福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録 に関する報告を踏まえた対応について(指示)に対する 追加報告について

(鉄塔倒壊に関わる福島第一原子力発電所内の盛土の崩壊原因)

平成24 年2月17日

東京電力株式会社

目 次

- 1.はじめに
- 2.被害状況
 - (1)盛土の崩壊
 - (2)鉄塔の倒壊
- 3.盛土の調査・検討結果について
 - (1)盛土地盤の調査結果
 - (2)斜面安定解析
- 4.調査・検討結果から推定される盛土の崩壊原因

1.はじめに

当社は、平成23年4月25日に受領した「電気事業法第106条第3項の規定に基づく 報告の徴収について」(平成23・04・24原第2号)に基づき、福島第一原子力発電所内外の 電気設備の被害状況、当該発電所への送電の状況及び応急措置により外部電源を復旧させた 状況に係る記録について、平成23年5月16日に報告しました。

また、報告と同時に受領した「福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る 記録に関する報告を踏まえた対応について(指示)」(平成23・05・16 原院第7号)に基づき、 地震発生以後の福島第一原子力発電所内外の電気設備が被害を受ける状況に至った原因につ いて究明した結果や福島第一原子力発電所への送電停止をもたらした送電線の保護装置の動 作に至った原因について究明した結果を取り纏めた報告書を平成23年5月23日に提出し ています。

上記報告書においては、夜の森線 27鉄塔の倒壊原因は、地震動や津波ではなく鉄塔近 傍の盛土崩壊によるものと報告しておりますが、その後、盛土の調査や解析検討により崩壊 原因を推定しましたので、今回、その結果を報告するものです。

2

2.被害状況

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、福島第一原子力発電所内の盛土 が崩壊し、盛土下方に立地していた 5 ・ 6 号機への電力供給線路である 66kV 夜の森線 27 鉄塔 が倒壊した。5 ・ 6 号機は非常用電源全停には至らなかったため原子炉冷却を継続しているが、 原子力発電所への供給送電線が倒壊したことを受けて、鉄塔倒壊の原因となった盛土崩壊につい て調査・検討を行った。(崩壊した盛土の位置を図1に示す)

福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等の係る記録に関する報告を踏まえた対応について(指示)に対する報告について、平成23年5月23日 東京電力株式会社



図1:崩壊した盛土の位置

(1)盛土の崩壊

今回の地震により、図2のとおり鉄塔南西部において大規模な円弧状のすべりが発生すると ともに、夜の森線 28鉄塔付近までの間で多数の地割れが生じた。盛土上部では、法肩より10m 以上内側まで地割れが発生しており、崩壊末端で地盤の盛り上がりが確認されていることとあ わせて考えると、盛土全体に大きなすべりが発生したものと推定される(図3参照)。

崩壊した盛土は、図4、図5に示すように南西から北東に向かって流れる4筋の大きな沢を 埋め、さらに北側に張り出すようにすり付けて、高さ約30mで昭和40年代前半に施工されて おり、当時の『道路土工指針((社)日本道路協会 昭和42年5月)』に示された1:2(約 26°)よりも緩い1:3(約18°)の勾配に造成されていた。

一方、発電所側については、勾配が急(1:2)で崩壊箇所と同様の沢埋め盛土であったに もかかわらず、安定した状態を保持していた。この理由の一つとして、盛土上部の表面排水の ためのヒューム管(図4、図5赤破線部)が発電所側の沢に設置されていたことが考えられる。 この排水管は、沢の水を排する目的というより,盛土最上部表面の雨水等を処理するために敷 設されたと思われるが、設置のためには沢底部の地盤の砕石への置き換え、地山の段切り等の 施工を行う必要などがあり、その副次的効果として盛土の被害を軽減したものと考えられる。



