高志*2・松本直樹*3・光木史朗*4

要旨：アルカリ骨材反応の鉄筋コンクリート部材の挙動に及ぼす影響を調べる目的で、部材試験、梁試験、耐震壁水平加力試験を実施した。その結果、主筋の拘束による膨張の抑制傾向を定量的に把握するとともに、本試験の範囲内では、梁の曲げ、せん断挙動、及び耐震壁の剛性、耐力について健全コンクリートから大幅に低下することは無く、健全コンクリート対象の既往の評価式で評価可能であることを確認した。

キーワード：アルカリ骨材反応、圧縮強度、弾性係数、耐力

1. はじめに

本検討は、アルカリ骨材反応（以下「ASR」という）による膨張やひび割れが発生している伊方発電所1号機タービン架台の地震荷重に対する安全裕度を把握する検討の一環として、ASRコンクリートの弾性係数等を推定するために行ったものである。

解析用物性値設定のためのデータ取得を目的として、ASRの発生した試験体を対象として、物性確認試験を実施した。また、ASRが梁部材および壁部材の曲げ・せん断挙動に与える影響を実験的に確認することを目的として、梁と壁の部材試験も実施した。

2. 物性確認試験

2.1 実験計画

表-1に試験体一覧を示し、表-2に試験体パラメータを示す。ASRにより膨張したコンクリートの試験体（ASRコンクリート試験体）と、膨張しないコンクリートの試験体（健全コンクリート試験体）を製作し、軸方向圧縮試験を実施した。シリンダテストピースは、直径100mm、高さ200mmの円柱形試験体である。次節に示す梁曲げ試験体と同形状、同配筋である梁部材

表-1 物性確認試験試験体一覧

試験体		試験体数			
		材齢1	材齢2	材齢3	
健全コンクリート試験体	シリンダテストピース	3体	3体	3体	
	コアサンプル	—	3体	—	
	部材試験体	無筋部材	—	3体	—
	RC-1部材	—	3体	—	
ASRコンクリート試験体	シリンダテストピース	3体	3体	3体	
	コアサンプル	3体	3体	3体	
	部材試験体	無筋部材	—	3体	—
		RC-1部材	3体	3体	3体
	RC-2部材	3体	3体	3体	

表-2 物性確認試験パラメータ

項目	パラメータ
養生条件	①現場湿潤養生 養生マット、シートによる現場湿潤養生 ②促進養生 温度40℃、湿度100%の養生室で養生
材齢	ASRコンクリートの膨張量に応じ3材齢 ①材齢1（膨張量目安：RC-1試験体1000μ） ②材齢2（膨張量目安：RC-1試験体1500μ） ③材齢3（膨張量目安：RC-2試験体1500μ）
鉄筋比	鉄筋比として以下の3種類 ①無筋 ②RC-1（主筋比：0.63%） ③RC-2（主筋比：1.27%）

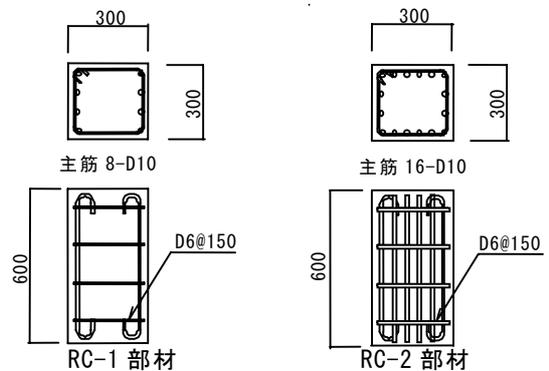


図-1 部材試験体形状

*1 大成建設(株)原子力本部原子力設計部長 工修（正会員）
 *2 四国電力(株)土木建築部建築技術グループ 副長 工修
 *3 四国電力(株)土木建築部建築技術グループ
 *4 大成建設(株)札幌支店課長 工修

表－3 コンクリートの調合

種別	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			(表乾)質量 (kg/m ³)			混和剤使用量 (kg/m ³)		アルカリ添加量 (kg/m ³)
		セメント	細骨材	粗骨材	セメント(C)	細骨材	粗骨材	P70	SP-8S	NaOH
健全	176	93	319	372	293	845	990	C×0.25%	—	—
ASR	176	93	319	372	293	845	990	—	C×2.2%	C×3%

