

論文 アルカリ骨材反応が生じたタービン発電機架台の強度評価に用いる物性の検討

関本 恒^{*1}・清水 弘^{*1}・渡部 雄一^{*2}・石川 達也^{*3}

要旨：アルカリ骨材反応(ASR)を起こした構造物から採取したコアサンプルの物性値(圧縮強度，弾性係数)は健全なコンクリートに比べて大きく低下することが知られている。一方，実構造物の試験等により求まる ASR を起こした鉄筋コンクリート部材の剛性および耐力は健全な部材に比べて遜色ないことも報告されている。これらの特性差は，ASR によるケミカルプレストレス効果が大きく係わっているものと考えられるが，その定量的な検討を行った例は少ない。本報告では，鉄筋比をパラメータとして，文献調査，実構造物試験およびモデル試験を行い，ASR を起こしたコンクリート構造物の物性値を定量的に把握した。

キーワード：アルカリ骨材反応，タービン発電機架台，コンクリート物性，鉄筋比

1. 概要

鉄筋コンクリート構造物の特性を評価するための構造解析に際しては，鉄筋およびコンクリートの物性を入力することになるが，コンクリートの物性には構造物から採取したコアサンプルの値を用いるのが一般的であると考えられる。

従って，アルカリ骨材反応(ASR)を起こした構造物の解析を行う場合にも，同様にコアサンプルを用いてコンクリートの物性を定めるのが妥当と考えられるが，このコアサンプルから得られた物性値は健全なコンクリートに比べて，強度および弾性係数が大きく低下することが知られている。^{1), 2)}

ところが上記のような低下があるにも拘わらず，既往の研究等によると，ASR を起こした構造物の剛性および耐力は鉄筋の拘束によるケミカルプレストレス効果により，健全な部材に比べて遜色無いことも報告されているため，ASR を起こした構造物の耐力を解析で評価する場合には，コアサンプルから得られたものではなく，ケミカルプレストレスを加味した ASR を起こした構造物の物性を適切に考慮する必要がある。

このような ASR を起こした構造物の物性の評

価に関しては，鉄筋量，ASR による膨張量をパラメータとしてその傾向の検討を行っている例はあるものの，構造解析の物性設定を目的に定量的な評価を行った論文は少ない。

本報告では，ASR 構造物の構造解析に用いるコンクリート物性を定めることを目的として，ASR によるケミカルプレストレス効果，即ち，鉄筋による拘束効果に着目し，鉄筋比をパラメータとした ASR のコンクリート物性を，文献調査，実機試験およびモデル試験を通じて定量的に検討した。

なお，検討結果は，別途報告の ASR が生じた伊方発電所 1 号機タービン発電機架台(TG 架台)の構造解析に用いた。

2. 調査分析方法

鉄筋で拘束された ASR を起こしたコンクリートの物性低下率(健全コンクリートに対する ASR を起こしたコンクリートの圧縮強度比および弾性係数比)の調査・分析には，表-1 に示す 5 通りの方法(文献調査，モデル試験，実構造物試験・・・振動試験，弾性波速度測定試験，採取コア試験)を用いた。

*1 三菱重工業(株) 高砂研究所(正会員)

*2 四国電力(株) 土木建築部

*3 四国電力(株) 原子力部

表-1 調査分析方法

項目	調査分析方法	取得するデータ	
文献調査	既往文献 ^{(3),(4),(5)} から、鉄筋で拘束されたASRを起こしたコンクリートの圧縮試験結果について、全体荷重変位関係より鉄筋負担分を差し引くことにより、コンクリートの応力ひずみ関係を求め、これより鉄筋比をパラメータとした物性比を算出した。	圧縮強度比 弾性係数比	
モデル試験	ASR を起こさせた試験体を用いて圧縮試験を行い、上記と同様の処理から、鉄筋比をパラメータとした物性値を算出した。またここでは、シダ成型試験体、採取コア試験体の圧縮試験を行い、物性を対比した。	圧縮強度比 弾性係数比	
実構造物試験	振動試験	健全な実構造物およびASRが生じた実構造物について、振動試験(起振機試験、常時微動測定試験)を行い、固有振動数および振動モードの同定解析から実構造物の弾性係数を推定した。	弾性係数比
	弾性波速度測定試験	健全な実構造物およびASRが生じた実構造物について、弾性波速度測定試験(検層法、透過法)を行い、弾性波速度より弾性係数を求めた。	弾性係数比
	採取コア試験	健全な実構造物およびASRが生じた実構造物について、採取コアサンプルによる圧縮試験を行い、物性を対比した。	圧縮強度比 弾性係数比

