

論文

[1019] 稼動中の内燃力発電所の振動がコンクリート打設に与える影響について

木佐木上 (九州電力長崎支店)

塩田 陸 (九州電力本店)

正会員 ○ 船本憲治 (九州電力本店)

牛島初信 (九州電力長崎支店)

1. まえがき

九州には数多くの離島が点在し、当社は全国の離島発電設備のうち、その約65%を占め、当社だけで40箇所225,284kWの内燃力発電所をかかえている。最近、民生用電力需要の増加に伴い、内燃力発電所においても増設工事が最近よく行なわれ、稼動中の内燃力発電所の振動が増設部コンクリート打設に与える影響が懸念されるようになってきた。

しかし、養生中のコンクリートに長期間にわたって継続して振動が加わった場合の影響についての研究は、これまで実験例が少なく、設計及び施工法の決定にあたって、参考となるデータがきわめて少ないのが現状である。

そこで、既設のA内燃力発電所の1号機建屋(出力10,000kW)に隣接した2号機建屋(出力10,000kW)の増設に伴い、1号機稼動中の振動が増設部コンクリート打設に与える影響を調べるために、振動測定及びコンクリート試験を実施した。

2. 振動測定

2-1 測定概要

今回実施した振動測定の概要を以下に示す。測定は加速度ピックアップからの出力を変位に変換した後データレコーダに記録した。なお、加速度は片振幅、変位は両振幅である。

- (1) 1号機稼動中の1号機基礎及び1号機建屋の振動測定(図-1参照)
- (2) コンクリート供試体製作場所での振動測定(図-1参照)
- (3) 発電所敷地地盤の振動測定(図-5参照)
- (4) 運転負荷の変動(3/4, 2/4, 1/4負荷)に伴う振動測定

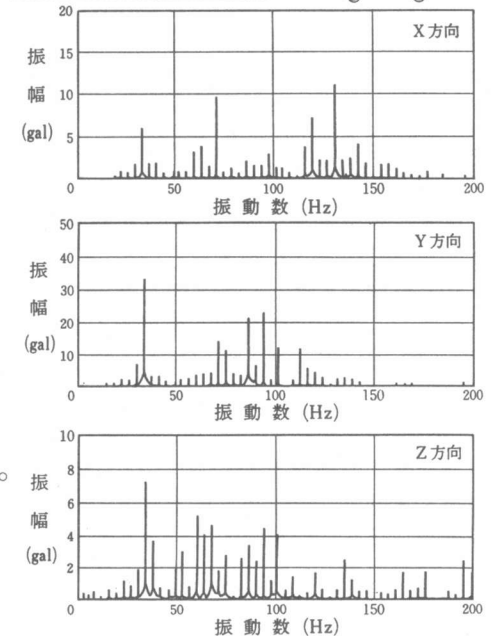
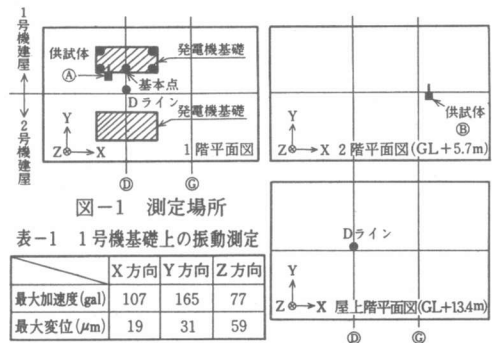


図-2 加速度フーリエスペクトル(1号機基礎基本点)

表-2 1号機建屋の振動測定

測定場所	最大加速度(gal)			最大変位(μm)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
基本点	80	142	50	9	28	17
屋上階	36	37	33	13	10	11
1階	19	30	15	5	7	7

2-2 測定結果

- (1) 1号機稼動中の1号機基礎（基本点を含む）の振動は、5箇所の測定点によりかなりの差異がみられるが、各最大値を表-1に示す。また、基本点の加速度フーリエスペクトルを図-2に示す。

