

ASR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

光木 史朗*¹・村角 保行*¹・石井 貴和*²・高橋 英雄*¹・竹崎 真一*³

Keywords : alkali-silica reaction, compressive strength, elastic modulus, strength

アルカリ骨材反応, 圧縮強度, 弾性係数, 耐力

1. はじめに

アルカリ骨材反応（以下「ASR」という）についての既往の研究¹⁾³⁾では、ASRによる膨張と強度や弾性係数の関係が調べられ、鉄筋による膨張拘束の影響があることが示されている。

本検討は、ASR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。

実機の状況を反映した適切なモデル化や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。

表-1 物性確認試験試験体一覧
Specimens

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
Test Parameters

項目	パラメータ	対象試験体	備考
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	■シリンダテストピース	コアサンプル及びRC部材試験体:ASRコンクリートは促進養生、健全コンクリートは通常養生
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)	■シリンダテストピース ■コアサンプル ■部材試験体	健全コンクリートは材齢2で試験を実施
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%)	■部材試験体	

* 1 原子力本部原子力設計部
* 2 建築本部技術部建築技術部
* 3 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

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、梁と壁の部材試験を実施した。

2. 物性確認試験

2.1 実験計画

2.1.1 試験体

表-1に試験体一覧を、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。コアサンプルは、シリンダテストピースと同形状とし、実機と同程度の鉄筋量であるコアサンプル採取用試験体からコア抜きして、鉄筋拘束からの解放による影響について確認する。

図-1に、部材試験体の形状、配筋を示す。試験体は全て一辺300mm、高さ600mmの直方体で、鉄筋の有無と主筋量が異なる。

ASR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

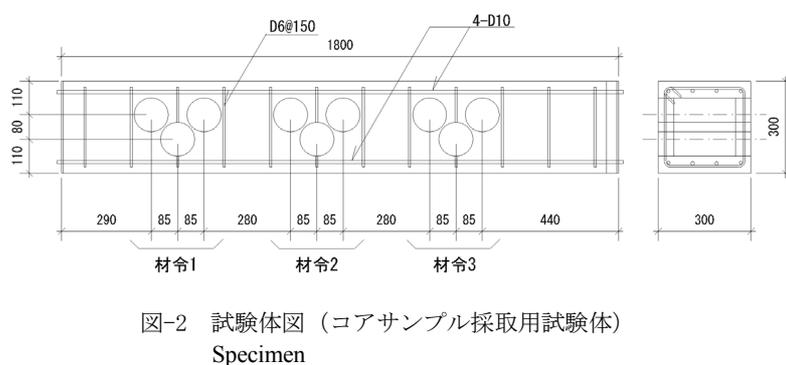
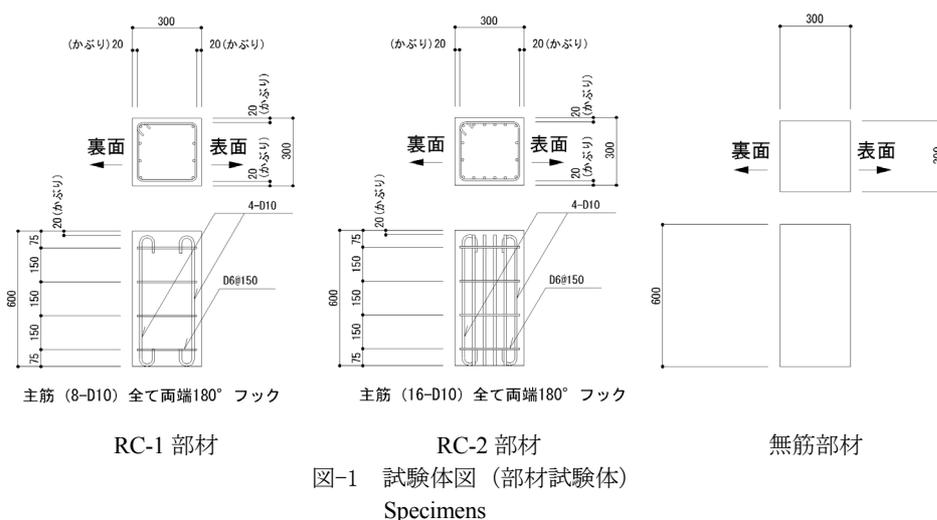


図-2 に、コアサンプル採取用試験体の形状、配筋を示す。次節に示す梁部材曲げ試験体と同形状、同配筋のコアサンプル採取用試験体から、各材齢時にコアサンプルを採取した。