側面より材軸直交方向に、シリンダテストピースと同形状となるコアサンプルを採取し、主筋拘束からの解放による影響について確認した。

図－1に部材試験体の形状、配筋を示す。試験体は全て同一形状の直方体で、鉄筋の有無と主筋量が異なる。打設は縦打ちとした。表－3にコンクリート調合表、表－4に鉄筋の材料試験結果を示す。ASRコンクリート試験体および健全コンクリート試験体とも、細骨材と粗骨材両方に反応性骨材（砕砂・砕石：安山岩）を使用した。実機に合わせ、水セメント比は60%として調合を策定し、ASRコンクリートにのみアルカリを添加した。鉄筋種別はSD345である。

試験体はコンクリート打設後2週間で脱型し6週間まではシートで覆って湿潤状態を保ち、現場湿潤養生とした。以降は、ASRコンクリート試験体は、ASRを促進させる目的で、温度40℃、湿度100%程度を保つ促進養生とし、健全コンクリート試験体は現場湿潤養生とした。

シリンダテストピースおよびコアサンプルは、アムスラー型試験機により圧縮試験を実施し、コンプレッソメータによりひずみを計測した。

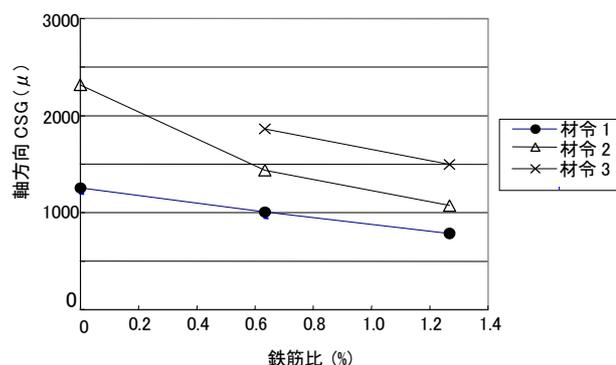
部材試験体のひずみは、試験体側面中央に貼付したワイヤストレインゲージ（WSG）により計測した。

2.2 実験結果

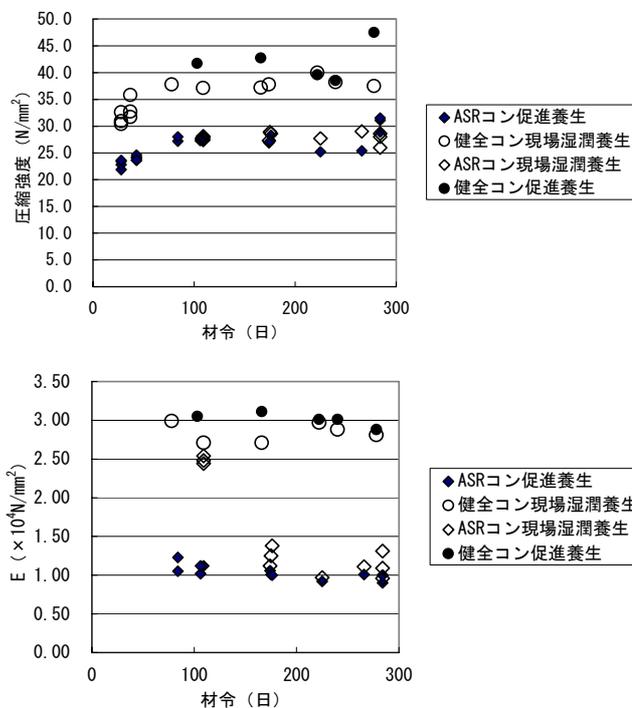
図－2に部材試験体の主筋の鉄筋比と養生時各材齢における伸び量の関係を示す。コンタクトストレインゲージ（CSG）のひずみ計測からは主筋量が多いと伸びが抑制される傾向が示されている。図－3にシリンダテストピース圧縮試験結果より求めた圧縮強度と弾性係数を示す。ASRコンクリート促進養生試験体と健全コンクリート現場湿潤養生試験体の圧縮強度と弾性係数を比較すると、常にASRコンクリート試験体の

表－4 鉄筋の材料試験結果

鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
D6	392	502	28.4	1.88
D10(部材試験体)	403	547	25.2	1.87
D10(梁・壁部材試験体)	420	562	26.4	1.90
D16	396	587	25.3	1.91