加速度はY方向、変位はZ方向が最も大きく、XYZ各方向とも33.7Hzのランダム波形に3.7Hz周期のうねりがみられた。

この傾向は、地盤・建屋などすべての測定波形にも明瞭に現われており、基礎上に設置されたディーゼルエンジン及び発電機などの振動特性とみられる。

- (2) 1号機稼動中の1号機建屋の振動測定結果を表-2、図-3～4に示す。

加速度・変位とも屋上階が1階よりも大きく、高さ方向の増幅作用がみられる。

- (3) コンクリート供試体製作場所での振動測定結果を表-3に示す。

1号機機械基礎の振動のうち、特に応答の大きいX・Y方向の加速度については、機械基礎と1階床間のスラブ切欠きによる構造上の縁切り効果がみられ、1階床では小さな応答となっているが、その他については明瞭な差異がみうけられなかった。

- (4) 地盤の測定場所を図-5に、距離と加速度の関係を図-6に示す。

距離の増加に伴い、加速度が減少していく傾向がみられ、距離が2倍になると振幅はほぼ1/2になっている。また、変位の距離減衰も測定したが、加速度よりは距離減衰が幾分小さかった。

- (5) 運転負荷の変動（3/4, 2/4, 1/4 負荷）に対する基礎及び建屋の振動を測定したが、スペクトル及び振幅ともに大きな変化は無く負荷の変動は基礎及び建屋に大きな影響は与えないと思われる。

以上の測定結果により、多少のばらつきはあるものの、機械基礎・本館建屋・周辺地盤の振動特性及び後述するコンクリート供試体製作場所での振動特性がほぼ把握できた。

なお、2号機新設岩盤（GL-5.5m）の振動測定については、現場工事工程上、実施できなかった。

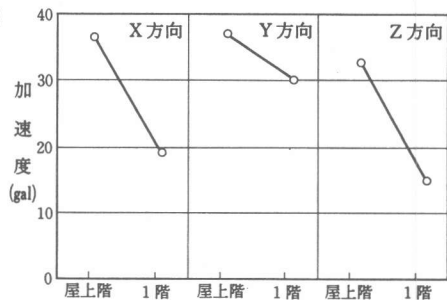


図-3 加速度測定結果(1号機建屋)

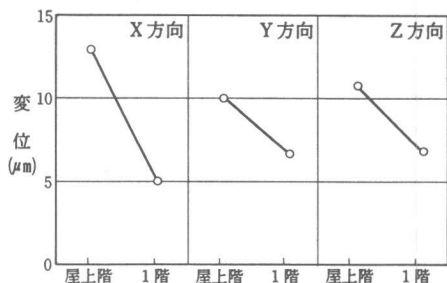


図-4 変位測定結果(1号機建屋)

表-3 供試体製作場所の振動測定

供試体製作場所	測定場所	最大加速度(gal)			最大変位(μm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1号機1階床 (供試体①)	1号機1階床	52	64	46	24	30	20
	1号機機械基礎	67	125	33	19	23	23
2号機2階床 (供試体②)	2号機2階床型枠上	29	26	46	7	9	22
	1号機2階外壁	22	35	15	5	12	6
無振動	振動の無い場所	2	2	1	2	2	2

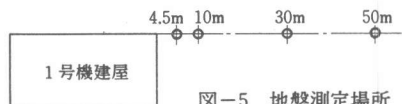


図-5 地盤測定場所

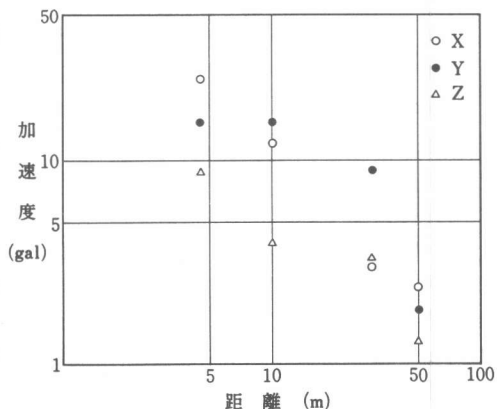


図-6 距離と加速度の関係

3. コンクリート試験

3-1 試験概要

本試験は、1号発電機による振動を受ける場所と受けない場所において、供試体製作及び養生を行い、それぞれに対してブリージング試験・圧縮強度試験及び鉄筋とコンクリートの付着強度試験を行った。なお、供試体製作日の違いにより、ケースⅠとケースⅡの2回に分けて行った。試験内容一覧を表-4に、供試体の製作場所を図-1に示す。

