

ボルト滑りを考慮した鋼管鉄塔の耐震性評価に用いる減衰定数について

東京電力(株) 河原 章夫 東電設計(株) フェロー会員 中村 秀治
東電設計(株) 正会員 ○大野木亮太 東電設計(株) 本郷榮次郎

1. はじめに

レベル2地震動など発生確率が極めて小さく、過度に大きな地震動に対する送電用鉄塔の耐震性評価は限界耐力評価が必要となる。この限界耐力評価における解析には次の方法が考えられる。

- (1) 鉄塔 - 架渉線連成系の3次元骨組モデルを用い、弾塑性大変形時刻歴応答解析による評価。
- (2) 大地震時にボルト滑りを伴う鉄塔の減衰定数を理論的に突き詰めるのは困難であるが、過去の実規模鉄塔の振動試験で得られた値を基に、ボルト滑りによる履歴減衰を含めて鋼管鉄塔で5%程度、山形鋼鉄塔で10%程度として解析。

本報告は、特に減衰定数について上記の根拠を示し、将来的に実鉄塔構造を対象とした現地試験の立案に寄与することを目的として実施したものである。

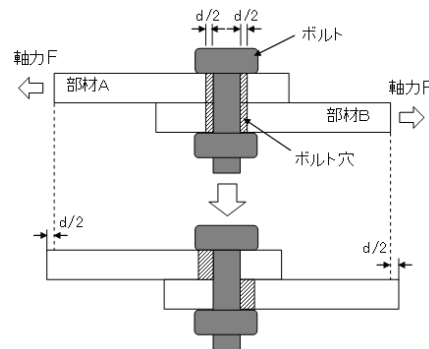


図-1 ボルト滑り始めと噛合い始め状態

2. ボルト継手部の滑りおよび降伏後の応力-ひずみ関係

図-1に示すように、継手部でボルト滑りを生じる部材のモデル化は次の通りである。鉄塔を構成する全ての立体はり部材の材料物性は鋼種により降伏応力が異なるが、使用する鋼種の全てについて2直線(Bilinear)近似とする。

発生軸力によりボルト滑りを生じ得る部材については、図-2に示すように、ボルト滑り特性を部材の多直線近似の応力-ひずみ関係に埋め込む。ボルト滑りに関わる本モデルは、過去の研究成果に基づいており、参考文献1)～4)に述べられている。

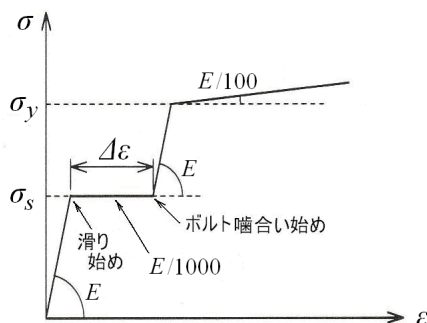


図-2 ボルト滑り部材の応力-ひずみ関係

3. 履歴特性

図-3に示すように、ボルト接合部の滑りおよび降伏後の応力-ひずみ関係をモデル化し、履歴特性プログラムを作成して骨組構造解析プログラムに組み込む。

前述の通り、第1勾配はヤング率E、第2勾配はE/1000、第3勾配は0.98E、第4勾配はE/100とする。骨格曲線内は载荷・除荷に応じて第1勾配Eで移動し、骨格曲線にぶつかれば骨格曲線上を移動する。

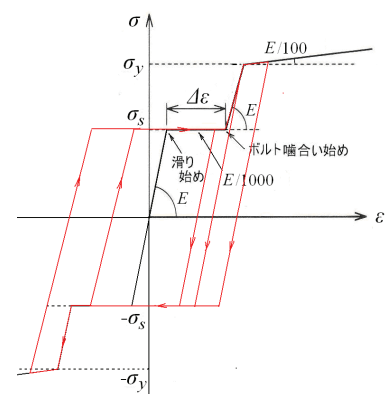


図-3 ボルト滑り部材に設定した履歴則

4. 解析モデルと固有振動特性

図-4に示す鋼管鉄塔モデル(塔高:72.0m)を検討対象に選択して大きな地震動に対する減衰定数の検討を解析的に行う。ボルト滑り箇所は鋼管鉄塔のため腹材のみとする。本鉄塔の固有振動特性は表-1の通りである。

