

2019年度（第11回）免震構造・制振構造に関する研究助成の成果報告

400m級アウトリガー構造および外殻構造のオイルダンパー最適配置・容量分布に関する研究

寺澤友貴（東京工業大学）

1 はじめに

近年、地震国である我が国においても400m級超高層建物の需要が高まり、オイルダンパーを付加したアウトリガー構造¹⁾や外殻構造²⁾が注目されている。これらの構造は今後国内で普及する可能性が高く、効率的な最適ダンパー設計手法と基礎的知見の充実が望まれる。しかし、実例が少なくオイルダンパーの最適配置・容量分布には未だ不明な点が多い。そこで本報は立体モデルの高速な地震応答評価も可能な一般化応答スペクトル解析法(GRSA)³⁾に基づき地震応答制御に寄与する設計変数を抽出してその影響を分析し、さらに広範な設計解探索を行う。

2 ダンパー付アウトリガー構造

2.1 解析モデルと設計変数

図1(b)に16～64層建物を想定した検討用簡易解析モデルDM⁴⁾を、同図(c)に設計変数を示す。主な設計変数としてアウトリガー高さ比 α 、ダンパー付加系剛性比 R_{db} 、ダンパー側柱剛性比 R_{dc} 等を設定する。ダンパーは線形のオイルダンパーとし $C_d\omega$ で剛性評価する。DMモデルは2通りの手順(Met. I, Met. II)で構築する。 α の増加に対して、Met. Iでは側柱軸剛性 k_c/α を一定、Met. IIでは側柱断面積が一定で k_c/α が低下する(表1)。加えて R_{db} 、 R_{dc} の変化に対して、Met. Iでは付加系剛性 k_b が一定でダンパー量のみ変化し、Met. IIでは k_b も変化する。以上の点でMet. IIの方が現実的と言える。Met. I, IIにおける各設計変数の検討範囲は表2に示す通りとする。複素固有値解析、時刻歴応答解析(NLRHA)およびGRSAから応答値を算出し入力は告示4波とする。

2.2 固有振動特性と地震応答低減効果の分析

図2にNLRHAとGRSA応答値の比較を示す。GRSAは64層までNLRHAを20%以下の誤差で捉えている。図3に32層におけるモード応答と修正CQC法の重合応答値を示す。変位応答に対し1次モードが支配的であり、加速度応答では高次モードの影響が無視できない。また、制振モデルは非制振($C_d=0$)や耐震($C_d=\infty$)モデルより応答が低減する。図4に示すように、Met. IIでは R_{dt} が小さいほど1次減衰比は増加するが、頂部変位の変化は微小である。またMet. Iでは R_{dt} に対して k_b 、 k_d が変化しな

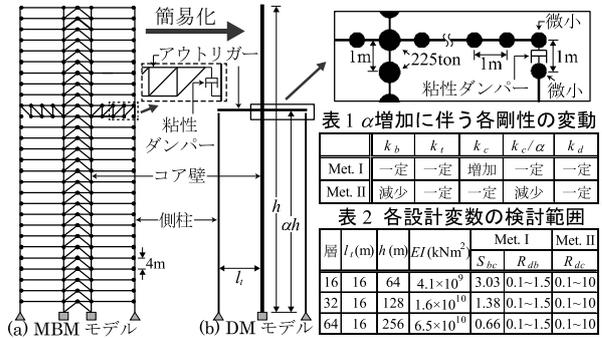


表1 α 増加に伴う各剛性の変動

	k_b	k_t	k_c	k_c/α	k_d
Met. I	一定	一定	増加	一定	一定
Met. II	減少	一定	一定	減少	一定

表2 各設計変数の検討範囲

層	l_i (m)	h (m)	EI (kNm ²)	Met. I	Met. II
16	16	64	4.1×10^9	S_{bc}	R_{db} , R_{dc}
32	16	128	1.6×10^{10}	0.1-1.5	0.1-10
64	16	256	6.5×10^{10}	0.66	0.1-1.5