2.1.2 使用材料および製作方法

表-3 にコンクリート調合表を示す。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) を使用してコンクリートを製作した。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。

表-4 に使用した鉄筋の物性値を示す。

試験体はコンクリート打設後 2 週間 で脱型した。全試験体ともコンクリート打設後 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°C、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。ただし、シリンダテストピースの一部については、ASR コンクリート試験体を現場湿潤養生、健全コンクリート試験体を促進養生とした。

表-3 コンクリートの調合
Concrete Blending

種別	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			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 (表乾)	粗骨材 (表乾)	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%

表-4 鉄筋材料試験結果
Mechanical properties of rebar

鉄筋	鉄筋種別	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (kN)	伸び (%)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
D6	SD345相当	392	502	28.4	1.88
D10 (部材試験体)	SD345	403	547	25.2	1.87
D10 (梁・壁部材試験体)	SD345	420	562	26.4	1.9
D16	SD345	396	587	25.3	1.91

2.1.3 加力方法

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。

図-3 に部材試験体の加力状況を示す。10 MN 構造試験機を用いて圧縮試験を実施した。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。

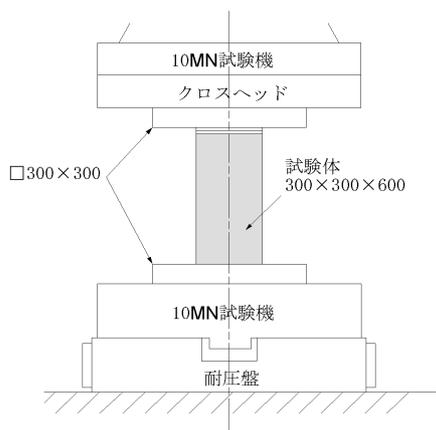


図-3 部材試験体加力状況
Test equipment

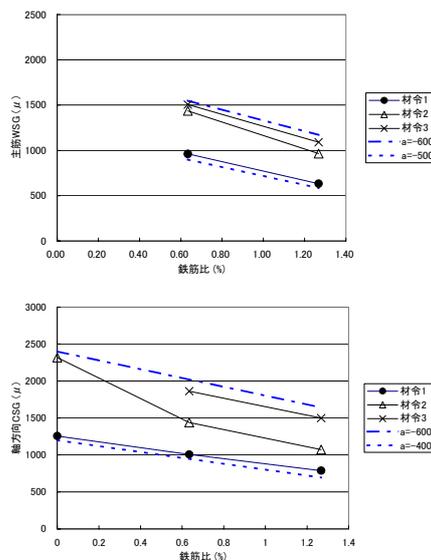


図-4 鉄筋比と伸びの関係
Axial elongation

2.2 実験結果

2.2.1 養生最終ひずみ

表-5 に各試験体の養生最終ひずみを示す。表中の「主筋」は、試験体中央高さ位置の主筋に貼付した WSG による計測値を、「表面」は試験体表面に固定した標点間の距離をコンタクトストレインゲージ(CSG)で計測することにより求めた値を示す。

表-5 養生最終ひずみ
Strain after curing

		材齢1		材齢2		材齢3	
		主筋	表面	主筋	表面	主筋	表面
シリンダ		—	2041	—	3186	—	3203
コア採取用試験体		704	623	1331	1270	1345	—
部材試験体	無筋	—	1255	—	2316	—	—
	RC-1	961	1007	1437	1439	1506	1513
	RC-2	633	787	965	1072	1091	1225

図-4 に部材試験体の主筋量と各材齢における伸び量の関係を示す。鉄筋量が多いと伸びが抑制される傾向が示されている。伸び量と鉄筋比の関係は図中の一点鎖線と破線との間にはさまれる。下式を仮定すると、一点鎖線と破線は a=400~600 に相当する傾きを示すもので、図中の関係は同範囲内にあると言える。

$$\text{伸び量}(\mu) = a \times \text{鉄筋量}(\%) + \text{無筋部材の伸び量}$$

2.2.2 圧縮強度および弾性係数

図-5 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。部材試験体と同様に ASR コンクリート試験体を促進養生、健全コンクリート試験体を現場湿潤養生した他に、逆の条件で養生した試験体の結果も図に示されている。

