

(39) 長大PC斜張橋架設時の風によるガスト応答の解析

鹿島建設(株) 技術研究所 正会員 ○新原 雄二
 同 上 林田 宏二
 同 上 中野 龍児

1. はじめに

長大PC斜張橋は、呼子大橋(1989年、最大支間250m)の完成を皮切りに、近年、急速にその数を増やしつつある。1996年に完成した国内最長の伊唐大橋(同260m)や、2径間ながら張出し長が199mにも及ぶ新猪名川大橋(施工中)などは、PC斜張橋の長大化へのステップといえる。このようなPC斜張橋の長大化に伴い、風洞実験などによる耐風安定性に関する検討も一般的になりつつある。わが国が台風国であることを考えれば、今後、PC斜張橋のさらなる長大化を図る上で、耐風安定性の確保はますます重要になると考えられる。

本研究は、PC斜張橋において問題となる空力振動現象のうち、張出し架設時のガスト応答に焦点をあてたものである。ガスト応答とは、自然風がもつ風速の変動によって橋が揺らされる強制振動の一種である。PC斜張橋のガスト応答は完成系であればあまり問題とならないが、張出し架設中の場合には、構造的に不安定な状態にあるため大きな振幅のガスト応答が発生しやすく、ガスト応答による振動や断面力が、作業性、構造安全性に及ぼす影響は大きい。今後のPC斜張橋の長大化を目指す上で、ガスト応答の精度のよい評価は重要であると考えられる。

そこで、本研究では、時刻歴応答解析による張出し架設時の長大PC斜張橋のガスト応答評価法を提案する。従来から、ガスト応答解析は周波数領域解析法が用いられることが多いが、時刻歴解析法は周波数領域解析法では困難なコンクリート部材の材料非線形性を考慮することができる。まず、解析方法の概要について述べた後、長大PC斜張橋のモデル橋に対して、張出し架設時に強風を受けた場合のガスト応答解析を行う。その際、主塔部材の材料非線形性を考慮する。

2. PC斜張橋架設時のガスト応答解析における仮定

ガスト応答には、①自然風の特長(乱れ強さ、パワースペクトル、コヒーレンス)、②主桁断面の空力特性(空力アドミッタンス、静的空気力係数)、③構造物の応答特性(固有振動モード、減衰)などの情報が必要である。基本的には、ガスト解析にはこれらの量が積の形で取り込まれるため、これら一つ一つの評価精度がガスト応答の予測精度に与える影響は大きい。そこで、張出し架設時のPC斜張橋のガスト応答解析を行うにあたり、本研究では次のように条件を定めた。

張出し架設時の主桁のガスト応答は、橋全体がヤジロベエのように振動する1次モードが卓越する¹⁾。この場合、主桁は上下に振動し、主塔は曲げ変形を起こす。主桁の水平振動やねじれ振動は、上下振動に比べれば非常に小さい。したがって、ガスト応答解析では上下振動のみを対象としてよい。考慮する外力としては上下方向の外力、すなわち揚力を考慮すればよい。主桁断面に作用するガスト揚力 L は次式で表される。

$$L(x,t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left\{ C_L \chi^u(x,k) \frac{2u(t)}{U} + \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \chi^w(x,k) \frac{w(t)}{U} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ρ : 空気密度、 U : 平均風速、 B : 断面幅員、 α : 気流迎角、 $u(t)$ 、 $w(t)$ はそれぞれ主流と鉛直の変動風速である。 C_D 、 C_L は静的空気力係数といわれるもので、 C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数である。静的空気力係数は風洞実験により求めることができる。 $\chi(x,k)$ は変動風速から変動空気力への伝達関数で、無次元周波数 $k=fB/U$ の関数である。 $|\chi(x,k)|^2$ を空力アドミッタンスという。

式(1)からわかるように、変動揚力は、風速の主流変動成分 $u(t)$ と鉛直変動成分 $w(t)$ により発生する成分に分けられるが、4章で述べるように、PC斜張橋主桁断面の場合、主流変動風速による揚力は鉛直変動風速によるものに比べてかなり小さい。そこで、本研究では、ガスト揚力を発生させる変動風速としては鉛直変動風速のみを考慮する。