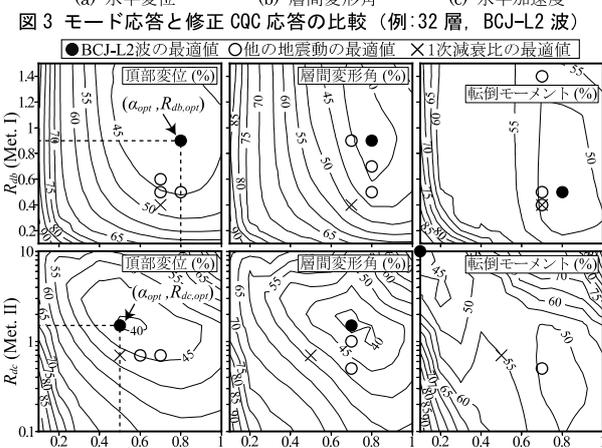
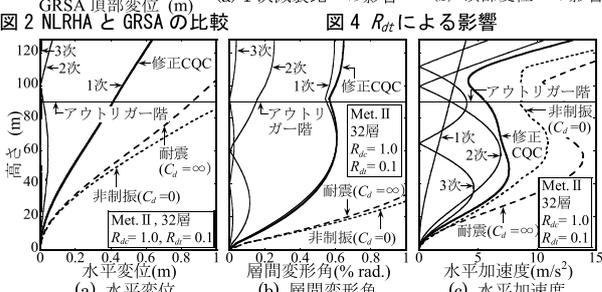
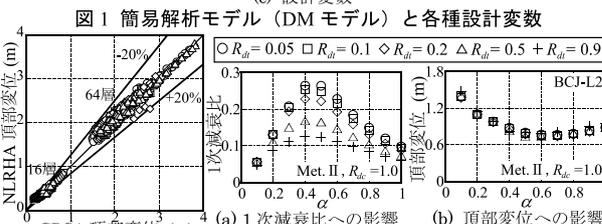


図5 各地震応答における低減率(%)の分布図(例:32層, BCI-L2波) いため、 R_{dt} による固有値と応答値への影響はない。そこで以降Met. Iは $R_{dt}=0.05$, Met. IIは $R_{dt}=0.1$

で固定し検討する。図5に各地震応答における低減率(制振/非制振)の分布図を示す。 α , R_{db} , R_{dc} には明確な最適値が存在し, 1次減衰比と頂部変位では α 増加に伴う k_c/α の低下によりMet. IIの方が α_{opt} が小さい。Met. IIの転倒モーメントでは極小値が2つ存在し明確な最適値が見られない。図6に16~64層の各地震応答に対する最適値をまとめる。 α_{opt} は層や応答によるばらつきが小さく、概ね $\alpha_{opt} = 0.6 \sim 0.8$ に分布する。 $R_{db, opt}$, $R_{dc, opt}$ は入力や応答によるばらつきが大きいが16, 32, 64層でそれぞれ $R_{db, opt} = 0.3, 0.5, 0.6$, $R_{dc, opt} = 0.4, 0.7, 0.9$ 程度に分布し、高層ほど大きい傾向を示す。また1次減衰比に対する最適値は各応答に対する最適値より小さい傾向を示すが、両者は概ね近い値となる。表3に各地震応答における最小値と1次減衰比最大時における各応答値の低減率の差を示す。ベースシアや転倒モーメントでは高次モードの影響が大きいため両者の差が大きいが全体として20%程度以下に収まる。

2.3 1次減衰比を最大化する簡易設計式

2.2節を踏まえて任意の α について1次減衰比を最大化するダンパー剛性比の評価式(1)を提案する。

$$R_{dc, opt} = 0.3465 \times \alpha^{0.3366} \times S_{bc}^{-0.3158} + 0.1 \quad (1)$$

図7に式(1)をMet. IIに適用した際の応答を示す。最適化したモデルは頂部変位と層間変形角では応答の概ね最小値を捉え、高次モードの影響を受ける応答(特にベースシア)では精度が下がる。

2.4 400m級超高層建物の簡易設計式の適用

3章で詳述する400m級超高層建物を対象に簡易設計式の適用を試みる。解析モデルはアウトリガー構造が検討されていた立体モデルを静的解析よりDMモデルに置換する。図8の最適設計チャートに示すように、1次モード減衰比の等値線図に簡易設計式を重ね、減衰比を最大化する諸元(表4)を決定する。ただし、400m級超高層を前節までの単層アウトリガー構造として設計することはダンパー負担軸力の点で現実的ではないため、図9に示す通り、単層アウトリガー構造の諸元を上下の高さの半分の位置に同量配置するcase1と等分配配置するcase2を検討する。表5にJSCAが提案する関東圏の超高層建物用長周期地震波KA1のNLRHA結果を示す。変位応答は非制振・耐震状態から十分に低減し、case2のように複層化によって単位アウトリガーのダンパー容量を減らしても最適化された単層アウトリガー構造と同等の耐震性能を満足する計画を実現できた。