- (1) ケースⅠは、振動を受ける2号機新設岩盤、1号機建屋屋上及び1号機建屋から約40～50m離れた振動を受けない地盤（無振動）の3ヶ所において、 $\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$ の標準供試体及び幅100cm×高さ100cm×厚さ20cmの壁体模型（図-7参照）を製作した。
- (2) ケースⅡは、振動を受ける1号機1階床、2号機2階床型枠上及び1号機建屋から約40～50m離れた振動を受けない地盤（無振動）の3ヶ所において、 $\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$ の標準供試体及び15×15×30cmの角柱供試体を製作した。また、供試体を製作したそれぞれの場所においてブリージング試験を行うとともに、 $\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$ の標準供試体については圧縮強度試験を、15×15×30cmの角柱供試体については付着強度試験を行った。

3-2 使用材料及びコンクリートの調査

本試験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントで、比重3.16、比表面積3180 (cm^2/g)、28日圧縮強度423 (Kgf/cm^2)である。細骨材は、長崎県産の海砂で、表乾比重2.57、吸水率1.32%、FM=2.68、粗骨材は、長崎県産の玄武岩碎石で、表乾比重2.67、吸水率1.21%、FM=6.64である。また、コンクリートは、長崎県内のレデーミクストコンクリートであり、その調査は表-5に示すとおりである。

3-3 供試体の製作及び養生方法

- (1) ケースⅠの標準供試体 ($\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$) は、J I S A 1132 に準じて製作し、養生方法は材令（3日・7日・28日）まで、供試体を製作した場所において現場気中養生を行った。一方、ケースⅠの壁体模型は、図-7に示すように、幅100cm、高さ100cm、厚さ20cm

表-4 試験内容一覧

ケース	供試体の製作場所	養生方法	試 験 内 容						
			ブリー ジ ン グ 試 験	圧 縮 強 度 試 験				付着強 度試験	
				標準供試体 ($\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$)			*コア供試体 ($\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$)		(15×15 ×30cm)
				材 令	材 令	材 令	材 令	材 令	材 令
				3 日	7 日	28 日	4 日	28 日	28 日
Ⅰ	2号機新設岩盤	現場気中	—	●	●	●	●	●	—
	1号機建屋屋上		—	●	●	●	—	—	—
	無振動		—	●	●	●	●	●	—
Ⅱ	1号機1階床	現場気中	●	—	—	●	—	—	●
	2号機2階床型枠上		●	—	—	●	—	—	●
	無振動	現場気中	●	—	—	●	—	—	●
		標準水中	●	—	—	●	—	—	—

*：壁体模型（幅100cm×高さ100cm×厚さ20cm）を製作したものより採取したコア ($\phi 10 \times H 20 \text{ cm}$)

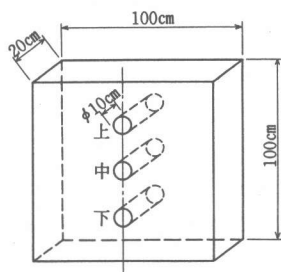


図-7 壁体模型からのコア採取位置

表-5 コンクリートの調査

ケース	調合強度 (kgf/cm^2)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m^3)	重量 (kg/m^3)			混和剤 (cc/m^3)	
								セメント	*細骨材	*粗骨材	AE減水剤	流動化剤
Ⅰ	230	12→18	4±1	65	20	46.0	184	283	835	1013	708	1981
Ⅱ	230	12→18	4±1	65	20	47.0	186	286	848	992	715	2002

*：表面乾燥飽水状態で示す

の木製型枠にコンクリートを打設して製作し、材令4日・28日において、直径10cm、長さ20cmのコアを1材令につき上段、下段及びその中間より3本抜き取った。また、養生方法は、壁体模型を製作した2号機新設岩盤において現場気中養生とした。