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ほうが小さく、特

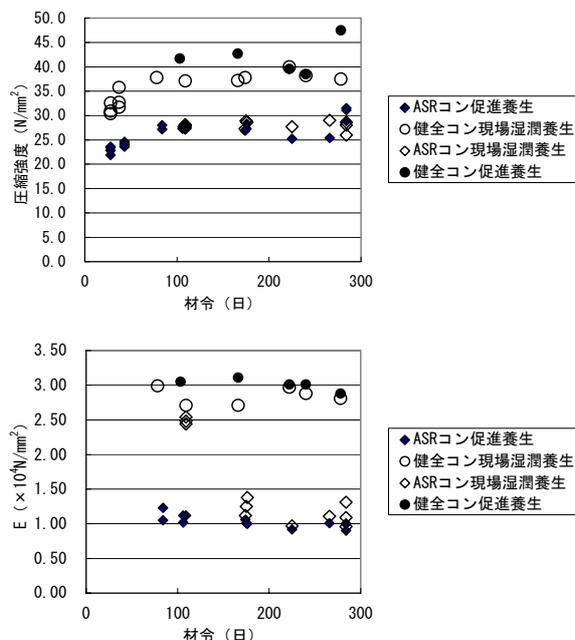


図-5 シリンダテストピース圧縮試験結果
Compressive test results

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ものに対し、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。

促進養生試験体と現場湿潤養生試験体の弾性係数を比較すると、健全コンクリートの場合は材齢 200 日程度までは促進養生のほうが大きい、それ以降は差が小さくなった。ASR コンクリートの場合は現場湿潤養生のほうが若干大きく、促進させた効果よりも ASR の影響のほうが大きく出たと考えられる。

表-6 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-7 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結果を見ると、鉄筋量が多いほうが弾性係数が大きい傾向である。養生中の伸び量は鉄筋量が多いほうが小さく、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鉄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、鉄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。

表-6 健全コンクリート試験結果概要

Test results

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	—
	無筋部材	—	—	—	—
2	シリンダ	37.2	0.89	2.71	0.92
	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
3	シリンダ	37.5	—	2.81	—

表-7 ASR コンクリート試験結果概要

Test results

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

3. 梁部材試験

3.1 実験計画

3.1.1 試験体

表-8 に試験体を示す。曲げ破壊先行型の梁曲げ試験体については、健全コンクリート試験体と 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、プレストレス試験体を製作した。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。せん断試験体は、健全コンクリート試験体と ASR コンクリート試験体の 2 体である。

図-6 に試験体の形状寸法および配筋を示す。曲げ試験体の鉄筋量は RC-1 部材試験体と等しい。せん断試験体の主筋量は曲げ試験体の約 4 倍である。

表-8 梁部材試験体一覧

Specimens

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

3.1.2 使用材料および製作方法

使用材料および製作方法は、物性確認試験の試験体と等しい。コンクリート調合は表-3、鉄筋の機械的性質は表-4 に示すとおりである。ASR コンクリート試験体は促進養生、健全コンクリート試験体は現場湿潤養生した。

表-9 に実験時のコンクリート材料試験結果を示す。

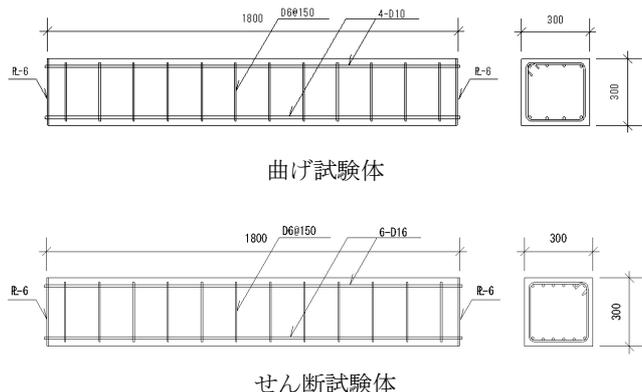


図-6 試験体図 (梁部材試験体)
Specimens

表-9 コンクリート材料試験結果
Material properties of concrete

	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	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

3.1.3 加力方法

図-7 に加力装置を示す。試験機クロスヘッドにより反力を取り、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。支持点は 4 点ともピン・ローラーとし、試験体をできるだけ拘束しないようにした。