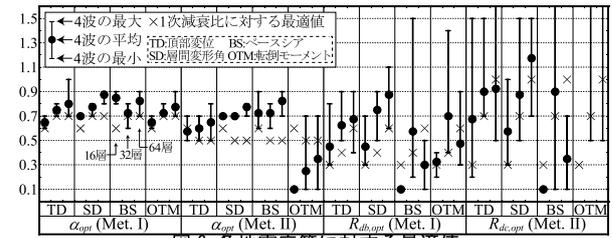


表3 1次減衰比最大時における各応答値 (4波の平均)

最適化指標	頂部変位			層間変形角			ベースシア			OTM		
層	16	32	64	16	32	64	16	32	64	16	32	64
Met. I 差(%)	3.0	3.9	3.6	5.6	6.2	6.4	10.8	5.3	7.7	1.5	2.5	3.4
Met. II 差(%)	2.9	4.2	5.0	4.7	12.3	10.1	9.2	24.6	22.8	11.3	15.1	6.4

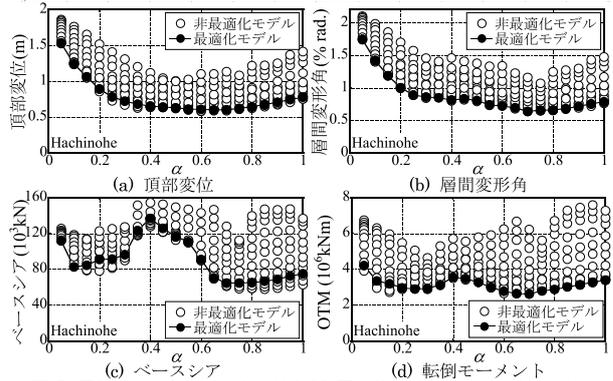


図7 最適化モデルの応答 (例:32層, Hachinohe波, Met. II)

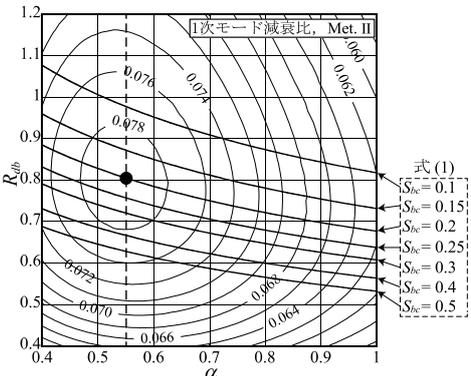


図8 提案する簡易設計式を用いた最適設計チャート

表4 最適設計した400m級超高層建物の諸元

h (m)	l _i (m)	EI (kNm ²)	α	S_{bc}	$R_{db, opt}$	k_d (kN/m)	C_d (kNs/m)	k_c (kN/m)	k_t (kN/m)	R_{dt}
396	32	7.93×10^{11}	0.55	0.2	0.804	3.1×10^5	4.0×10^5	2.7×10^5	2.0×10^6	0.16

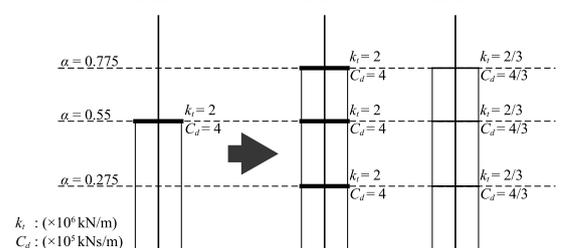


図9 ダンパー付複層アウトリガーの検討ケース

表5 最適設計した400m級超高層建物の最大地震応答 (KA1波入力)

