

論文 偏心K型ブレース付き柱RC・梁S構造の設計法に関する基礎的研究

佐藤 健*1・五味 晴人*2・胡木 清人*3・内田 和弘*4

要旨：柱RC梁Sとする混合構造における、RC耐震壁にかわる有効な耐震要素として、偏心K型ブレースを適用した場合の試設計を行い、その耐震合理性について設計的な検討を行った。その結果、偏心K型ブレースを適用することで、合理的な耐震設計の可能性、及び柱RC梁Sとする混合構造の適用領域と設計自由度の拡大が図れることを示唆した。

キーワード：柱RC梁S構造、混合構造、偏心K型ブレース、耐震設計

1. はじめに

柱RC梁Sとしたハイブリッド構造システムは、純RC造や純S造との比較において、その構造的合理性[1]は言うまでもなく、柱梁接合部の応力伝達機構も徐々に解明され[2]、実施例も増加してきている。しかし、これまでの主な耐震要素はRC耐震壁であった。そこで、RC耐震壁にかわる有効な耐震要素として、偏心K型ブレース[3]の適用を考え、合理的な耐震設計の可能性を探るために、試設計を行ったので報告する。

2. 試設計建物モデル

試設計を行った建物モデルは、文献[4]で設定された図-1に示すような柱RC梁S12階ラーメンモデルを基本モデル (Model-1) とした。また、そのY方向フレームの一部に図-2に示すような耐震要素を付加したモデル (Model-2~Model-4) を加え、合計4ケースを設定した。Model-2は、

在来のRC耐震壁を想定したモデル、また、Model-3は、S梁中央のシアリンク部分において、安定したエネルギー吸収を期待したモデル、更に、Model-4は、RC柱のPCa化を考慮し、補強されたS梁端部へのブレースの接合を想定したモデルである。なお、試設計にあたっての検討は、Y方向のみとし、基礎構造の検討は省略した。

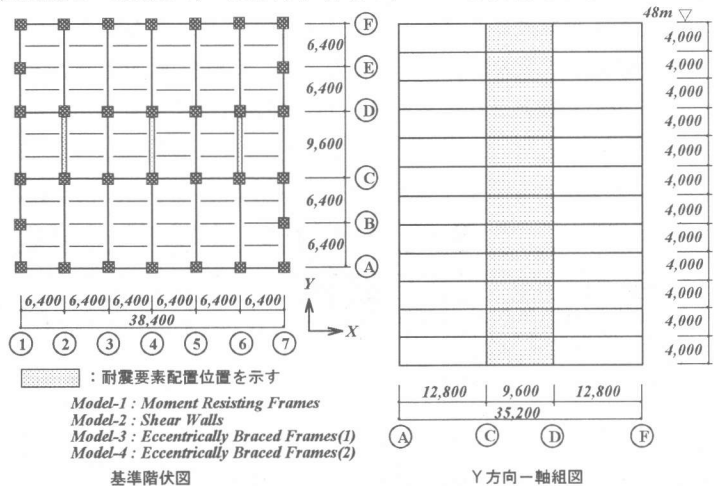


図-1 基準階伏図・軸組図

- *1 (株) フジタ術研究建築研究部構造2グループ主任、工修 (正会員)
- *2 (株) フジタ技術研究所所長 (非会員)
- *3 (株) フジタ建築本部建築設計部構造部チーフエンジニア (非会員)
- *4 (株) フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主任研究員 (正会員)