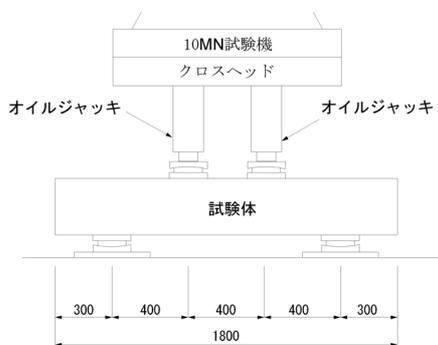


図-7 加力装置
Test equipment

3.2 実験結果

3.2.1 養生最終ひずみ

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下記のとおりであった。

- ASR 曲げ試験体 1433 μ
- プレストレス試験体 1547 μ
- ASR せん断試験体 643 μ

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、鉄筋量の等しい 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。

3.2.2 荷重-変形関係および破壊性状

表-10 に試験結果一覧を示す。

図-8 に曲げ試験体 (健全コンクリート曲げ試験体、ASR コンクリート曲げ試験体、プレストレス試験体) 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、荷重の上昇に伴い逆転した。

図-9 にせん断試験体 (健全コンクリートせん断試験体、ASR コンクリートせん断試験体) 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互いにほぼ等しかった。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 コンクリート試験体のほうが大きかった。

表-10 試験結果一覧
Test results

	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
初期剛性 (kN/mm)	330	165	343	387	264
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

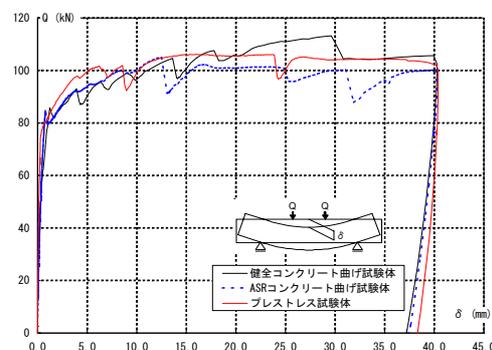


図-8 せん断力-変形関係 (曲げ試験体)
Shear load

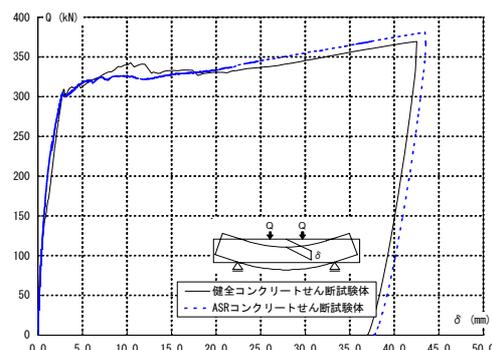


図-9 せん断力-変形関係 (せん断試験体)
Shear load

図-10 に各試験体の最終破壊状況を示す。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に発生した。

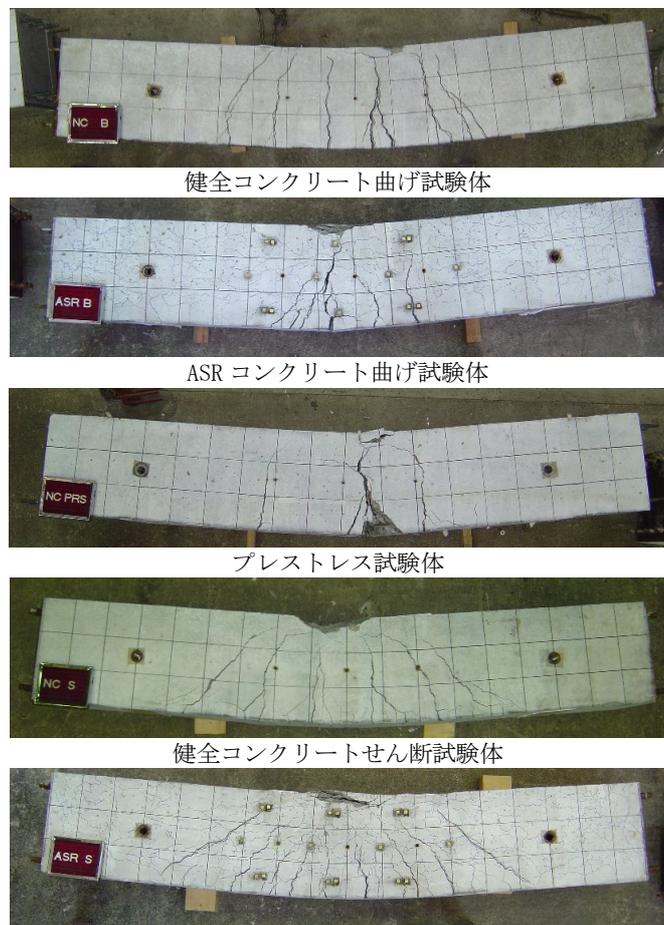


図-10 最終破壊状況
Final failure pattern

3.2.3 最大荷重

表-11 に最大せん断力を示す。終局モーメントは下式により、せん断終局強度は文献 4) に示されるせん断耐力推定式 (平均) を用いて算出した。

$$M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y$$

M_u : 終局モーメント

a_t : 引張鉄筋断面積

σ_y : 引張鉄筋降伏強度

曲げ試験体の計算値 (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。曲げ試験体、せん断試験体とも、試験値は計算値を大きく上回っており、ASR が発生しても計算値を下回ることにはなかった。