鉛直変動風速のパワースペクトルとコヒーレンスについては、いくつか式が提案されているが、本研究では、伊唐大橋において観測された変動風速の統計的な評価から、適合性が最もよかったカルマンの式を用いることとする²⁾。カルマン型のパワースペクトルとコヒーレンスは次式で表される³⁾。

鉛直変動風速のパワースペクトル：

$$\frac{f \cdot S_w(f)}{\bar{w}^2} = \frac{4n_w(1+755.2n_w^2)}{(1+283.2n_w^2)^{11/6}}, \quad n_w \equiv \frac{f \cdot L_w}{U} \quad (2)$$

鉛直変動風速のコヒーレンス：

$$R(\Delta L; f) = 0.994 \left[\eta^{5/6} K_{5/6}(\eta) - \frac{\eta^{11/6}}{1+188.7(fL_w/U)^2} K_{11/6}(\eta) \right], \quad \eta = \frac{|\Delta L|}{L_w} 0.747 \left[1 + 70.8 \left(\frac{fL_w}{U} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここで $S_w(f)$ は鉛直変動風速のパワースペクトル、 L_w 、 \bar{w}^2 はそれぞれ鉛直変動風速の乱れのスケールと分散、 $R(\Delta L; f)$ は ΔL だけ離れた2点間のコヒーレンス、 $K_{1/6}(\eta)$ 、 $K_{5/6}(\eta)$ は第2種変形ベッセル関数である。

次に、主桁断面の空力特性であるが、静的空力係数は風洞実験から求める。空力アドミッタンスについては、伊唐大橋のガスト応答解析結果と実測されたガスト応答値との比較において、整合性のよい結果が得られた Sears 関数を用いることとした。Sears 関数とは2次元平板の空力アドミッタンスの理論式で、その近似式は次式で表される。

$$|\chi_L^w(f)|^2 = \frac{a+k}{a+(\pi a+1)k+2\pi k^2}, \quad a=0.1811, \quad k=\pi fB/U \quad (4)$$

最後に構造物の固有振動特性であるが、振動モードは固有値解析により求めている。構造物の減衰は構造減衰と空力減衰の和で表されるとして、構造減衰については伊唐大橋の施工時に実施した起振実験から得られた値を参考にし⁴⁾、空力減衰については準定常を仮定して求められる値を使用した。

3. ガスト応答の時刻歴解析法

ガスト応答の時刻歴解析法とは、図-1のように、変動空気力の時系列波形を外力として解析モデルの主

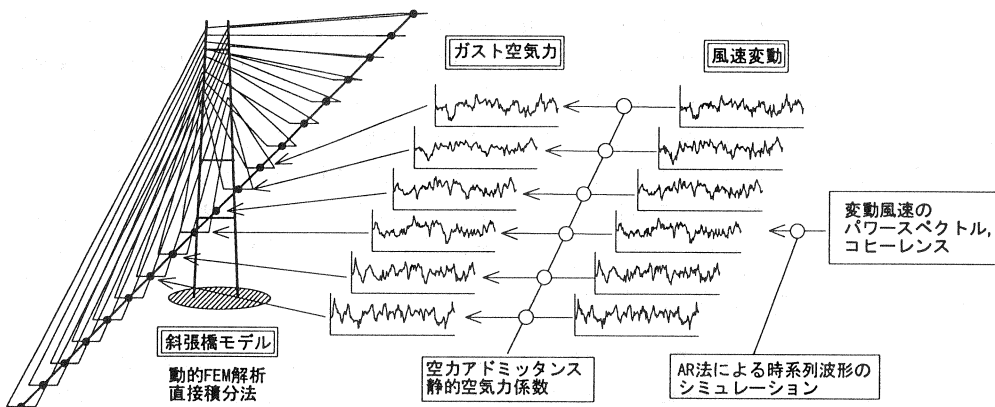


図-1 ガスト応答の時刻歴解析法

桁の節点に入力して、直接積分法により時刻歴応答計算を行うものである。そのためには、まず始めに、橋桁スパン方向に変動風速の時系列波形をシミュレートしなければならない。変動風速の特性は、パワースペクトルとコヒーレンスで記述されるため、式(2)、(3)で与えられたパワースペクトルとコヒーレンスを満たす変動風速の時系列をシミュレートし、さらにそれを準定常空気力と空力アドミッタンスを用いて変動空気力の時系列に変換しなければならない。