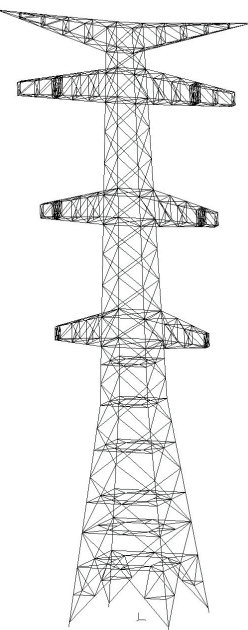


図-4 鉄塔解析モデル

表-1 鉄塔モデルの固有振動特性

モード次数	固有振動数 [Hz]	固有周期 [sec]	振動モード形
1	0.9809	1.019	直交方向1次
2	1.011	0.989	線路方向1次
3	1.806	0.554	ねじれ1次
4	3.002	0.333	直交方向2次
5	3.804	0.263	線路方向2次
6	4.910	0.204	ねじれ2次

キーワード 送電鉄塔, 鋼管鉄塔, ボルト滑り, 動的弾塑性解析, 耐震性評価, 履歴減衰
連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号 東電設計株式会社電気本部
TEL: 03-6372-5733 E-mail: r.ohnogi@tepsco.co.jp

5. 減衰定数の解析的検討手順

図-5、図-6 に例示するようなレベル 2 相当の地震動を 3 種類用意し、鉄塔の減衰定数 1, 2, 3, ..., 9, 10% で弾性応答解析 (ボルト滑り無視) した場合と、腹材 (斜材) に図-3 の履歴特性を与えた弾塑性応答解析結果を比較した。弾塑性解析ケースについては、通常の減衰定数は 1%, 2% とする。滑り発生応力 σ_s は、既往の計測経験によれば概ね $(\sigma_y/1.5) \times 0.7 \div \sigma_y/2.1$ (σ_y : 降伏応力) であるが、鉄塔部材・鉄塔用ボルト共に防錆対策として溶融亜鉛メッキが施されていることもあり、トルク係数のバラツキが大きいことに加え、部材製作精度による部材同士の接触状況のバラツキなどもあるので、 $\sigma_y/2$, $\sigma_y/3$, $\sigma_y/4$ とするものとした。これらの弾性解析と弾塑性解析の比較に基づいて、ボルト滑りを考慮した際の減衰定数を考察する。

6. 解析結果の考察

ボルト滑りを生じるのは部材に図-3 の履歴特性を持たせて、レベル 2 相当の地震動 3 波について地震応答解析した結果、図-7 に例示するような結果を得た。図中、—と—は弾性解析結果、●と●は弾塑性解析の結果であり、履歴減衰を考慮することで減衰定数が 3~5% となることが分った (表-2)。ただし、履歴減衰効果については、①地震動特性、②ボルト締付け力、③ボルトクリアランスの影響が大きいことが分った。即ち、①地震動特性の影響：高次振動モードにおいては、1 次振動モードに比べてせん断変形の割合が大きくなり、せん断力を分担する腹材 (斜材) はボルト滑りの影響を受け易い。短周期成分を多く含み高次モードを励起し易い地震波の方が履歴減衰効果は大きくなる傾向が見られる。②ボルト締付け力の影響：小さな地震動でもボルト滑りが生じれば常に履歴減衰による応答低減が生じるが、大きな地震動に対しては直ぐに滑りきってエネルギー吸収能力を超えてしまい、履歴減衰効果は低下する。③ボルトクリアランスの影響：ボルトクリアランスは大きいほどエネルギー吸収能力を高めることになるが、構造的安定性を失い易いことも懸念されるので、適切なクリアランスの範囲は自ずと 2~4mm 程度である。