	固有周期 (s)	1次モード減衰比	頂部変位 (m)	層間変形角 (%rad)	頂部加速度 (m/s ²)	ベースシア (10 ⁶ kN)	転倒モーメント (10 ⁶ kNm)
非制振			2.78	0.950	2.39	177	48.1
耐震	7.37		2.49	0.840	2.15	195	46.7
case0	7.69	0.0619	1.42	0.495	1.72	113	25.6
case1	7.360	0.05860	1.387	0.4656	1.412	120.7	25.47
case2	7.738	0.06328	1.405	0.4863	1.493	109.7	25.30

3 ダンパー付外殻構造

3.1 解析モデル

図 10 に解析モデルを示す。対象は一辺 97m の正方形平面を有する高さ 396m、アスペクト比約 4.0 の外殻構造物²⁾であり、四隅の縦スリットにダンパーブレースを配置する。本章はオイルダンパーを均等配置、不均等配置、均等集中配置する場合の変位応答低減に有効なスリット深さと容量分布を探索する。図 11 に入力地震動の応答スペクトルを示す。入力地震動は告示波 4 波と KA1 を用いる。図 12 に示すように、GRSA は検討上必要な精度を満たす。

3.2 線形オイルダンパーの最適容量分布

初めに同一容量の線形オイルダンパーを均等配置する場合を例に最適なスリット深さを分析する。図 13 に頂部変位と層間変形角の等値線図を示す。設計変数はスリット底高さ比 α と総減衰係数 ΣC_d である。均等配置では、 ΣC_d に比例して応答低減効果が高いが、導入できる総ダンパー量に制約があるとすれば、点線の ΣC_d 範囲に示すように、全スリットよりも $\alpha = 0.23$ で告示波の頂部変位を最小化出来る。

図 14 にスリット内を分割してダンパーを不均等配置する最適化問題の概要を示す。最適化問題は均等配置で効果のあった $\alpha = 0.23$, $\Sigma C_d = 20 \text{ MNs/mm}$ を制約とし、設計変数はスリット内分割数 n , ダン

パー容量を切り替える位置の高さ比 $\beta_{i, i+1}$ とその範囲のダンパー容量比 γ_i とする。最適化アルゴリズムは粒子群最適化(PSO)を用いる。図 15 に最適化計算結果を、図 16 に最適解の NLRHA の結果を示す。頂部変位の最小化ではスリット中央部から下部に、層間変形角の最小化ではスリット中央部から上部に大きなダンパー容量を配分すると応答低減に効果的である。同傾向は分割数が多いほど顕著である。図 16 に示すように、最適解の地震応答は弾性ブレース配置より約 50%低減されるが、配置方法による差異は小さい。一方、目的関数によって、一部にダンパーを配置しない最適解も選ばれ、スリット内に隙間(ブランク)が存在しても良いことが分かる。

図 17 にスリット内の一部にダンパーを均等集中配置する場合の検討概要を示す。設計変数は ΣC_d , 上部ブランク数 m_1 , 下部ブランク数 m_2 であり、 $\alpha = 0.23$ を制約とする。図 18 に均等集中配置に対する頂部変位の等値線図を示す。ダンパー挿入層より下部の弾性ブレースはダンパー接合部剛性として働くため、 ΣC_d に応じて接合部剛性が十分確保されるように、最適な下部ブランク数が変動する事が分かる。