図3 地震前後の盛土断面



(C)GeoEye





図5:盛土付近の旧地形

(2)鉄塔の倒壊

崩壊した盛土の土砂は、周囲の立木を巻き込みながら夜の森線 27 鉄塔に南西方向から流入 し、その衝撃圧によって鉄塔脚の根元の部材を座屈させた。その結果、鉄塔は電線の張力を支 えきれなくなり、図6に示すように電線に引っ張られる形で盛土方向に倒壊したと考えられる。 鉄塔に流入した土砂により、鉄塔脚は2.0~2.5m埋没していた。

図7に記載した通り,夜の森線の送電停止時刻は14:49:02 であり、盛土崩壊により鉄塔が倒壊したのは地震発生から約2分半後、最大加速度発生時刻から約30秒後と推定された。鉄塔に 衝突した立木と鉄塔の距離は、地震前の状況写真等から30~50m程度であり、一般的な土石流 などの流下速度5~20m/sから判断して、崩壊土砂が鉄塔に達するまでに30秒もかかるとは 考え難い。最大加速度が発生した時点では盛土は崩壊していなかったものと思われる。



図6:鉄塔の倒壊状況



図7:鉄塔の倒壊時刻と地震波形

3.盛土の調査・検討結果について

(1)盛土地盤の調査結果

震災後、図8に示す盛土法肩付近で2箇所のボーリング調査を実施した。盛土上では、平成 20年に地盤調査を実施していることから、今回の試験結果と比較したところ、崩壊した箇所の 地盤強度(N値)は、図9より盛土上部の既往の地盤調査とほぼ同等であり、崩壊箇所の地盤 強度が特に弱かったとはいえないと判断した。また、崩壊した箇所の地下水位は、図10のボー リング結果や現在の湧水状況から旧地表より上部約2mの盛土内にあると考えられる。(湧水位 置を図3の断面 に示した)