表-11 最大せん断力

Maximum shear load

		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
	計算値	終局モーメント時のせん断力			せん断終局強度平均値	

4. 壁部材試験

4.1 実験計画

4.1.1 試験体

図-11 に試験体の形状を、図-12 に試験部分の配筋を示す。試験体数は 2 体で、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で製作したもの各 1 体である。

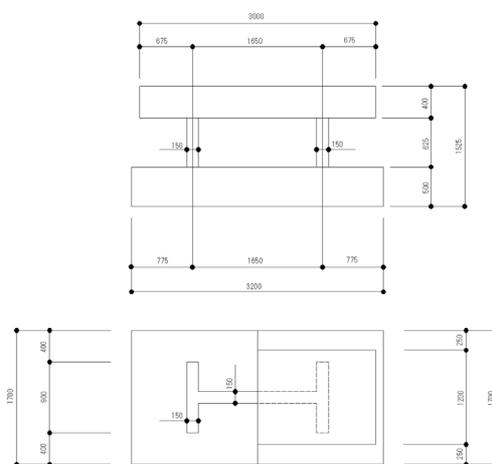


図-11 試験体形状
Specimen

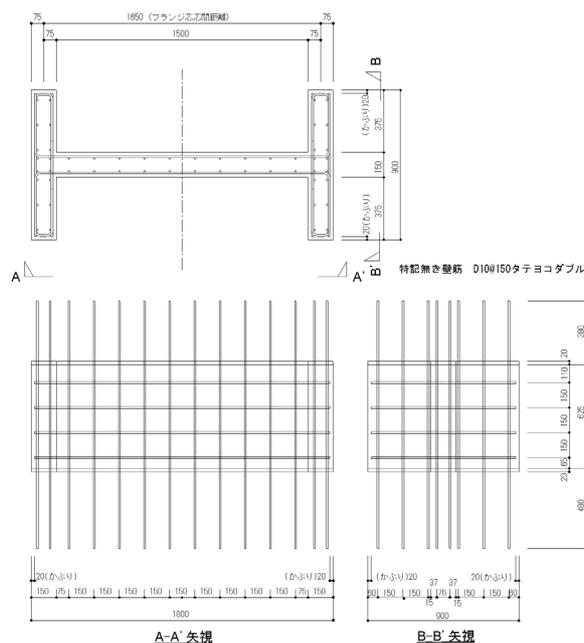


図-12 試験部分配筋
Rebar arrangement

4.1.2 使用材料および製作方法

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レディミクスト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-12 に実験時のコンクリート材料試験結果を示す。

表-12 コンクリート材料試験結果
Material properties of concrete

	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

3.1.3 加力方法

図-13 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 0.5 MPa 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与えた。水平力は押し荷重と引き荷重の組合わせとし、両者の比は 1:1 とした。