3.3 非線形オイルダンパーの最適容量分布

次にリリーフ機構による減衰係数 C_d の低下を考慮した非線形オイルダンパーの最適容量分布を分析

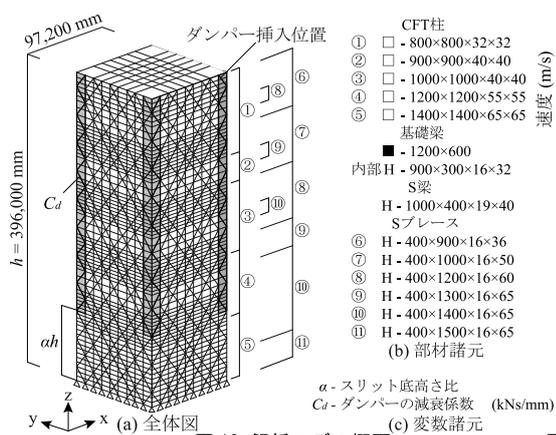


図 10 解析モデル概要

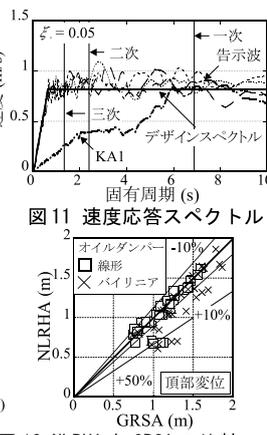


図 11 速度応答スペクトル

図 12 NLRHA と GRSA の比較

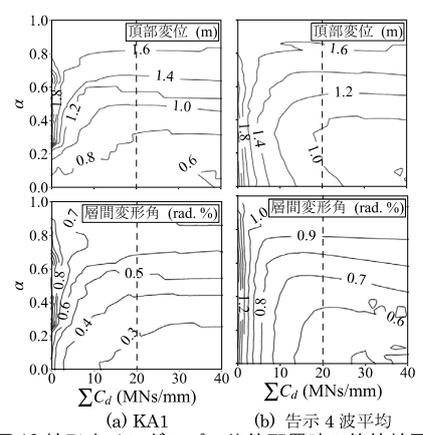


図 13 線形オイルダンパー均等配置時の等値線図

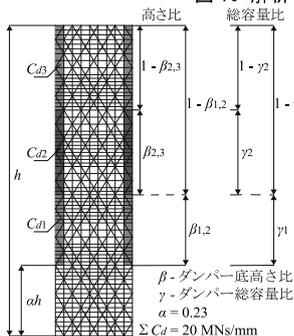


図 14 不均等配置の最適化問題

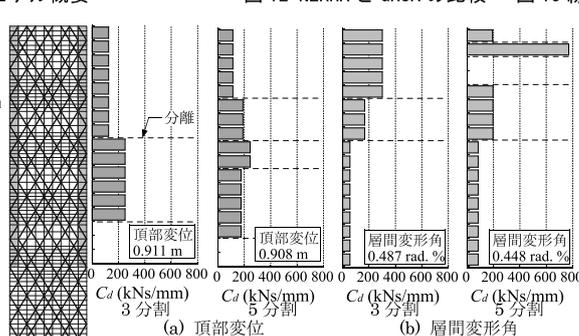


図 15 線形オイルダンパー非均等配置の最適容量分布 (告示波)

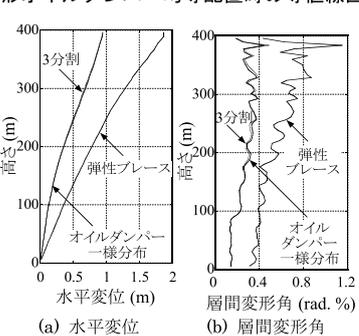


図 16 最適解の時刻歴応答解析結果の比較

する。最大速度時のエネルギーの等価性に基づき、オイルダンパーの非線形性は等価減衰係数 C_{deq} として評価する。(図 19 参照)

図 20 に同一容量の非線形オイルダンパーを均等配置する場合の頂部変位と層間変形角の等値線図を、図 21 に線形オイルダンパーに対する応答比の等値線図を示す。非線形オイルダンパーでは、減衰性能の低下により線形オイルダンパーの均等配置よりも応答増大する。特に ΣC_d が小さくスリット底が深い(単位 C_d が小さい)と、変位応答は線形オイルダンパーから最大 30%程度増大する。一方、図 13 と図 20 の等値線の傾向は概ね同様であり、非線形性も考慮してオイルダンパーを均等配置する場合には、線形時の最適解よりやや大きめの容量を選択すると良い。

図 22 に非線形オイルダンパーを不均等配置する場合の計算結果を示す。非線形性によって ΣC_{deq} は ΣC_d から低下するため、3.2 節の均等集中配置と同様に接合部剛性が十分確保されるようにスリット下部に大きな隙間を有する分布量が最適解に選ばれた。隙間の大きさは入力レベルに依存すると考えられる。一方、容量分布の傾向は線形と同様であるが、隙間との境界部に多めに容量配分すると良い。

4 まとめ

- 1) 単層アウトリガー構造は 1 次モード応答の低減に効果があり、1 次モード減衰比を最大化する設計が地震応答を包括的に低減できる。提案した簡易設計式とモード減衰比の等値線図を重ねて用いることで 400m 級超高層建物でも 7% に近い 1 次モード減衰比を確保する構造計画が