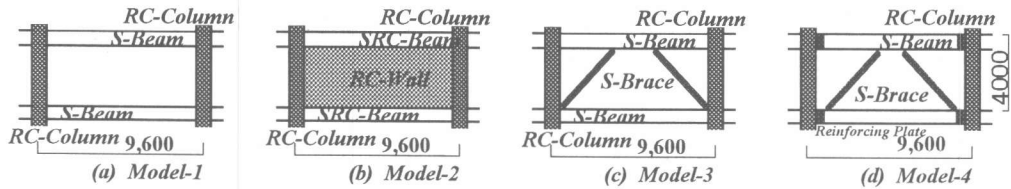


図-2 試設計モデルの耐震要素のパターン

3. 仮定断面

各モデルの代表的な部材断面、及び使用材料を表-1に示す。なお、Model-1については文献[4]の部材断面、及び使用材料をそのまま用いた。

表-1 部材断面リスト・使用材料

柱リスト		主筋：SD390 Hoop：SBPD130/145			壁リスト 補強筋：SD295A,SD345	
Floor		Model-1	Model-2	Model-3,Model-4	Floor	Model-2
12~10	BxD	800x800	800x700	800x650	12~11	TW20(2-D13 @150)
	M.Bar	12-D32	12-D32	12-D32	10~9	TW25(2-D16 @125)
	Hoop	2-U13 @80	3-U13 @80	3-U13 @80	8~7	TW30(2-D19 @150)
9~7	BxD	1000x1000	1000x700	1000x650	6~5	TW35(2-D19 @125)
	M.Bar	12-D32	12-D32	12-D32	4~3	TW40(2-D19 @120)
	Hoop	2-U13 @80	3-U13 @80	3-U13 @80	2	TW45(2-D19 @100)
6~4	BxD	1000x1000	1000x700	1000x650	1	TW50(2-D22 @125)
	M.Bar	12-D35	12-D35	12-D35		
	Hoop	4-U13 @80	4-U13 @80	4-U13 @80		
3~1	BxD	1000x1000	1000x700	1000x650		
	M.Bar	12-D38	12-D38	12-D38		
	Hoop	4-U13 @80	4-U13 @80	4-U13 @80		
大梁リスト		材種：SM490A			ブレースリスト 材種：SM490A	
Floor		Model-1	Model-2	Model-3,Model-4	Floor	Model-3
R~11	Y-Dir.	H-800x200x14x25	H-700x200x14x25	H-700x200x14x19	12~10	H-208x202x10x16
10~8	Y-Dir.	H-800x250x16x25	H-700x250x16x22	H-700x250x14x22	9~7	H-250x250x9x14
7~5	Y-Dir.	H-800x300x16x32	H-700x300x16x28	H-700x250x14x28	6~4	H-250x250x16x16
4~2	Y-Dir.	H-800x300x16x32	H-700x300x16x32	H-700x250x14x28	3~1	H-300x300x10x15
Floor		Model-4			Floor	Model-4
12~10		H-200x204x12x12			12~10	H-200x204x12x12
9~7		H-248x249x8x13			9~7	H-248x249x8x13
6~4		H-250x250x12x16			6~4	H-250x250x12x16
3~1		H-300x300x10x15			3~1	H-300x300x10x15

4. 1次設計

弾性応力解析結果に基づき、1次設計として許容応力度設計を行った。その際、設計用層せん断力は、建設省告示の略算固有周期を用い、地盤を第2種地盤とし、Ai分布を仮定して求めた。各モデルの層せん断力と層間変形角、および固有周期を表-2に示す。Model-1に対するModel-3およびModel-4の剛性は、層間変形角および精算固有周期より、ほぼ同程度になっている。なお、Model-2の耐震壁の剛性低下率は、そのせん断応力度レベルより判断し、1.0とした。

表-2 層せん断力・層間変形角（1次設計時）

階	Model-1				Model-2				Model-3				Model-4			
	T=1.44sec(T'=1.24sec)				T=1.20sec(T'=0.76sec)				T=1.44sec(T'=1.28sec)				T=1.44sec(T'=1.28sec)			
	Qi(t)	Qf(%)	Qw(%)	γ	Qi(t)	Qf(%)	Qw(%)	γ	Qi(t)	Qf(%)	Qb(%)	γ	Qi(t)	Qf(%)	Qb(%)	γ
12	459.1	100.0	0.0	1/794	551.4	80.3	19.7	1/750	446.6	66.9	33.1	1/829	446.4	69.3	30.7	1/813
11	689.0	100.0	0.0	1/575	833.6	41.2	58.8	1/717	667.6	61.1	38.9	1/604	667.5	65.0	35.0	1/593
10	884.3	100.0	0.0	1/496	1074.	35.4	64.6	1/716	855.0	61.8	38.2	1/519	854.9	66.3	33.7	1/509
9	1065.	100.0	0.0	1/502	1294.	39.4	60.6	1/728	1023.	61.9	38.1	1/489	1023.	64.9	35.1	1/484
8	1232.	100.0	0.0	1/466	1492.	31.4	68.6	1/745	1174.	61.6	38.4	1/446	1174.	64.9	35.1	1/443
7	1377.	100.0	0.0	1/452	1667.	31.7	68.3	1/777	1305.	63.0	37.0	1/428	1305.	66.3	33.7	1/425
6	1503.	100.0	0.0	1/448	1822.	31.4	68.6	1/844	1420.	57.0	43.0	1/431	1420.	60.7	39.3	1/428
5	1611.	100.0	0.0	1/434	1957.	27.2	72.8	1/921	1518.	57.0	43.0	1/422	1518.	60.7	39.3	1/419
4	1701.	100.0	0.0	1/428	2071.	23.5	76.5	1/1063	1599.	57.0	43.0	1/418	1599.	61.0	39.0	1/417
3	1773.	100.0	0.0	1/437	2164.	21.4	78.6	1/1299	1665.	55.3	44.7	1/425	1665.	57.5	42.5	1/429
2	1828.	100.0	0.0	1/491	2238.	15.0	85.0	1/1800	1715.	56.1	43.9	1/447	1715.	58.7	41.3	1/452
1	1866.	100.0	0.0	1/933	2291.	16.8	83.2	1/3741	1750.	76.3	23.7	1/774	1750.	79.6	20.4	1/775