(2) ケースⅡの圧縮強度試験用の供試体は、JISA1132に準じて製作した。養生方法は、供試体を製作して約24時間まではその場所に保存しておき、その後材令28日まで振動のない場所で現場気中養生とした。なお、無振動の場所で製作した供試体については6本製作し、そのうち3本は材令28日まで現場気中養生を行い、残り3本については材令28日まで標準水中養生とした。

(3) ケースⅡの付着強度試験用供試体は、図-8に示すように、15×15×30cmの3連型木製型枠に、直径19mmの異形鉄筋と補強用の直径6mmのスパイラル筋(ピッチ4cm、直径13cm)を型枠の底部から7.5cmと22.5cmの所にそれぞれ水平に配置し、ASTMC234-62に準じて製作した。また、養生方法は、供試体を製作した場所にそのまま約24時間保存し、その後材令28日まで振動のない場所で現場気中養生とした。なお、1号機1階床及び2号機2階床型枠上において製作した付着強度試験用の供試体は、以下に示すようにそれぞれの位置に固定した。

1) 1号機1階床の場合(写真1参照)は、鉄筋を1号機械基礎に、型枠部分を1号機械基礎とスラブ切欠きにより構造的に縁切りした1階床にそれぞれ固定し、鉄筋と型枠部分に異った振動を作用させた。

2) 2号機2階床型枠上の場合(写真2参照)は、鉄筋を1号機2階の外壁に、型枠部分を増設工事の2号機2階床型枠上にそれぞれ固定し、鉄筋と型枠部分に異った振動を作用させた。これは、1号機2階増設梁及び増設スラブよりはつり出された鉄筋の付着性状をモデル化したものである。

3-4 試験結果

(1) ケースⅠの標準供試体及びコア供試体の圧縮強度試験結果を図-9に示す。

標準供試体の場合、2号機新設岩盤及び1号機建屋屋上において製作した供試体の材令28日圧縮強度は、それぞれ241Kgf/cm²、275Kgf/cm²であり、無振動の場合に比べて2号機新設岩盤では12%下回っているが、1号機建屋屋上ではほぼ同等となっている。一方、文献1)によると標準供試体(振動数1250rpm、振幅1mm、継続時間6時間)

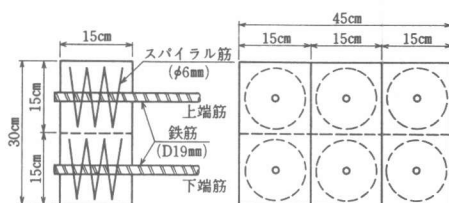


図-8 付着強度試験用型枠

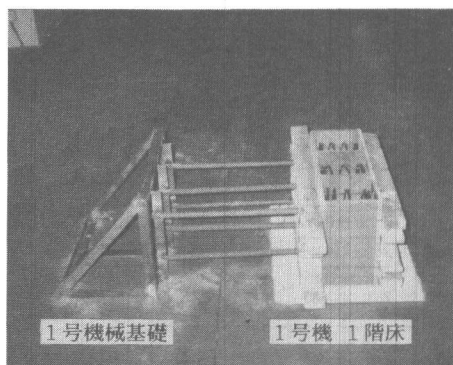


写真1 1号機1階床

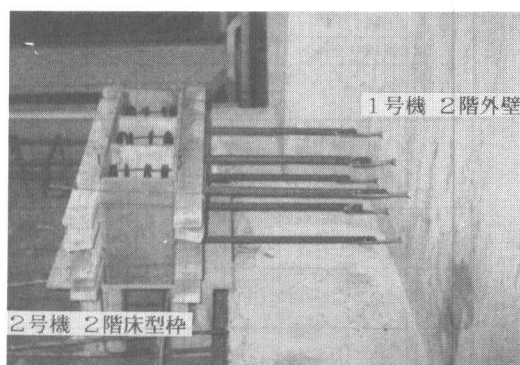


写真2 2号機2階床型枠上

の圧縮強度も、無振動の場合に比べてほぼ同等となっており、本試験結果と一致している。コア供試体の場合、2号機新設岩盤において製作した供試体の材令28日圧縮強度は、 $270 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ であり、無振動の場合に比べて約21%上回り、前述の標準供試体の場合と異った傾向を示している。この原因は明確ではないが、型枠の種類、供試体の形状寸法及びブリージングの発生機構等の違いによるものではないかと思われる。