本研究では、変動風速の時系列波形の作成方法として、自己回帰 (AR) モデルに基づく方法を用いる⁵⁾。AR モデルとは、ある点の現時刻における風速が、それよりも過去の M 個の風速の線形一次結合と白色雑音の和として表されるとするものである。

$$U(t) = \sum_{m=1}^M A(m)U(t-m\Delta t) + N(t) \quad (5)$$

ここで、 $U(t)=[u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_k(t)]$ は k 次元の風速の時系列ベクトル、 $N(t)=[\varepsilon_1(t) \ \varepsilon_2(t) \ \dots \ \varepsilon_k(t)]$ は白色雑音 $\varepsilon_i(t)$ の時系列ベクトル、 Δt は時間間隔、 $A(m)$ は $[k \times k]$ の自己回帰係数マトリックスである。式(5)により、主桁上の各節点の風速時系列を発生させるわけであるが、自己回帰係数マトリックスと白色雑音ベクトルの作成方法は文献 5)に詳述されている。

風速時系列を作成できれば、準定常空気力と空力アドミッタンスを用いて変動空気力の時系列に変換しなければならない。空力アドミッタンスは周波数軸上の伝達関数であるため、フーリエ逆変換を行った後、風速時系列に対して畳み込み積分を行うことで変動空気力の時系列を得ることができる。

主桁節点に作用する変動空気力の時系列が得られれば、変動空気力を外力として入力することにより、動的 FEM 解析で応答計算が可能である。本研究では、鹿島建設開発の非線形動的 FEM プログラム SLAP を使用した。時刻歴解析での減衰定数の取扱いについては、構造物の減衰が無風時の構造減衰と有風時の空力減衰の和で表されるとして、それを Rayleigh 減衰で表した。

4. PC斜張橋主桁断面の空気力特性

ガスト応答解析に必要な主桁断面の静的空気力係数を風洞実験により測定する。本研究では圧力積分法を用いて乱流中の空気力係数の測定を行った。圧力積分法とは、模型表面に多数個の圧力孔を設けて、模型に作用する圧力を同時測定し、それを断面まわりに積分することにより、橋桁断面全体に作用する空気力を求める方法である。

実験に使用した風洞は、鹿島技術研究所所有のゲッチングン型回流式大型境界層風洞である。使用した主桁断面模型は、伊唐大橋の主桁断面(2室箱桁断面)を縮尺 1/20 で模擬したものである。模型の断面形状を図-2に示す。模型のスパン方向の長さは 2.5m で、測定胴内に縦置きに設置した(写真-1)。圧力孔は、模型中央部の断面まわりに 130 点設けている。実験気流は、一様流と 2 種類の格子乱流(乱流 A と乱流 B)を使用した。格子乱流の主流方向の乱れ強さは、乱流 A で $I_u=9\%$ 、乱流 B で $I_u=15\%$ であり、実際に伊唐大橋で観測された季節風と同程度の乱れ強さである。