注) T:略算固有周期 (T=0.03h, Model-2のみT=0.025hとした), T':精算固有周期, Qi(t):層せん断力, γ:層間変形角
Qf(%):フレームのせん断力負担率, Qw(%):耐震壁のせん断力負担率, Qb(%):ブレースのせん断力負担率

5. 2次設計

保有水平耐力を検討するために、荷重増分法による静的非線形解析を行った。保有水平耐力は、ある層の層間変形角が1/100に達した時点での各層のせん断力の合計を保有水平耐力とした。保有水平耐力 $Q_u(t)$ は表-3に示すように、すべてのモデルとも必要保有水平耐力 $Q_{un}(t)$ を上回っている。また、最終のヒンジ状況の一部を図-3に示す。崩壊形式は、Model-1の梁崩壊型に対して、Model-3、Model-4はシアリンク部分がせん断降伏、あるいは曲げ降伏し、ブレースおよび付帯フレームは降伏していない。なお、Model-2は耐震壁が曲げ降伏している。

表-3 保有水平耐力

階	Model-1				Model-2				Model-3				Model-4			
	β_u	Ds	$Q_{un}(t)$	$Q_u(t)$	β_u	Ds	$Q_{un}(t)$	$Q_u(t)$	β_u	Ds	$Q_{un}(t)$	$Q_u(t)$	β_u	Ds	$Q_{un}(t)$	$Q_u(t)$
R	0.00	0.25	573.9	894.9	0.37	0.35	964.9	2067.2	0.37	0.25	558.2	1071.6	0.34	0.25	558.2	1049.3
12	0.00	0.25	861.3	1343.1	0.58	0.35	1458.9	3125.9	0.44	0.25	834.5	1602.2	0.41	0.25	834.4	1568.7
11	0.00	0.25	1105.4	1723.4	0.65	0.35	1881.1	4030.6	0.41	0.25	1068.8	2051.8	0.36	0.25	1068.7	2008.8
10	0.00	0.25	1332.2	2077.2	0.67	0.35	2264.6	4852.5	0.40	0.25	1279.5	2456.5	0.35	0.25	1279.4	2404.9
9	0.00	0.25	1540.3	2402.8	0.72	0.40	2984.8	5596.1	0.36	0.25	1467.8	2817.0	0.32	0.25	1467.6	2758.7
8	0.00	0.25	1721.5	2685.6	0.69	0.35	2917.8	6252.1	0.31	0.25	1632.1	3133.9	0.28	0.25	1631.9	3068.4
7	0.00	0.25	1879.8	2932.7	0.69	0.35	3189.8	6834.5	0.41	0.25	1775.5	3408.8	0.35	0.25	1775.3	3337.5
6	0.00	0.25	2014.4	3142.4	0.70	0.40	3914.7	7339.5	0.38	0.25	1897.7	3643.1	0.33	0.25	1897.5	3566.2
5	0.00	0.25	2126.4	3317.2	0.73	0.40	4142.3	7765.5	0.36	0.25	1999.5	3838.7	0.31	0.25	1999.3	3758.4
4	0.00	0.25	2216.7	3456.6	0.72	0.40	4329.8	8117.1	0.37	0.25	2081.7	3996.7	0.35	0.25	2081.5	3913.1
3	0.00	0.25	2285.5	3566.9	0.74	0.40	4476.6	8392.7	0.36	0.25	2144.6	4117.4	0.33	0.25	2144.4	4031.3
2	0.00	0.30	2800.0	3639.7	0.73	0.40	4583.5	8600.5	0.28	0.30	2626.2	4201.3	0.26	0.30	2625.9	4113.7