- (2) ケースⅡのブリージング試験結果を図-10に示す。ブリージング量は、1号機1階床の場合が $0.418 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 、2号機2階床型枠上の場合が $0.321 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ であり、無振動の場合に比べて1号機1階床で約3倍、2号機2階床型枠上で約2倍となっている。なお、ブリージングの目標値 $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下²⁾はいずれの場合も満足している。

- (3) ケースⅡの圧縮強度試験結果を表-6に示す。1号機1階床及び2号機2階床型枠上において製作した供試体の圧縮強度は、それぞれ $251 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、 $259 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ であり、無振動の場合を1号機1階床で約9%、2号機2階床型枠上で約6%下回っている。

- (4) ケースⅡの付着強度試験結果を表-7、図-11に示す。

無振動の場合は、鉄筋下面に滞留するブリージング水が下端筋よりも上端筋の方が多いために、上端筋の付着強度は下端筋に対して約69%となり、上端筋の付着強度が下端筋の付着強度の約60~80%になると言う報告³⁾とも一致している。

1号機基礎の振動を鉄筋に1階床面の振動を型枠部分にそれぞれ作用させて製作した供試体及び1号機2階外壁の振動を鉄筋に2号機2階床型枠上の振動を型枠部分にそれぞれ作用させて製作した供試体については、上端筋及び下端筋ともに自由端すべり量が無振動の場合に比べて非常に小さい。また、振動が作用した場合の付着強度は、無振動の場合に比べて、上端筋で2.22~2.31倍、下端筋で1.43~1.51倍高くなっている。なお、鉄筋とコンクリートが同時に振動を受けた場合の付着強度は、付着面

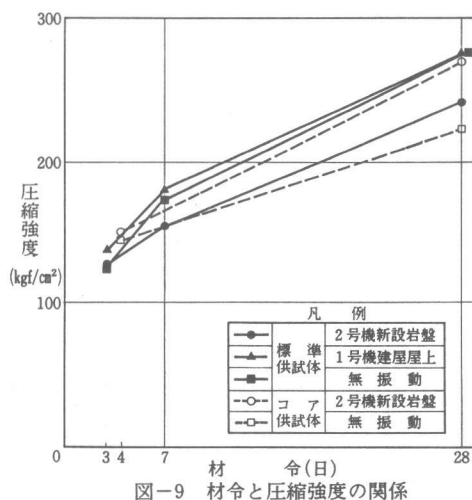


図-9 材令と圧縮強度の関係

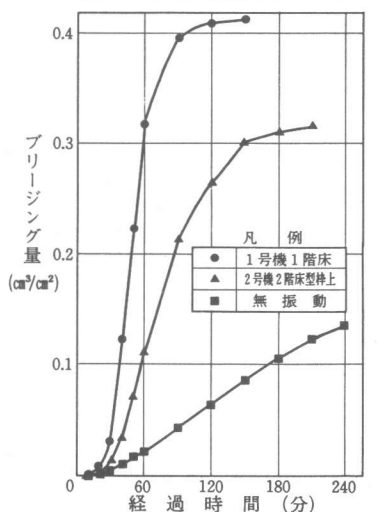


図-10 経過時間とブリージング量

表-6 圧縮強度試験結果(JISA 1108)〔材令28日〕

供試体の製作場所	養生方法	単位容積重量 (t/m^3)	圧縮強度 (kgf/cm^2)	圧縮強度比
1号機1階床	現場気中	2.232	251	0.91
2号機2階床型枠上	現場気中	2.238	259	0.94
無振動	現場気中	2.228	275	1.00
	標準水中	2.268	302	1.10