3. 調査分析結果

3.1 文献調査

ここでは、文献3)、4)および5)に示すモデル試験結果から得られた物性について、鉄筋比をパラメータとした物性低減率について評価を行った。文献で述べられている試験体形状を図-1に示す。

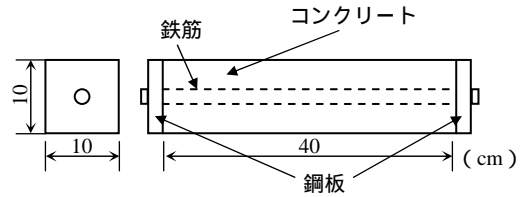


図-1 試験体形状

なお、圧縮試験に基づくASRを起こしたコンクリート物性値の算出方法は下記の手順で実施した。(図2)

- ASRに関する部材圧縮試験の代表データ(荷重-変位曲線)を抽出する。
 - 試験体のコンクリートと鉄筋をそれぞれ非線形並列ばねにモデル化し、一軸圧縮下の解析を実施し、圧縮試験データと整合するコンクリート物性値を算出する。
- 具体的には、全荷重データから材料特性が明確な鉄筋負担力を差し引き、残りをコンクリート負担分と考え、コンクリートの応力ひずみ関係を推定する。

- b)の解析を、試験体の鉄筋比毎に健全コンクリート部材とASRコンクリート部材について実施し、算出した健全コンクリート物性値に対するASRコンクリート物性値の比を求める。

$$= \text{試験 } E_A / \text{試験 } E_N$$

(添字 A は ASR 部材, N は健全部材)

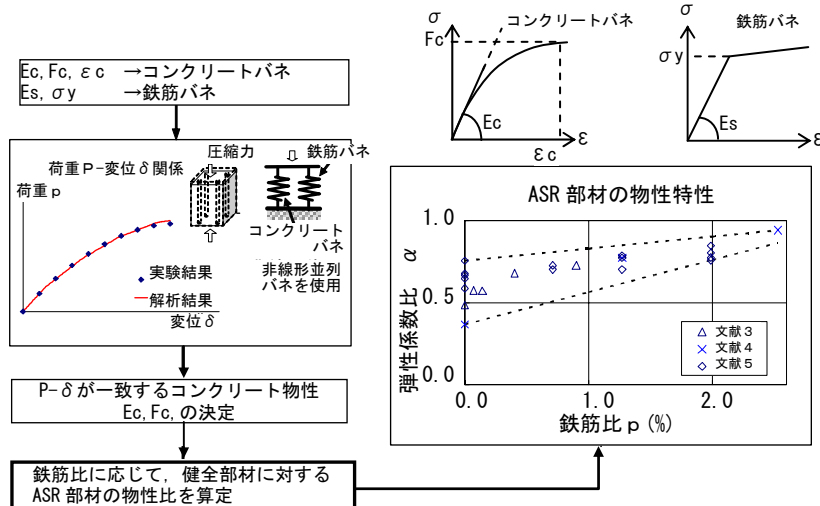


図-2 コンクリート物性算出方法

得られた結果として、健全なコンクリートの物性値で基準化した各 ASR 試験体の物性値(物性比)を表-2に示す。今回の試験体の鉄筋比は文献3)では0~0.90%、文献4)では0~2.53%、文献5)では0~1.99%である。