注) 柱・はりの種別は各モデルともFA、耐震壁の種別はWA、ブレースの種別はBA

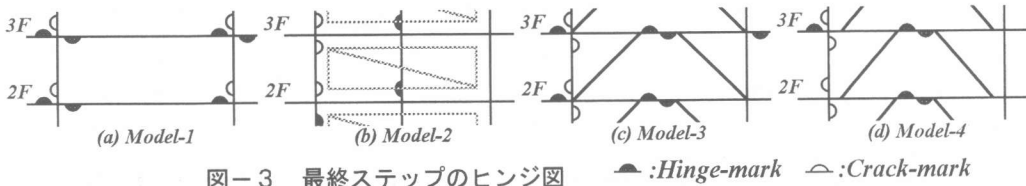


図-3 最終ステップのヒンジ図

▲:Hinge-mark △:Crack-mark

6. 地震応答解析

6.1 解析モデル

解析モデルは、基礎固定の等価せん断型の質点型モデルとし、弾塑性応答解析を行った。復元力特性は、Model-2はD-Tri(武藤)モデル、その他はN-Triモデルとした。また、減衰定数は、主たる降伏部材がRC造であるModel-2は3%、その他のモデルは、降伏部材がS造であるので2%とした。

6.2 入力地震動

入力地震動は、従来の高層建築物の設計用標準地震動を4波 (El-Centro(NS), Taft(EW), Tokyo-101(NS), Hachinohe(NS))、そして解放工学的基盤で設定された設計用標準地震動[5]に第2種地盤相当の表層地盤(代々木)の増幅特性を考慮した模擬地震動[6]を1波(Yoyogi-art)の合計5波とした。その際、設計用標準地震動の最大加速度レベルは、最大速度値がレベル1で25kine、レベル2で50kineになるように、それぞれ振幅調整し、設計用標準地震動から求めた地表面における模擬地震動は、レベル2ではそのまま用い、レベル1ではレベル2の振幅を1/2として用いた。図-4にレベル2の設計用標準地震動の疑似速度応答スペクトル($h=0.05$)を模擬地震動のそれとの比較で示す。模擬地震動のスペクトル特性は、設計用標準地震動の最大値を全周期帯にわたって包絡したような特性となっているものの、最大値のレベルとしては同程度である。また、建築基準法施行令の1次設計では、最大加速度として80~100gal程度の大きさの地震動が考えられていることから、各地震動とも最大加速度レベルを100galとした場合の応答解析も同時に行った。