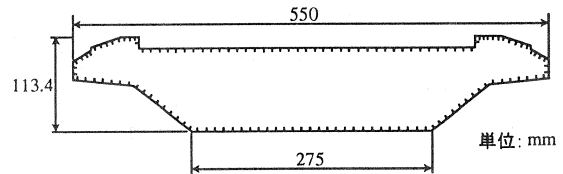


図-2 風洞実験模型の主桁断面

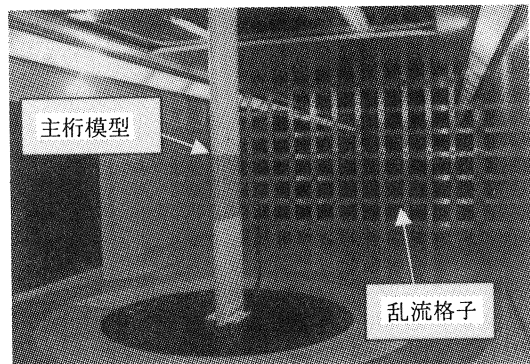


写真-1 風洞実験状況

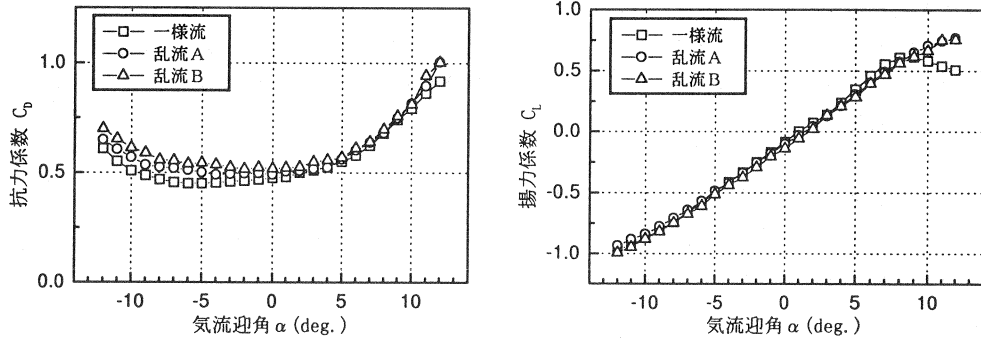


図-3 風洞実験から得られた空気力係数

ここでは、実験により得られた抗力係数 C_D と揚力係数 C_L について述べる。ここで、抗力係数、揚力係数は次式により求めた。

$$C_D = \bar{D} / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 d \right), \quad C_L = \bar{L} / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 B \right) \quad (6)$$

ただし、 \bar{D} 、 \bar{L} は抗力、揚力の平均値、 d は桁高さである。

風洞実験により得られた抗力・揚力係数を気流迎角 α に対して表したものを図-3 に示す。一樣流中の場合、抗力係数は迎角 0° 付近でわずかに勾配を持っており、負の迎角の場合には、気流の乱れによって抗力係数に差が見られる。揚力係数は乱流中の方がわずかに負側に移行しているが、あまり気流特性の影響を受けておらず、その勾配も気流特性によって変化していない。また、揚力係数は迎角 0° においてほぼ 0 となっており、このことは式(1)において主流変動風速に起因する項が省略できることを表している。

5. 主塔部材の非線形を考慮したガスト応答の時刻歴解析

張出し架設時の時刻歴ガスト応答解析を行うためのモデル橋は、中央径間 330m の 3 径間連続 P C 斜張橋とした。張出し架設時の最大張出し長は 165m である。主桁の断面形状は、スパン全長にわたって同一の 2 室箱桁断面 (幅員 $B=11m$) とした。主塔断面の決定に際しては、L1 レベル (震度法) の地震力によって発生する断面力が許容応力度を超えないように断面寸法や鉄筋の本数を決定した。主塔部材の履歴特性 ($M-\phi$ 関係) は、トリリニア型 (武藤モデル) で表した。

耐震設計および耐風設計の条件は、このモデル橋が台風常襲地帯である九州西岸に建設されると想定して次のようにした。耐震設計では L1 レベルの地震動として、I 種地盤、地域別補正係数 $C_2=0.7^0$ を仮定して、加速度応答スペクトル法で断面力の算出を行い、主塔部材に発生する断面力が許容応力度以下になるようにした。ただし、L2 レベル (保耐法) の地震動に対する設計は行っていない。耐風設計については、基本風速を $U_{10}=35m/s$ と仮定し、桁の高さを考慮して設計基準風速を $U_d=50m/s$ とした³⁾。モデル橋の一般図を図-4 に、またモード図を図-5 に示す。

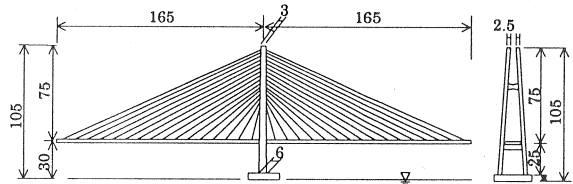


図-4 モデル橋 (単位: m)