同表に示す通り、無筋試験体も含め各試験体の物性比をみると、鉄筋比が大きいほど弾性係数比・圧縮強度比は上昇し、健全な物性値に近づくことがわかる。

表-2 各試験体の物性比

文献	試験体名	鉄筋比 (%)	弾性係数 Ec	圧縮強度 Fc
文献3)	C00	0	0.486	0.636
	C07	0.07	0.575	0.794
	C14	0.14	0.573	0.834
	C40	0.40	0.679	0.926
	C90	0.90	0.727	1.013
文献4)	C1	0	0.368	0.579
	C4	1.27	0.774	0.882
	C6	2.53	0.942	1.002
文献5)	C000	0	0.618	0.776
	C071	0.71	0.716	0.985
	C127	1.27	0.738	0.970
	C199	1.99	0.827	1.003

3.2 モデル試験

ここでは、RC 部材試験体、無筋部材試験体、梁状試験体からのコア試験体およびこれらの各試験体打設時に成型したシリンダ試験体の試験を実施し、それらの物性について評価を行った。

このうち、RC 部材は鉄筋比 0.63%の直方試験体、無筋部材は RC 部材と同じ大きさの直方試験体、コア試験体は RC 部材試験体と同じ鉄筋比の試験体からサンプリングしたもの(直径 10cm)、シリンダ試験体はコンクリート打設時に成型したもの(直径 10cm)を用い、いずれも健全試験体と ASR を起こした試験体との比較を行った。

部材試験体の寸法を図-3に、圧縮試験概略を図-4に示す。

得られた結果を表-3に示す。

鉄筋で拘束された RC 部材試験から算出した物性比は、圧縮強度比 0.82、弾性係数比 0.49 である。無筋部材、コアおよびシリンダなど無筋試験体の圧縮強度比(0.63~0.76)、弾性係数比(0.36~0.45)と比べて若干高い値となる。

3.3 実構造物 TG 架台振動試験

ここでは、実構造物の振動試験およびそのシミュレーション解析から得られた物性について、評価を行った。

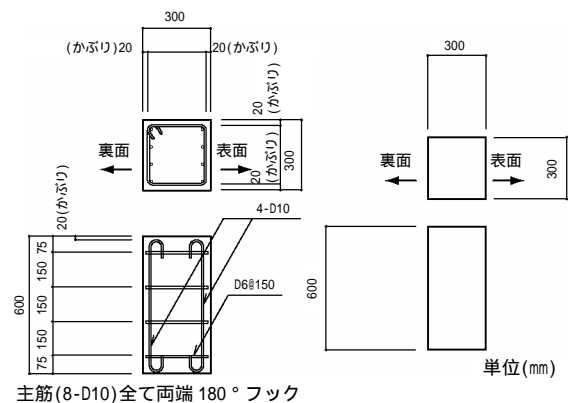


図-3 部材試験体の形状寸法及び配筋図

表-3 物性確認試験による物性比

物性		圧縮強度比				静弾性係数比			
材齢(日)	膨張量(μ)	RC 部材	無筋部材	コア	シリンダ	RC 部材	無筋部材	コア	シリンダ
	1000	0.84	-	0.67	0.74	0.46	-	0.36	0.40
	1500	0.81	0.63	0.66	0.74	0.47	0.45	0.37	0.38
	1500 以上	0.81	-	0.63	0.81	0.53	-	0.33	0.34
平均		0.82	0.63	0.65	0.76	0.49	0.45	0.36	0.37