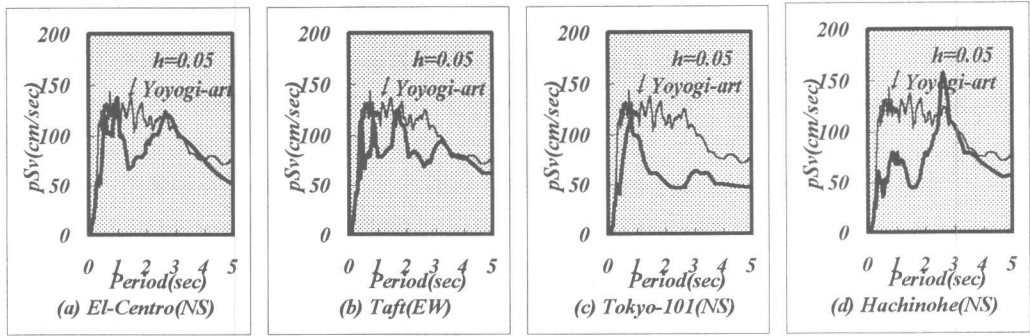


図-4 疑似速度応答スペクトル

6. 3 解析結果

変形性状を図-5～図-7に、層せん断力係数の分布性状を図-8～図-10に示す。まず、レベル1、レベル2に対する変形性状は、図-5、図-6に示すように、上層の一部を除き各モデルともクライテリアの1/200(2.0cm)、1/100(4.0cm)を満足しており、model-1との比較でmodel-3、model-4の剛性調節の効果が現れている。また、図-7の100gal入力に対しては、各モデルとも概ね1次設計時の変形以内に収まっており、100gal入力と1次設計が概ね対応していることを示している。次に、レベル1に対する層せん断力係数分布は、図-8に示すように、各モデルとも1次設計時を上回っているが、レベル2に対しては、図-9に示すように、概ね保有水平耐力時を下回っている。また、図-10の100gal入力に対しては、model-2の一部を除き各モデルとも1次設計時を下回り、変形性状と同様に100gal入力と1次設計が概ね対応していることを示している。

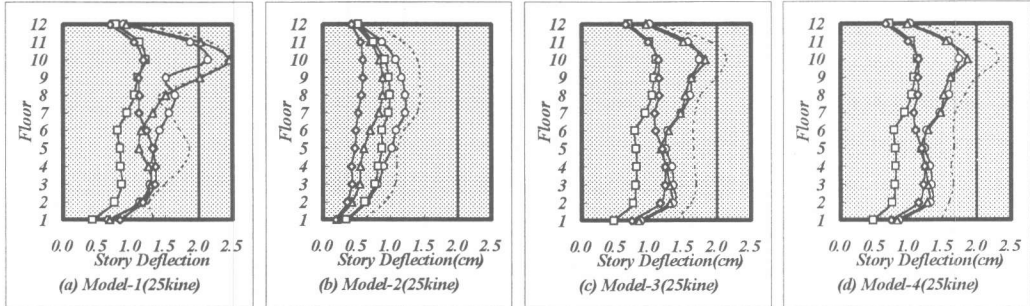


図-5 層間変形 (25kine)

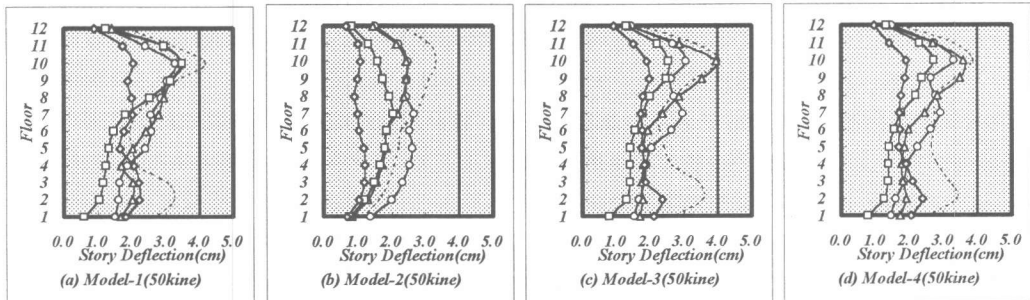
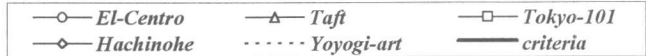
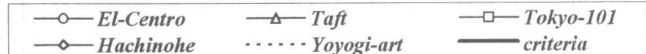


図-6 層間変形 (50kine)



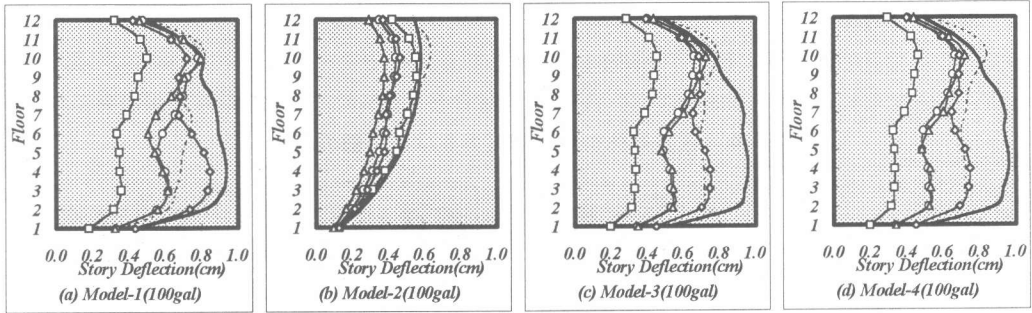


図-7 層間変形 (100gal)