図－2 鉄筋比と伸びの関係



図－3 シリンダテストピース圧縮試験結果

ほうが小さく、特に弾性係数において差が顕著である。

促進養生試験体と現場湿潤養生試験体の圧縮強度を比較すると、健全コンクリートの場合は同程度あるいは促進養生のほうが大きいのにに対し、ASRコンクリートの場合はそれほど差が顕著でない。促進養生による強度の伸びと、ASRの伸展による強度低下が互いに逆方向に働いたためと考えられる。表-5に各材齢での健全コンクリート試験体の圧縮強度と弾性係数およびそれらのコアサンプルの値に対する比を示す。表-6にASRコンクリートの同様の値を示す。

ASRコンクリートの各部材試験体の載荷試験結果を見ると、主筋量が多いほうがコンクリートの弾性係数が大きい傾向である。養生中の伸び量は主筋量が多いほうが小さく、主筋拘束により伸びが小さくなり、ASRによる弾性係数の低減を抑制したと考えられる。この傾向は、コアサンプルとRC-1部材試験体（実機タービン架台と同程度の配筋）の比較においても同様であった。シリンダテストピース、部材試験体、コアサンプルとも、ASRコンクリートの材齢による圧縮強度、弾性係数の低減は、ほとんど生じなかった。健全コンクリート試験体のコアサンプルに対する圧縮強度、弾性係数の比はおおよそ 1 ± 0.1 の範囲内であった。圧縮強度についてはASRコンクリート試験体の場合も同様に1に近く、ASRの影響は小さかった。弾性係数については、RC-1部材試験体のコアサンプルに対する比は1.36~1.71、RC-2部材試験体の同比は1.50~2.01となっており、コアサンプルの弾性係数より主筋拘束の存在する部材としての弾性係数のほうが大きかった。コアサンプルのASRによる弾性係数の低減は部材試験体の同低減より大きく、主筋による拘束から解放されることにより低減の程度が大きくなったと推察される。

3. 梁試験

3.1 実験計画

表-7に試験体を示す。曲げ破壊先行型の曲げ試験体については、健全コンクリート試験体

表-5 健全コンクリート試験結果概要

材齢	試験体	圧縮強度		弾性係数	
		(N/mm ²)	コアサンプルに対する比	($\times 10^4$ N/mm ²)	コアサンプルに対する比
1	シリンダ	37.1	—	2.71	—
	シリンダ	37.2	0.89	2.71	0.92
2	無筋部材	39.7	0.95	2.84	0.96
	RC-1部材	35.7	0.85	3.20	1.08
	RC-2部材	—	—	—	—
	コアサンプル	42.0	1.00	2.96	1.00
	シリンダ	37.5	—	2.81	—

表-6 ASRコンクリート試験結果概要

材齢	試験体	圧縮強度		弾性係数	
		(N/mm ²)	コアサンプルに対する比	($\times 10^4$ N/mm ²)	コアサンプルに対する比
1	シリンダ	27.4	0.98	1.12	1.05
	無筋部材	—	—	—	—
	RC-1部材	30.1	1.07	1.48	1.38
	RC-2部材	28.2	1.00	1.79	1.67
	コアサンプル	28.1	1.00	1.07	1.00
2	シリンダ	26.9	0.96	1.06	0.95
	無筋部材	24.9	0.89	1.35	1.22
	RC-1部材	28.8	1.03	1.51	1.36
	RC-2部材	30.8	1.10	1.67	1.50
	コアサンプル	27.9	1.00	1.11	1.00
3	シリンダ	28.9	1.09	1.00	1.01
	無筋部材	—	—	—	—
	RC-1部材	28.9	1.09	1.69	1.71
	RC-2部材	30.9	1.16	1.99	2.01
	コアサンプル	26.6	1.00	0.99	1.00

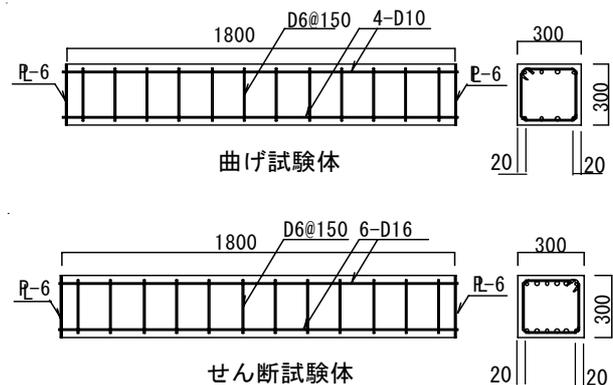


図-4 梁試験体形状

表-7 梁試験体一覧

試験体		コンクリート	主筋(片側)	プレテンションによる主筋プレストレス導入
曲げ	健全コンクリート試験体	健全コンクリート	4-D10	無
	ASRコンクリート試験体	ASRコンクリート		無
	プレストレス試験体	健全コンクリート		有
せん断	健全コンクリート試験体	健全コンクリート	6-D16	無
	ASRコンクリート試験体	ASRコンクリート		無