図-14 に水平力加力サイクルを示す。加力サイクル数は 12 回で、それ以降は正方向に単調载荷した。

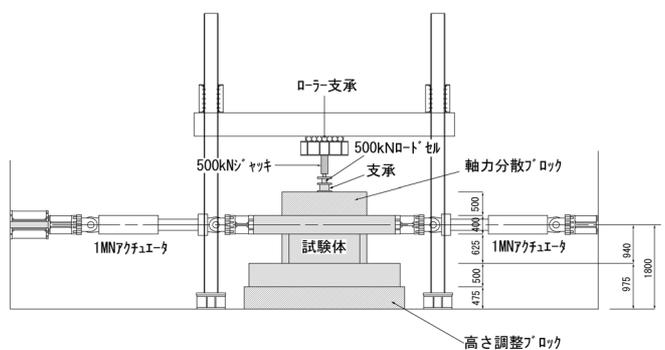


図-13 加力装置
Test Equipment

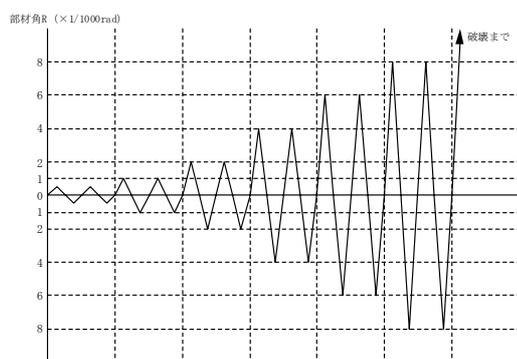


図-14 水平力加力サイクル
Horizontal loading pattern

4.2 実験結果

4.2.1 養生最終ひずみ

ASR コンクリート試験体の主筋に貼付した WSG は、促進養生中の高温多湿である過酷な環境により多くが測定不能となった。ウェブ縦横筋の得られた測定値は最大 1400~1700 μ 程度であった。

4.2.2 荷重-変形関係および破壊性状

図-15 に両試験体のせん断力-水平変形関係を、図-16 に同関係の水平力繰返し加力部分の包絡線を示す。

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。

両試験体とも部材角 8/1000 サイクルまでの繰返し中にピークせん断力が低下したが、それ以降徐々にせん断力が大きくなり、水平変位 40 mm にかけて再度低下した。通常の試験体とは異なり試験部分を先行して製作したことにより、基礎スラブとの一体性が通常よりも低いため、すべりが生じて一旦耐力が下がったと推察される。

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。繰返し加力中においても、部材角 4/1000 程度以降では ASR コンクリート試験体のほうが耐力が高かった。

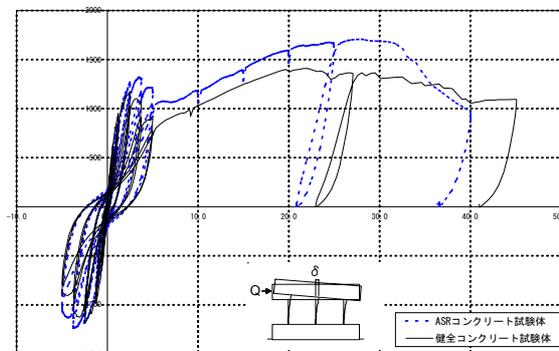


図-15 せん断力-水平変形関係
Shear load

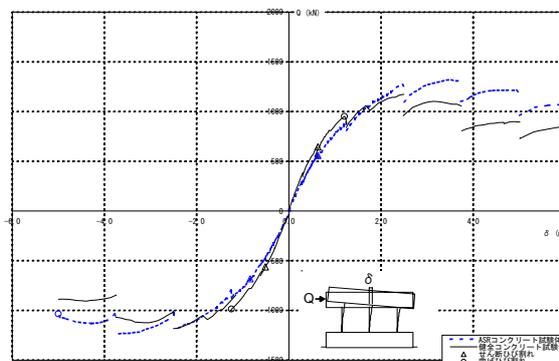


図-16 せん断力-水平変形関係 (包絡線)
Shear load, envelope curve

図-17 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。



健全コンクリート試験体



ASR コンクリート試験体

図-17 最終破壊状況
Final failure pattern

4.2.3 最大荷重

表-13 に最大せん断力を示す。最大せん断力計算値は文献5)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の試験値は計算値の1.4倍以上であった。

表-13 最大せん断力
Maximum shear load

		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

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。

【物性確認試験】

- ASR コンクリート部材試験結果において、鉄筋量が

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。

- 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、弾性係数は部材試験体のほうが大きかった。鉄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。

【梁部材試験】

- 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にはなかった。
- 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。

【壁部材試験】

- 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にはなかった。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あることが確認された。
- 本試験の膨張量では、ASR によるケミカルプレストレスが耐震壁の剛性、耐力上昇の方向に作用することもありうることを推定された。

なお、本検討は四国電力株式会社殿により設置された「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：榊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、四国電力株式会社殿、三菱重工業株式会社殿、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

- 小柳治, 内田裕市等: 低鉄筋比のRC部材におけるASRの膨張拘束に関する研究, セメント・コンクリート論文集, NO.52, pp.786-791, 1998.
- 棚橋和夫, 岩永武士等: ASRによって劣化したRCはりおよび柱の力学挙動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.843-848, 1996.
- 矢村潔, 長井吾朗等: ASRによる損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究, 材料, Vol.43, No.491, pp.970-975, 1994.
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 1999.
- 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.