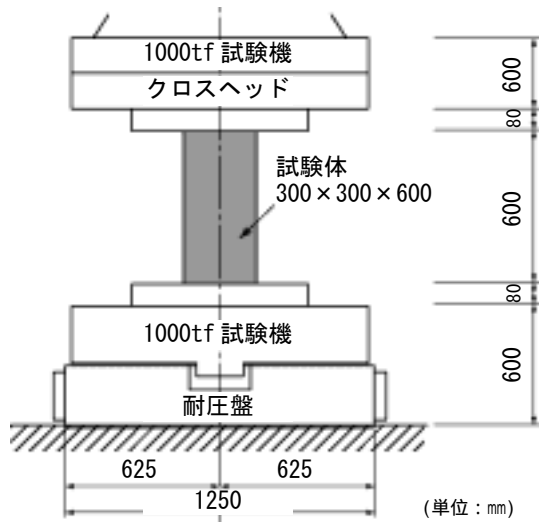


図-4 圧縮試験概略図

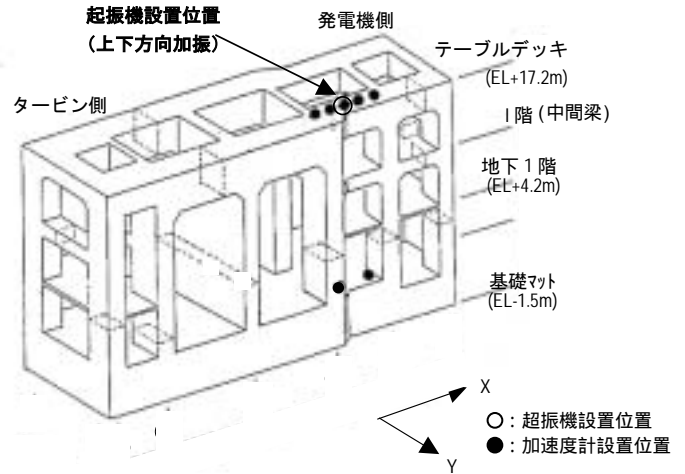


図-5 起振機設置位置，振動測定位置の一例

振動試験は，図-5に示すTG架台について，以下に示す2種類の試験を実施した。

- ・起振機による梁の上下方向加振試験
梁部材レベルの上下方向固有振動数および振動モードを把握する。図-5に，起振機及び加速度計設置位置の代表例を示す。
- ・架台の常時微動測定試験
架台全体の水平方向，ロッキングの固有振動数および振動モードを把握する。そのため，柱梁接合部に加速度計を取りつけた。

両試験で測定されたTG架台の振動特性は，ASRが顕著なテーブルデッキ部と健全と考えられる柱・中間梁部の弾性係数の影響を受けていることから，

- ・物性比を仮定する方法(0.5と0.8の2種類)
- ・健全なコンクリートの弾性係数を仮定する方法(2号機弾性係数の0.9倍)

の2通りの方法で同定解析を実施した。各同定解析から推定した弾性係数比を表-4に示す。ASRが生じたTG架台の弾性係数は，健全なTG架台の0.5~0.6程度となる。