図8:ボーリング実施箇所



図9:盛土の地盤調査結果

標	標	層	深	柱	土	色	相	相	記	粒	孔		1	١Ţ	準		貫	入	弒	験		原	位	置者	試験	武	料採	取	蜜	掘	
										度試驗	内水	深	100	cm毎の 除回さ	の打							深	st	54	2	深	鴙	採			
尺	态	厚	度	状	貿		对	স		によ	位		411		2 撃			Ν		値			及	U	結果		料	取	PI	進	
	1		~	-25	区		密	稠		る土	測	度	0	102	9数							度				度	- 582.	+	鴙	月	
										質区	足月		1	2	ℓ貫入								~ 1	~			iπ.	75			
m	m	m	m	図	分	調	度	度		分	H	m	10	203	0量		0 10	20	30	40 50	60	m	jΓ	-0)m =	m	-号+	選	鶽/	m	
	33.55	0.35	0.45		テルト	慶置			路床材。 盛土。富岡層泥岩礫、砂岩を多く また砂焼土、鉄榴区間に出たる																					and and	
1				0.00°	礫泥じ	揭灰色			□○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○												-									dund	
1 2	31.55	2.00	2.45	0000	り砂							2.1	5 2	т	1 4	4					1									intro.	
1				222		*	1		盛土。概ね富岡層泥岩、砂質泥岩 確からなる。基質は中砂で灰色を			2.4	5 3	2	2 7			1												dund	
				2000	傑賞砂	1			呈する。 深度3.45~3.62mは中粒砂。 深度3.62~3.74mは有機質の粘土で			3.4	5		- 30	7	-10													mhur	
6	29.50	2.05	4.50	Eless.		裕色			こげ茶色を呈する。木片を含む。 深度3.74~3.83mはシルト質中砂。			41	5 6	11 1	4 31	31					1									di nul	
5				and					オデリング部分において、料面支 状によると見られる跡は認められ ない。			5.1	5 2	3	2 7		1	+			-									and and	
1				000	傑賞砂	揭灰色			盛土。富岡居泥岩、砂質泥岩礫を 多く含む。 確保は長ま10mm、四均2mm四化			5.4	5	3	3 9		1	1			1									Inter	
	27. 32	2.18	6,68	100					はないであっていた。 により淡褐色を呈する。 基質は中砂で、一部黄褐色を呈す			6.4	5		30	9	/-				-									and and	
1				0000					る。基質には径2~5mmの確を含む 。 コアリング部分において、封用き			1.1	5 2	2	2 6	6	4	1			1									Inni	
1				0000					状によると見られる跡は認められない。			8.1	5 1	2	2 5			+												mhu	
				0.00		裕			盛土。富岡層泥岩を含む。泥岩礫 の礫径は、最大4cm、平均8mmで風 化により漆緑色を呈する			8.4	5		2 4		-				i -									a la	
				0 0 0					7.22 (14.56~14.61mは泥岩礫で灰色を呈する。			9.4	8	2	2 30	5					-									in the second	
10				0000	DB-12 1*				基質は中砂で概ね褐色を呈する。 コアリング部分において、斜面変 北によると見られる路は認められ			12.1	5 2	3	3 8	8	4	1.			i.									1 mile	
11				0000	いたい	1			ない。			10.4	5 3	2	3 8															- International Contraction of the International Contractional Contractionae Contractionae Contractionae Contracticae Cont	
E				00000								11.4	5		30	8					i-									a la	
E ''				0 0 0		茶褐色						12.1	5 2	3	3 8	8		4								-				1 mile	
13				0000								13.1	5 2	2	3 7	7	1				1		Б Ф.							- minu	
E 14				0. 								13, 4	5 6	7	4 12			V			1		Ĥ		-					- Inter	
Ē.,	19.40	7.92	14.60	.0 0					盛土。富岡層泥岩礫を少量含むが			14.4	5		30	11		1-1								1				and an	
	1								淘汰の良い中砂で均質である。 含まれる泥岩礫の多くは風化によ り淡褐色を呈する。			15.4	5 3	4	3 10	10		<u> </u>												land.	
16									深度15.87mで灰色を呈する富岡層 泥岩礫を含む。			16.1	5 3	4	4 11_30	11		1			1									u lu	
17									泥岩の緑径は、最大10cm+、平均8m mである。 コアリング部分において、斜面変			16, 4	5 5	5	6 16			1			1		#		++++	-	 		1	1 m	
									状によると見られる跡は認められ ない。			17.4	5		30	16		1							7	- ()	了水	位			
					TA	10.6						18,1	5 3	3	4 10-	10		<u> </u>							G	L-:	20.	5m	١		
19					99F	RE						19.1	5 4	4	4 12	12		•			1				(T	P+2	24.2	2m	ı)		
20												19.4	5 3	4	4 11_						1						7			Innia	
Ē							+ -			+-		2.374	-		30	11		\i- -	╈╋		+						Y -	· - +	· - +	-	
E 21												21.1	5 4	5	5 14	14					-									Inter	
22												. 22. 1	5 4	34	5 13	13		1			(ЗI	- 2'	28	۲m					and and	
23	11, 17	8,23	22.83							Ļ	-	22.4	5				1				*					-	H	_		1	
				and the second	Dir ID I I	茶褐			四床堆板初。租初根、不片を含む 有振賞土。 含まれる礫は富岡層泥岩、砂岩の			23.4	5	3	30	7												H	ŧ		
E 24					は混じ り砂質 シルト	٤			ほか酸性岩礫を含む。 礫径は富岡層泥岩で最大6cm、平均			24.1	5 2	2	3 2	7	a	1		_						1	न	;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;	住	高	勿
25	8.70	2.47	25.30			暗褐色						25.1	5 10	13 1	2 35	35			1		(GL	-2!	5.7	7m	(. 	1-1	1	· μ	R	~J)
26	8.30	0, 40	25.70		砂锉	青灰			河床堆積物。凝灰岩、泥質泥岩碟 を含む。 確は亜角~亜円酸で 品土4~====	+	-	25.4	5 6	5	7 14	ľ						_				-		+	-	11 III	
					中粒砂				均5mm。 富岡暦。風化により茶褐色を呈し			26.4	5	4	30	18														min	
27	6.47	1.90	27.60		-	未得色			、軟質である。 均質な中粒砂岩だが、深度25.89~ 25.95m、26.61~26.64mでシルト出			27, 1	5 5	9 1	2 26 30	26			2		1			57						u luu lu	
28		1, 40	21.00		100		1		をはさむ。 風化が進みD級岩盤に相当する。			21, 4	5 12	24 1	4 50						1		員	町	旧會					min	
-	5, 00	1,40	29.00		北岩	灰色			均質な泥岩であるが、深度27.70~ 27.71m、27.88~27.94mで泥質砂岩 をはさむ。 展理面は5° 以下である			28.3	6 6		4 24	1							())	E7	手)					mm	
E 29							1		記号は新鮮であり棒状コアとして			29.1	3 2 0 3	32-4	50	505	£				1									huntu	
30									採収される。砂岩は軟質で固結度 は低い。												•									minu	
E 31																														and a	
																		-j			÷									and and	
E 32	1																													Innia	
1 33																														minu	
E 34																	1	1												1 mil	