とASRコンクリート試験体のほかに、ASRコンクリート試験体のケミカルプレストレスの影響について検討するため、健全コンクリートで製作し、主筋のプレテンションによりプレストレスを導入した試験体も製作した。

図-4に試験体の形状寸法および配筋を示す。曲げ試験体の主筋量はRC-1部材試験体と等しい。使用材料、製作方法及び養生方法は、物性確認試験の試験体と同様である。

表-8に実験時のコンクリート材料試験結果を示す。加力は、2台のオイルジャッキにより4点曲げとなるよう単調漸増载荷した。

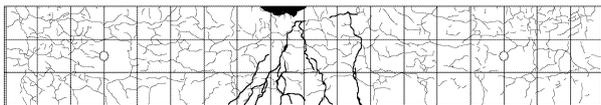
3.2 実験結果

加力試験前の、主筋に貼付したWSG計測による養生最終ひずみは、ASR曲げ試験体、プレストレス試験体、ASRせん断試験で、それぞれ1433 μ 、1547 μ 、643 μ であった。

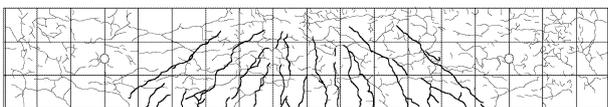
梁試験体の促進養生期間は、材齢2の部材試験体と同程度であり、主筋量の等しいRC-1部材試験体の材齢2養生最終ひずみは同程度の値となった。

表-9に試験結果一覧を示す。

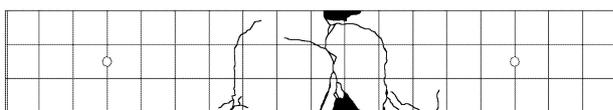
図-5に曲げ試験体のせん断力-変形（試験体中央の鉛直変位）関係を示す。耐力は3体ともほぼ等しかった。ASRコンクリート試験体の曲げひび割れ発生荷重は、健全コンクリート試験体より大きく、プレストレス試験体に近かった。ASRコンクリート試験体の剛性は、健全コンクリート試験体に比較して初期に若干低いが、荷重の上昇に伴い逆転した。図-6にせん断試験体のせん断力-変形関係を示す。最大耐力および初期剛性とも健全コンクリート試験体とASRコンクリート試験体はほぼ等しかった。



ASRコンクリート曲げ試験体



ASRコンクリートせん断試験体



プレストレス試験体

図-7 試験体の最終破壊状況

表-8 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
健全コンクリート試験体	40.0	2.97
ASRコンクリート試験体	25.2	0.92
プレストレス試験体	32.6	2.80

表-9 試験結果一覧

	曲げ試験体			せん断試験体	
	健全コン	ASRコン	プレストレス	健全コン	ASRコン
曲げひび割れせん断力(kN)	36	50	55	75	90
せん断ひび割れせん断力(kN)	-	-	-	148	190
主筋降伏せん断力(kN)	83.7	88.1	100.9	299.5	272.3
最大せん断力(kN)	113.2	105.0	106.2	369.5	381.0