3.4 弾性波速度測定試験

ここでは，実構造物の弾性波速度測定試験から得られた物性について，評価を行った。

弾性波速度測定試験では，図-6および7に示す検層法および透過法の2種類を実施した。

表-4 振動試験による物性比

試験	梁加振試験	常時微動試験
弾性係数比	0.53	0.58
鉄筋比%	0.98	0.82

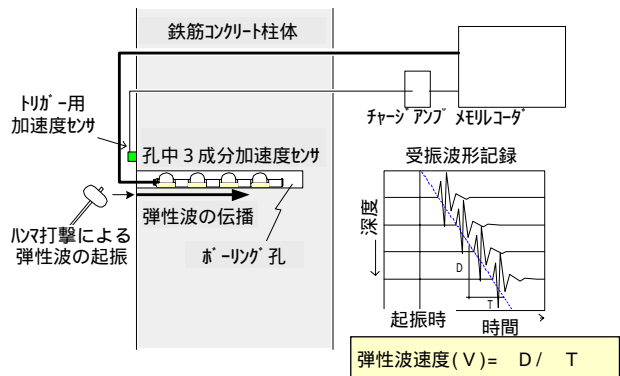


図-6 検層法による弾性波速度測定概念図

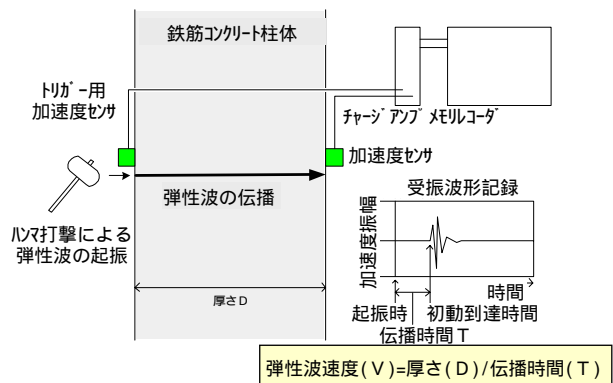


図-7 透過法による弾性波速度測定概念図

表－5 弾性波速度測定による物性比

測定法	検層法	透過法
弾性係数比	0.75	0.69
鉄筋比%	0.82	0.82

試験で得られた弾性係数比を表－5に示す。

弾性係数比は、健全な部位の弾性係数(柱計測点の平均値)に対するテーブルデッキ部弾性係数の比で評価した。その結果、ASR が生じたテーブルデッキ部の弾性係数は、健全な部位の0.7程度となる。

3.5 実構造物採取コアによる調査

ここでは、実構造物コアサンプル試験から得られた物性について、評価を行った。

この試験では、図－8に示す12箇所から採取したコアの一軸圧縮強度および静弾性係数を測定した。

テーブルデッキ部の平均物性値をASRコンクリートの物性値とし、柱部の平均物性値を健全部コンクリートの物性値として物性比を求めた。

得られた物性比を表－6に示す。ASRが発生した採取コアの弾性係数は健全な採取コアの0.7程度となる。ASRが生じた採取コアの圧縮強度は健全な採取コアの0.95となる。

4. 評価

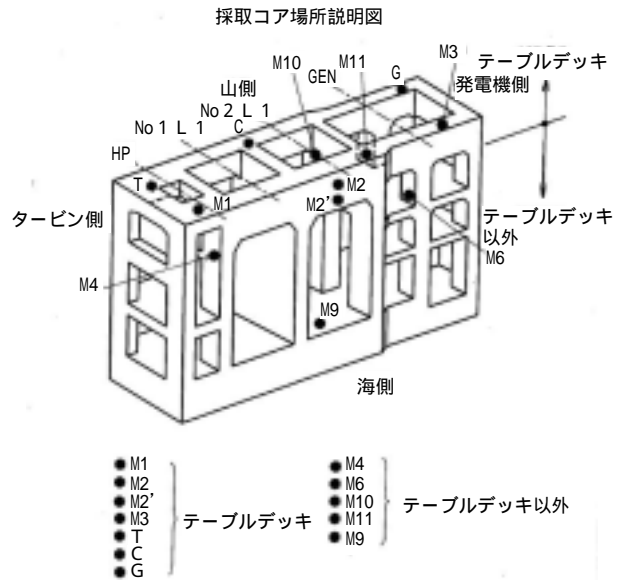
3章で得られた圧縮強度比を図－9に、弾性係数比を図－10に示す。

ここでは、文献調査で得られた物性比の分布傾向に基づき、モデル試験および実構造物試験結果による物性比を総合的に検討した。

その結果、以下のことが分かった。

- 圧縮強度比および弾性係数比とも鉄筋比が小さいとASRを起こしたものは健全なもの比べて小さいが、鉄筋比が大きくなると健全な物性値に近づく傾向がある。
- 圧縮強度比は、鉄筋が無い場合0.58～0.82の範囲にあり、鉄筋比0.7%程度で0.8～1.0となり、以降頭打ちとなる。

- 弾性係数比は、文献調査で得られた物性比の上限・下限の間に分布しており、鉄筋が無い場合0.37～0.76の範囲にあり、鉄筋比1.0%程度で0.56～0.83となり、以降も漸増する。



採取箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	採取箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
M1	24.7	14600	M9	40.4	30000
M2	27.0	15800	M10	31.7	24100
M2'	23.4	14600	M11	29.8	25900
M3	33.5	13200	T	33.6	24600
M4	30.4	23700	C	30.0	19200
M6	29.8	26000	G	29.5	15200

図－8 コア採取箇所と試験結果

表－6 実機 TG 架台の採取コアによる物性比

物性	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
ASR 部平均値	28.8	1.67
健全部平均値	30.4	2.49
物性比	0.95	0.67
鉄筋比%	0.82	0.82