図 10:盛土の調査結果(平成 23 年 6~7 月実施:ボーリング 1)

8

(2)斜面安定解析

崩落した斜面の静的および動的解析による斜面安定解析を図11に示す代表断面において実施 した。地震動は、静的解析では一般的な土構造物の設計に用いられる値(道路土工で示されて いる水平震度Kh=0.24)とし、動的解析では福島第一原子力発電所の北地点のGL-2.0mで観測 された図12に示した地震動のうち、盛土斜面と同方向のNS成分を用いた。図12にその加速度応 答スペクトルをあわせて示した。地下水位は盛土法肩の崩壊に最も近い図8のNo.1ボーリング 結果から、GL-20.5mに設定した。解析用の地盤物性値は、表1に示すとおり平成20年に実施し た強度試験の結果を基本に設定した。ただし、旧表土層は強度試験が当時実施されていないた め、当社の過去の地盤調査結果に基づくN値からの地盤物性値推定式による平均的な物性値(図 13)を用いるなどした。その結果、表2のケース1、2の通り、動的解析、静的解析ともに盛 土の安全率は1以上となり、すべりは発生しない結果となった(図14(1),(2))。

そこで、震災後の測量により崩壊箇所のすべり面が旧表土層を通っていることが確認された こと(図3の断面) 地盤強度は繰り返し応力の影響で低下する可能性があり、盛土工指針な どでも指摘されているように、特に地下水が存在する場合にその影響が大きいといわれている こと、今回の地震の継続時間が非常に長く、盛土内に地下水位が存在していたことを踏まえ、 旧表土層のうち斜面安定性に最も影響の大きいシルト層(図11(2)のApt層)について物性値 の低下を考慮した値に再設定して再度解析を実施した。その結果、表2のケース3、4の通り、 動的解析、静的解析ともに盛土直下の旧表土を通る円弧すべりが発生し、安全率も大きく低下 することが判った(図14(3)、(4))。このことから、盛土の崩壊は、強く長い地震動の繰り返 しにより、地下水位内にある地盤(旧表土および盛土の一部)の強度が低下したために生じた ものと推定される。



図 11(1):斜面安定解析断面



図 12:動的解析の入力地震動(北地点での地震観測波形:GL-2m)

表1:解析物性値(下段は設定根拠)