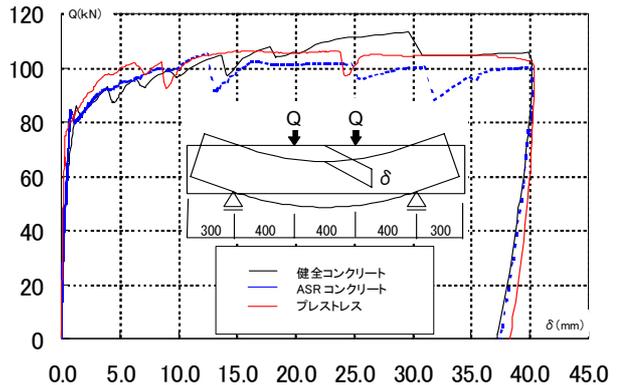


図-5 せん断力-変形関係（曲げ試験体）

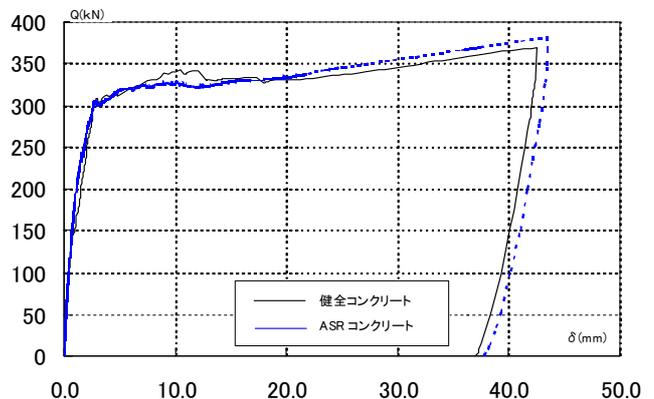


図-6 せん断力-変形関係（せん断試験体）

曲げひび割れ荷重およびせん断ひび割れ荷重は健全コンクリート試験体よりASRコンクリート試験値のほうが大きかった。図-7に試験体の最終破壊状況の例を示す。全ての試験体で下端主筋が降伏し、曲げひび割れが生じた。せん断ひび割れとせん断補強筋の降伏はせん断試験体のみが発生した。表-10に最大せん断力を示す。せん断終局強度は文献1)に示されるせん断耐力推定式（平均）を用いて算出した。曲げ試験体の試験値の計算値（終局モーメント時せん断力）に対する比は1.5程度、せん断試験体の

試験値の計算値（せん断耐力平均値）に対する比は1.5～1.9程度であった。いずれの場合も、試験値は計算値を大きく上回っていた。

表-10 最大せん断力

		曲げ試験体			せん断試験体	
		健全コン	ASRコン	プレストレス	健全コン	ASRコン
最大せん断力 (kN)	試験値	113.2	105.0	106.2	369.5	381.0
	計算値	71.9	71.9	71.9	257.1	202.2
	試験値/計算値	1.57	1.46	1.48	1.44	1.88
主筋降伏時せん断力 (kN)	試験値	83.7	88.1	100.9	299.5	272.3
	計算値	68.9	69.9	69.9	272.5	272.5
	試験値/計算値	1.2	1.26	1.44	1.10	1.00

4. 壁試験

4.1 実験計画

図-8に試験体の形状を示す。試験部分をASRコンクリートで製作した試験体と健全コンクリート各1体を製作した。

使用材料は、物性確認試験の試験体と等しい。両試験体ともI形断面の試験部分のみ先行して製作し、ASRコンクリート試験体は促進養生してASRによる伸びを発生させた。促進養生終了後、試験部分の上下の基礎スラブおよび加力スラブを通常のコンクリートで製作した。健全コンクリート試験体も同様の手順で製作した。ただし、試験部分の促進養生は行わなかった。表-11に実験時のコンクリート材料試験結果を示す。図-9に加力装置を示す。反力床上に試験体基礎スラブを固定し、オイルジャッキにより試験部分で軸応力が0.5MPaとなるよう軸力を維持した。反力壁に取付けた油圧アクチュエータ4台により試験体上部加力スラブに水平力を押し引きで与え、部材角8/1000まで漸増交番繰り返し载荷とし、それ以降は正方向に単調载荷した。

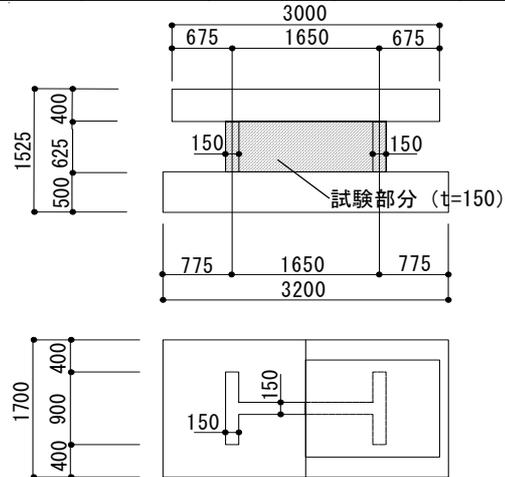


図-8 壁試験体形状

表-11 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
健全コンクリート試験体	38.2	2.88
ASRコンクリート試験体	25.5	1.01