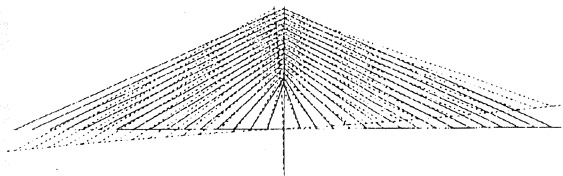


図-5 張出し施工時の 1 次モード ($f=0.109Hz$)

表-1 ガスト解析に用いた条件

気流特性 (鉛直変動風速のみを考慮)	乱れ強さ I_w パワースペクトル コヒーレンス	8.5% カルマン型 ($L_x^w=30m$) カルマン型 ($L_y^w=30m$)
主桁断面の空力特性	空力アドミタンス 静的空気力係数	Sears関数 $C_D=0.508, dC_L/d\alpha=4.80rad.^{-1}$ (風洞実験値)
構造特性	張出し長 構造減衰 空力減衰	165m (最大張出し時) $h=0.008$ (伊唐大橋実測値を参考) 準定常を仮定

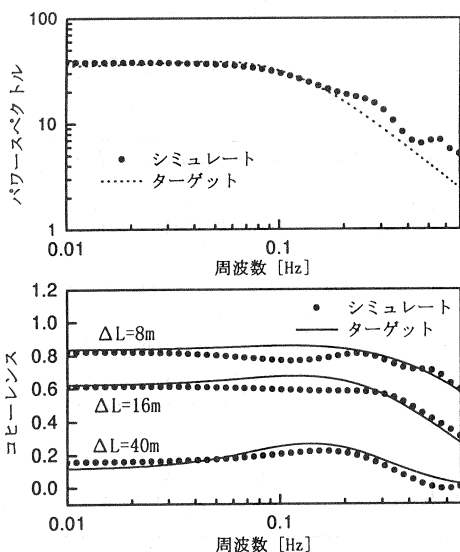


図-6 シミュレートした変動風速のパワースペクトルとコヒーレンス

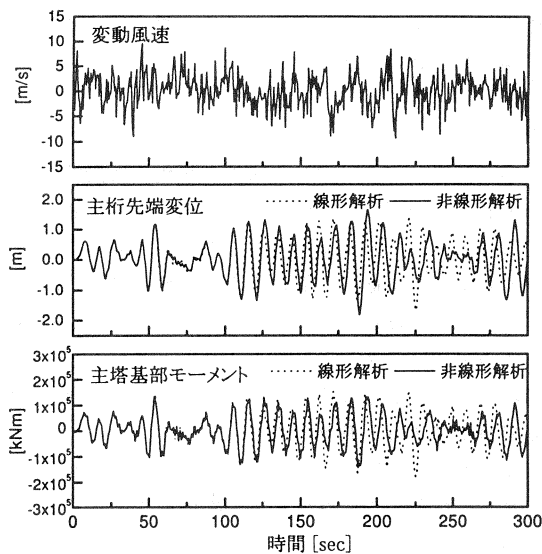


図-7 解析波形の一例 (風速 $U=40m/s$)

時刻歴応答解析に用いた条件を表-1に示す。応答解析は、各風速で風速時系列を5回ずつ発生させて行った。一例として、平均風速 40m/s において発生させた変動風速のパワースペクトルとコヒーレンスを、ターゲットとしたカルマン型と比較したものを図-6に示す。シミュレートした変動風速のパワースペクトル、コヒーレンスは、ほぼターゲットとしたカルマン型に近いものが得られている。

主塔部材を線形とした線形時刻歴解析と、主塔部材の非線形性を考慮した非線形時刻歴解析による平均風速 40m/s における主桁先端の鉛直変位と主塔基部の曲げモーメントの時刻歴波形の一例を図-7に示す。非線形解析ではコンクリートのひび割れが発生して主桁変位が大きくなるとともに、周期が長くなっていることがわかる。次に、風速-応答振幅図を図-8に示す。平均風速 30m/s においてひび割れが発生するケースが現れ、平均風速 40m/s では全ての解析ケースでひび割れが発生している。平均風速 50m/s では、解析ケースによっては主塔の鉄筋が降伏するものも見られる。