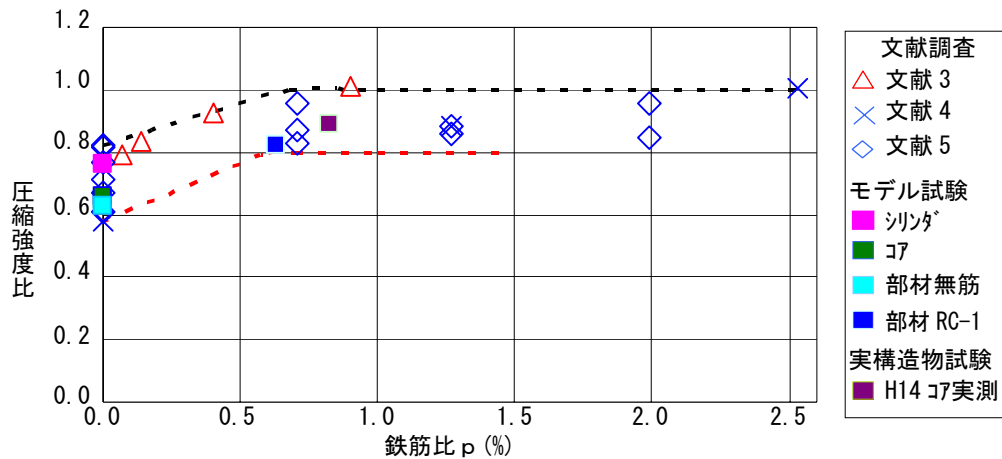


図-9 鉄筋比とコンクリートの圧縮強度比

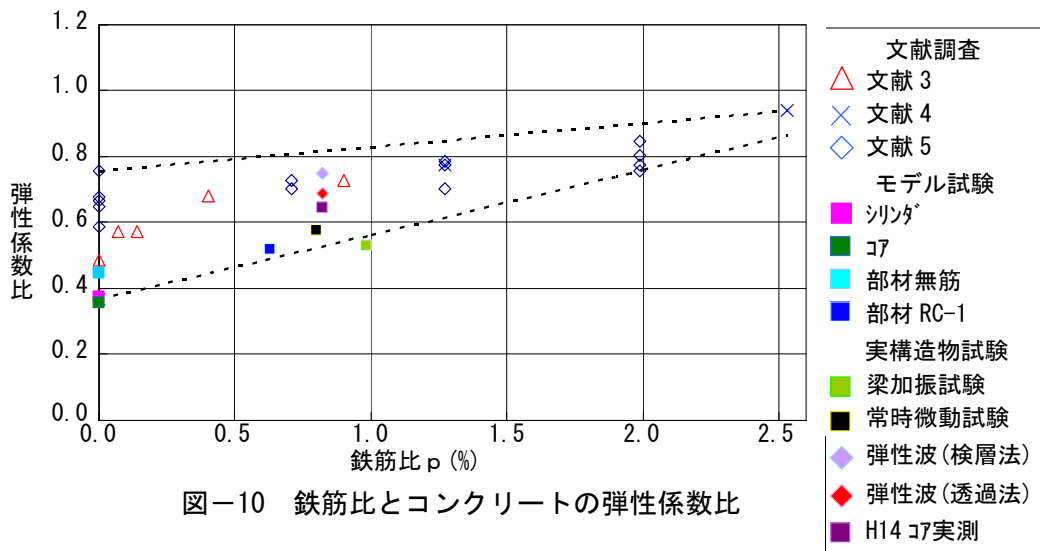


図-10 鉄筋比とコンクリートの弾性係数比

5. まとめ

ASR を起こした鉄筋コンクリート構造物の物性を、文献調査、モデル試験および実構造物試験を通じて、調査した。

その結果、圧縮強度および弾性係数について、ASR が生じた構造物の構造解析に使用する定数を同定することが出来た。

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) 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，P.70～78，1986
- 2) 小林一輔ほか：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 2 アルカリ骨材反応の診断，森北出版，P.42～44，1991
- 3) 小柳治ほか：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，P.786～791，1998
- 4) 棚橋和夫ほか：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学的挙動について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，P.843～848，1996
- 5) 矢村潔ほか：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，P.970～975，1994