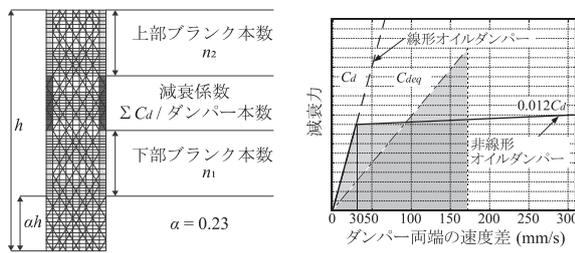


図 17 均等集中配置の検討

図 19 荷重-速度関係図

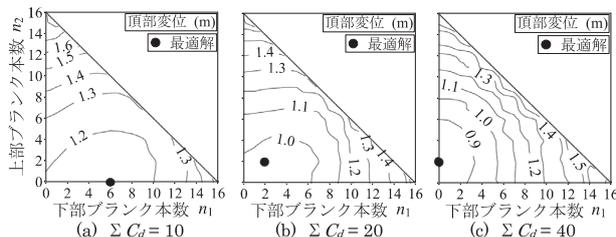


図 18 総減衰係数 ΣC_d が変化した場合の等値線図の変化

効率的に検討できる。

- 2) アスペクト比 4 程度の 400m 級オイルダンパー付き外殻構造は弾性ブレースのみ配置した場合より約 50%の応答低減効果を期待できる。その一方で、配置方法による応答低減効果の差異は小さく、建築計画に応じて様々な配置方法を選択できる。

参考文献

- 1) Rob J. Smith and Michael R. Willford : The Damped Outrigger Concept for Tall Buildings, Struct. Design Tall Spec. Build. Vol.16, pp. 501-517., 2007.
- 2) 石橋洋二, 横山亮, 溜正俊, 渥美孝紘, 小川一郎, 竹内徹 : 400m 級の超高層ビルに対する外郭制振構造の適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.873-876, 2018.9
- 3) 寺澤友貴, 竹内徹 : 一般化応答スペクトル解析法に基づく制振ブレース構造の最適設計手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 83, No. 753, pp. 1689-1699, 2018.11
- 4) Lin Pao-Chun, Toru Takeuchi, Ryota Matsui: Seismic performance evaluation of single damped-outrigger system incorporating buckling- restrained braces, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 47, No. 12, pages 2343-2365, 2018.7

謝辞

本研究を実施するにあたって、三菱地所設計の石橋洋二様、東工大大学院生の浅井智樹君、田中陽樹君および東工大の竹内徹教授にご協力をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

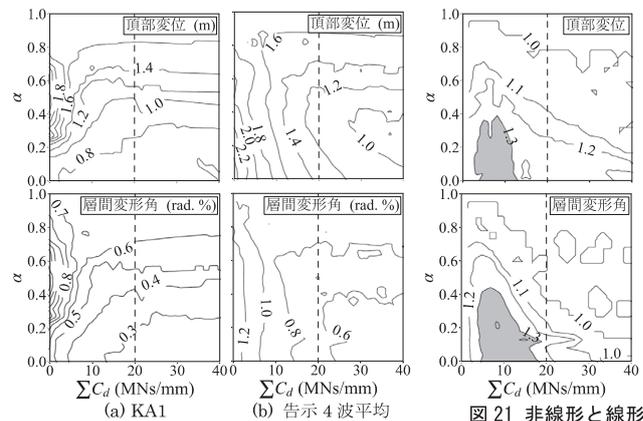


図 20 非線形オイルダンパー均等配置時の等値線図

図 21 非線形と線形の応答比率

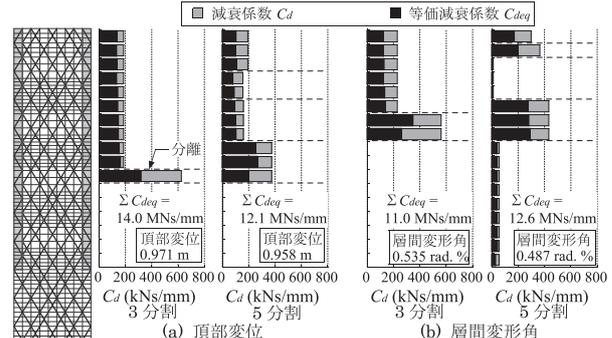


図 22 非線形オイルダンパー非均等配置の最適容量分布(告示波)