4.2 実験結果

ウェブ縦横筋の養生最終ひずみ測定値は最大1400～1700μ程度であった。

図-10に両試験体のせん断力-水平変形関係を示す。初期剛性はASRコンクリート試験体のほうがわずかに小さかった。

ASRコンクリート試験体のほうがコンクリートの圧縮強度は小さいが、大変形時の最大耐力は健全コンクリート試験体より大きかった。

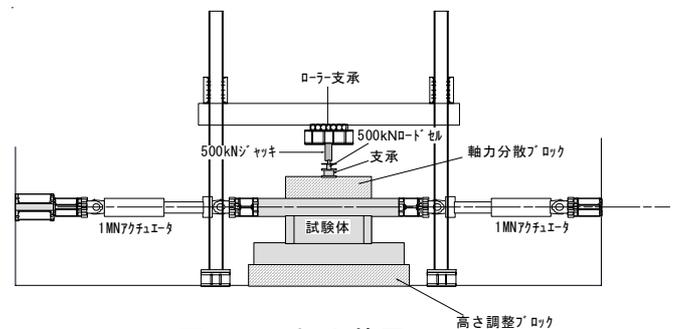


図-9 加力装置

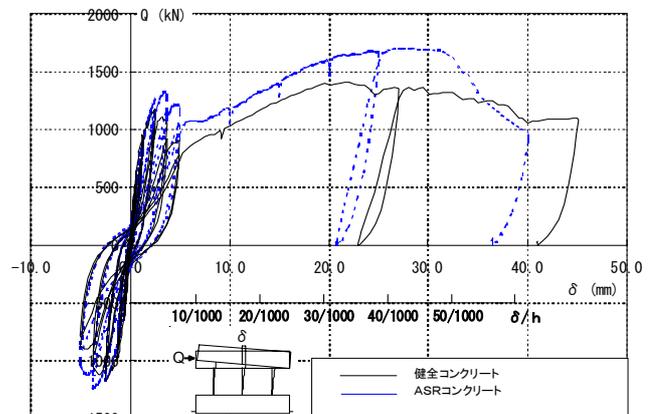


図-10 せん断力-水平変形関係

繰返し加力中においても、部材角 4/1000 以降であった。表-12 に最大せん断力を示す。計算値は文献 2) に示される復元力特性評価法に従い算出した。ASR コンクリートのほうが材料試験による圧縮強度は低かったが最大耐力は高かった。両試験体とも耐力が計算値を下回ることはなく、健全コンクリート試験体が計算値とほぼ等しかったのに対して、ASR コンクリート試験体では試験値が上回った。図-11 に最終破壊状況を示す。両試験体ともせん断ひび割れが支配的となって破壊しており、最終破壊モードに有意な差はなかった。

5. まとめ

物性確認試験および梁・壁部材試験を実施した結果、以下のような知見が得られた。

(1) ASR コンクリート部材試験結果において、主筋量が多いほうが養生中の伸び量が小さく、弾性係数が大きい傾向があった。鉄筋拘束により伸びが小さくなり、ASR による弾性係数の低下が抑制されたと考えられる。

(2) ASR コンクリートのコアサンプルと実機相当鉄筋量の部材試験体の結果を比較すると、圧縮強度の差は小さかったが、コンクリートの弾性係数は部材試験体のほうが大きかった。主筋による拘束から解放されることにより、ASR による弾性係数の低減が大きくなったと考えられる。

(3) 梁部材試験では、曲げ試験体、せん断試験体とも、最大せん断力は計算値を大きく上回り、本試験の範囲内では ASR 発生しても耐力が計算値を下回ることはなかった。また、ASR コンクリート試験体のほうがひび割れ荷重が大きかった。ASR によるケミカルプレストレスの影響と考えられる。

(4) 壁部材試験において、本試験の範囲内では、耐震壁の剛性、耐力が、ASR により大幅に低減することはなかった。また、ASR コンクリート試験体についても、健全コンクリートを対象とした JEAG 式と同様の手法で評価可能で



健全コンクリート試験体



ASR コンクリート試験体

図-11 最終破壊状況

表-12 最大せん断力

		健全コンクリート 試験体	ASRコンクリート 試験体
最大せん断力 (kN)	試験値	1409	1707
	計算値	1388	1204
	試験値/計算値	1.02	1.42

あることが確認された。

なお、本検討は四国電力株式会社により設置された「ASR 鉄筋コンクリート構造物の強度評価方法検討会」(委員長: 瀧口克己東京工業大学教授, 委員: 梶田佳寛宇都宮大学教授, 西口磯春神奈川工科大学教授) のもとで、四国電力株式会社, 三菱重工業株式会社, 大成建設株式会社が実施した検討の一部である。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 1999
- 2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版, 社団法人日本電気協会, 1991