表-7 付着強度試験結果(ASTM C234-62)〔材令28日〕

供試体製作場所	上端筋		下端筋	
	付着強度 (kgf/cm^2)	応力比	付着強度 (kgf/cm^2)	応力比
1号機1階床	99.7	2.31	91.6	1.51
2号機2階床型枠上	95.6	2.22	86.9	1.43
無振動	43.1	1.00	60.8	1.00

※ 自由端すべり量は、 0.10 mm

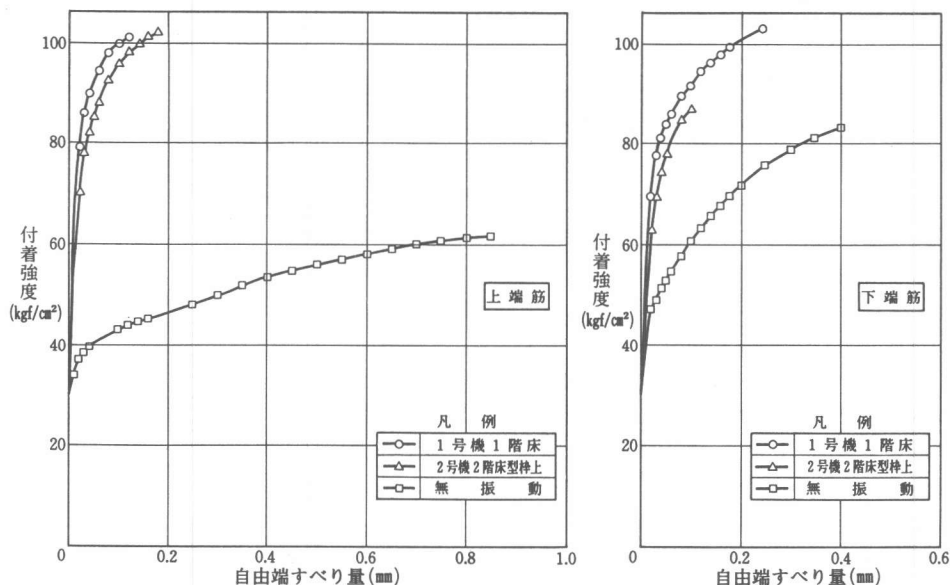


図-11 自由端すべり量と付着強度の関係

における遊離水の減少及び鉄筋周辺部のコンクリートの局所的な強度増加によって大幅に改善されると報告されており¹⁾、本試験結果と一致している。

4. まとめ

今回、A内燃力発電所において実施した振動測定及びコンクリートの付着強度試験より1号機発電機の振動は微小なものであり、これが鉄筋及び硬化途中にあるコンクリートに作用した場合、鉄筋とコンクリートの付着性状は、無振動の場合よりも良好となる結果が得られた。また、コンクリートの圧縮強度は、コア供試体では無振動の場合より高くなり、標準供試体では無振動の場合より数%低くなる傾向にあるもののすべて調合強度以上になっていた。しかし、養生中のコンクリートに長期間にわたって継続して振動が加わった場合の実験例が少ないこと、今回の試験が建設工事中の試験でありコンクリート試験結果が現場工程上間に合わなかったことにより、本施工にあたっては1号機を停止して行った。なお、今回の結果だけで内燃力発電所の振動問題を結論づけるのは早急であり、他の内燃力発電所での現地試験は言うまでもなく、さらに、テーブル振動機等を用いたもっと基礎的な試験の必要性があると思われる。そして、それらの結果を踏えて、稼動中の内燃力発電所の振動がコンクリート打設に与える影響を、振動特性により定量的に解明することが今後の研究課題であると思われる。

〔謝辞〕

本報をまとめるに当たり、御助言、御協力していただいた九州電力総合研究所土木研究室の永津忠治氏、杉田英明氏、御手洗泰文氏及び西日本技術開発株式会社の田中清利氏、藤本浩氏に深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 山下，平野他：養生中に継続振動をうけるコンクリートの諸性質について、セメントコンクリートNo.287、1971
- 2) 日本建築学会：コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説
- 3) 関・赤塚：コンクリート柱に水平に埋込んだ異形鉄筋の付着強度、土木学会論文報告集164号、1969