5回の応答解析による主塔の最大曲げモーメントの平均値を図-9に示す。図-9には、ひび割れ発生モーメント、降伏モーメントおよび加速度応答スペクトル法で求めた L1 レベルの地震力による発生モーメントもあわせて示す。この図から、平均風速 30m/s で完成系の L1 レベルの地震応答解析を超える曲げモーメントが発生し、平均風速 40m/s 以上で主塔基部にひび割れが生じることがわかる。

一般に、架設時の設計風速は短期間ゆえ完成時の設計風速以下と考えて良い。したがって、架設中にお

いては完成系の設計風速までの検討は必要ないにしても、制振対策を何も施さずに長大PC斜張橋を張出し架設工法で建設した場合、台風直撃時のガスト応答による主桁の変位および主塔の発生断面力はかなりのものになることが予想される。このような場合には、実橋において制振装置(AMDやTMD)の適用やタイダウンケーブルなどによる対策が必要と考えられる。

なお、本検討は設定されたモデル橋に対して表-1の条件で解析を行った結果であり、モデル橋や気流の条件などにより、解析結果がかなり異なってくることに留意する必要がある。

6. おわりに

本研究では、長大PC斜張橋の張出し架設時のガスト応答について、時刻歴応答解析法による評価手法を示した。モデル橋に対して行った応答計算の結果、張出し長が長い状態で台風のような強風を受けた場合には、部材が非線形領域に達するような大きな応答が発生する可能性があることが示された。このような場合には、今回のような部材の非線形を考慮したガスト応答の時刻歴解析が有効である。

ガスト応答解析には、数多くのファクターが必要であり、それらの中には自然風の特性和空力アドミッタンスなど未解明なものも多く、今後のデータの蓄積が必要である。また、本研究では、解析の簡略化を図るためいくつかの仮定を設けたが、今後は風洞実験と解析を併用しながらガスト応答の予測精度を高める必要があると考えられる。

本研究を実施するにあたり、東京大学の藤野陽三教授ならびに木村吉郎助教授のご指導を受けたことを記して、謝意を表する次第である。

(参考文献)

- 1) 折田秀三, 福田博文, 上野健治, 上迫田和人: 伊唐大橋(PC斜張橋)主桁・主塔の風による振動特性, 第5回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.65~70, 1995年。
- 2) 新原雄二, 中野龍児: 架設時風観測に基づく伊唐大橋の風の特性和ガスト応答について, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.527~532, 1996年。
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧, 平成3年7月。
- 4) 新原雄二, 竹田哲夫, 大塩 真, 中野龍児: 主桁制振装置による張出し施工中のPC斜張橋の制振, 第5回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.75~78, 1995年。
- 5) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとコヒーレンスをもつ多次元風速変動のシミュレーション, 日本風工学研究会誌, 第11号, pp.5~18, 昭和57年4月。
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成8年12月。

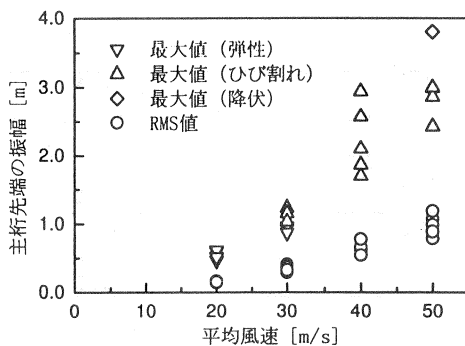


図-8 主桁先端の鉛直変位応答

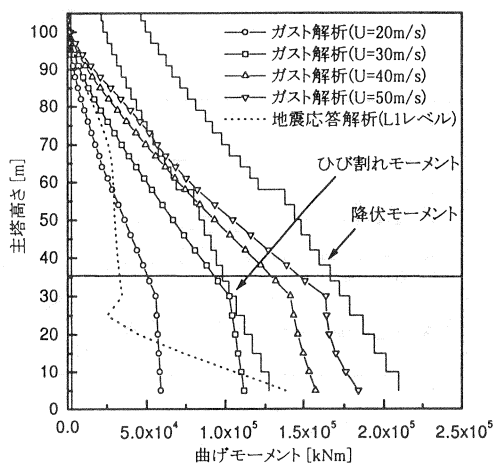


図-9 主塔に発生する曲げモーメント