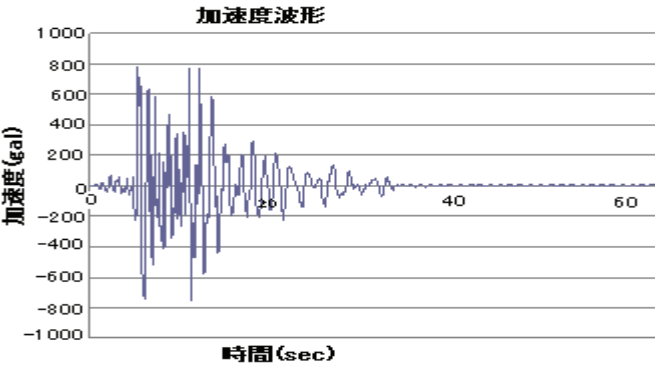


図-5 検討用地震波の例



図-6 検討用地震波(図-5)の加速度応答スペクトル

7. 結 び

本報告においては、ボルト滑りを考慮した鋼管鉄塔の減衰定数について考察したが、最適なボルト滑り特性値設定の視点での検討を行うことにより、さらに大きな履歴減衰効果が期待できるものと考えられる。

参考文献 1) 東京電力株式会社, UHV 鉄塔検討委員会: UHV 送電用鉄塔の合理化に関する総合研究報告書, 鉄塔の振動特性, 昭和 62 年 5 月 2) 鈴木敏郎, 佐藤亘宏, 深沢 隆: せん断ボルト得合部を有する塔状トラス骨組の減衰特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 411 号, 1990 3) 山崎智之, 河原章夫, 高橋圭一, 本郷榮次郎, 中村秀治: 基礎変位鉄塔のボルト滑りを考慮した耐荷力解析法に関する検討, 構造工学論文集, Vol.58A, 2012.3. 4) 山崎智之, 本郷榮次郎, 中村秀治: ボルト滑りを考慮し応力測定値との整合に留意した基礎変位鉄塔の実用的耐荷力解析法について, 構造工学論文集, vol.59A, 2013.3.

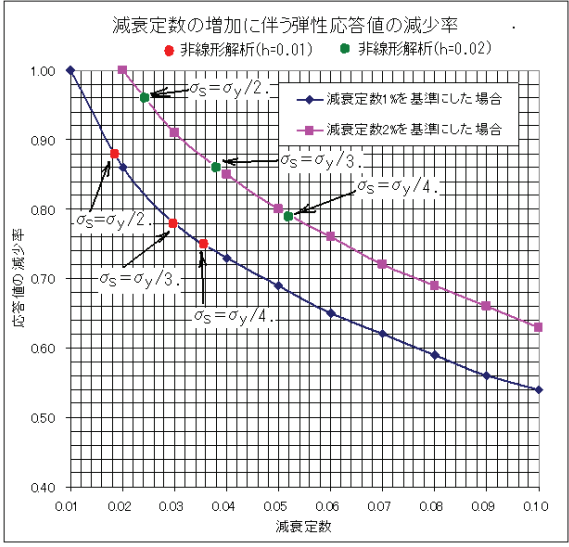


図-7 減衰定数増加に伴う応答値の減少率の例

表-2 ボルト滑りを考慮した鋼管鉄塔の減衰定数の例

		σ_s		
		$\sigma_y/2.$	$\sigma_y/3.$	$\sigma_y/4.$
減衰定数 1%	応答減少率	0.88	0.78	0.75
	弾性応答への換算減衰定数(%)	1.8	3.0	3.6
減衰定数 2%	応答減少率	0.96	0.86	0.79
	弾性応答への換算減衰定数(%)	2.4	3.8	5.2