			せん断波速度Vs	粘着力C	内部摩擦角	単位体積重量 t			
			(m/s)	(kN/m2)	(°)	(kN/m3)			
1	成十兩	Beg	237	9.4	37.3	19.4			
Ľ	渔 上 <u></u> 一	DSy	H23調査結果						
2	旧表土(河床堆積物:シルト)	Apt	260	91(平均的な値) 30(低下を考慮)	9(平均的な値) 0(低下を考慮)	14.7			
			H23調査結果	2ケーフ	H20調査結果				
2	口主十(河床性痔物、小滋)	Ac. 7	260	0	35.0	18.6			
3	旧农工(/川木堆復初:127味)	Asy	H23調査結果	N値と土質状況を勘案して設定					
4	旧主十(856件:185/14)	Tog	320	0	35.0	18.6			
4	旧农工(权工堆模物)	rsg	H20調査結果	Nfi	設定				
_	宫网展(风化冰火)	T ₂ = 22(11)	300	0	33.0	18.6			
5	畄凹眉(風110吵石)	10-SS(W)	H20調査結果	N値と土質状況を勘案して設定					
6	宮岡岡(沢岩)	To md	560	1960	0.0	17.1			
°	圅 眉(北石)	ro-ma	H20調査結果	「福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書」より					

平均的な値:当社データによる推定式(図13, N=7)により設定 低下を考慮した値:Terzaghi and Peckの式(C=6.25N, N=5)より設定



図 13:当社データ(粘性土)による旧表土層(Apt 層)の地盤強度定数の推定

ケース	解析手法	地震動	最小すべり安全率	備考						
【旧表土層の地盤物性:強度定数 (当社データの平均: C = 91kN/m2, = 9 °)】										
ケース1	静的解析 (修正フェレニウス法)	道路土工基準 (k h = 0.240)	1.103							
ケース2	動的解析 (等価線形化法)	発電所北地点の地震波形	1.051							
【旧表土層の	【旧表土層の地盤物性∶強度定数 (Terzaghi and Peckの式∶C=30kN/m2, =0 °)】									
ケース3	静的解析 (修正フェレニウス法)	道路土工基準 (k h = 0.240)	0.681	粘着力C:Terzaghi and Peckの式より (C=6.25N)						
ケース4	動的解析 (等価線形化法)	発電所北地点の地震波形	0.665	内部摩擦角 :粘性土なので0とする 強度低下を考慮してN=5程度と想定						

表2:解析結果まとめ

【検討結果:ケース1】

	旧表土層の強度特性	地震動	最小すべり安全率	備考
ケース1	強度定数 (当社データの平均) (C=91kN/m2, =9°)	道路土工基準 (k h = 0.240)	1.103	

・平均的な物性値であれば、安全率は1.0を満たす



図 14(1):解析結果(ケース1)

【検討結果・ケ・	- 7 21
	~ 4 1

	旧表土層の強度特性	地震動	最小すべり安全率	備考
ケース2 (動的解析)	強度定数 (当社データの平均) (C=91kN/m2, =9°)	発電所北地点の地震波形	1.051	

<u>・すべり安全率は1.0を満足する。</u>



図14(2):解析結果(ケース2)



【検討結果:ケース4】										
	旧表土層の強度特性	地震動	最小すべり安全率	備考						
ケース4 (動的解析)	強度定数 (Terzaghi and Peckの式) (C = 30kN/m2, = 0°)	発電所北地点の地震波形	0.665	粘着力C:Terzaghi and Peckの式より (C=6.25N) 内部摩擦角 :粘性土なので0						

<u>・最小すべり安全率は1を大きく下回り、いずれも旧表土層を通る円弧で滑る</u>



図14(4):解析結果(ケース4)

4.調査・検討結果から推定される盛土の崩壊原因

震災後の調査の結果、崩壊した箇所の地盤強度が特に低かったとはいえないこと、崩壊箇所の 法面が1:3という緩勾配で施工されていたことに加え、最大加速度発生時にも盛土は崩壊して いないことから、盛土は供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動(レベル2 地震動)に対する耐震性を有していたものと考えられる。

こうしたなかで、結果的に盛土が崩壊していることから、崩壊原因については、沢を埋めた盛 土中に地下水位が存在する状況において、史上稀にみる強くて長い地震動の繰り返し応力が作用 したことにより、地下水位内の地盤の強度が低下したことによるものと考えられる。

以 上