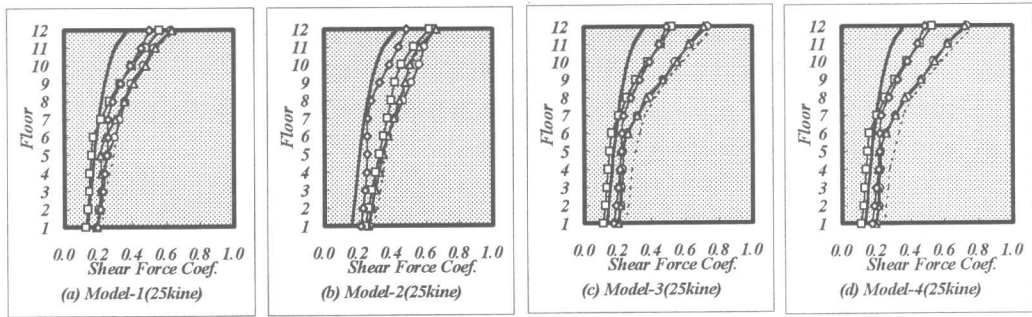
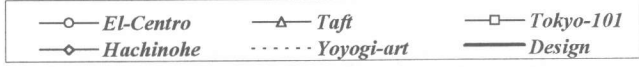


図-8 層せん断力係数 (25kine)

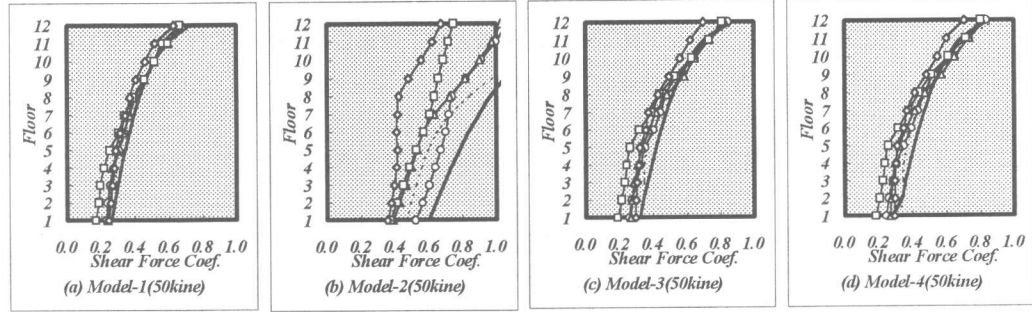
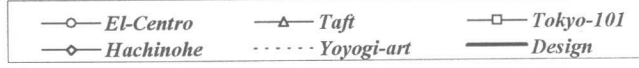


図-9 層せん断力係数 (50kine)

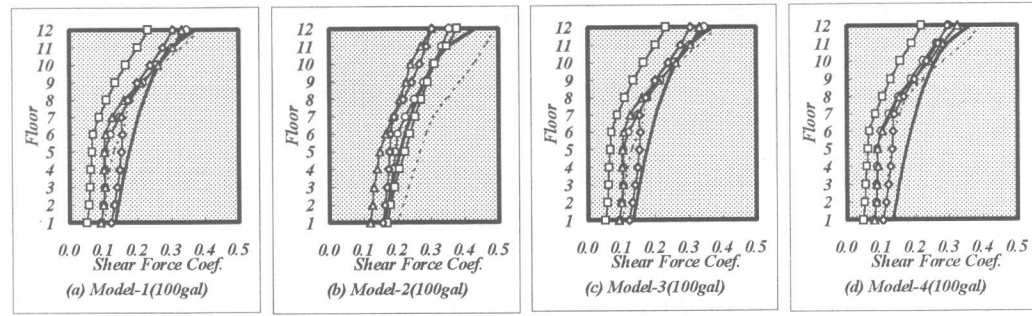
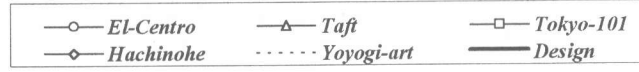
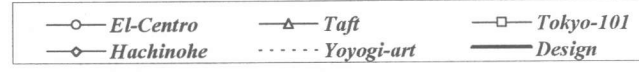


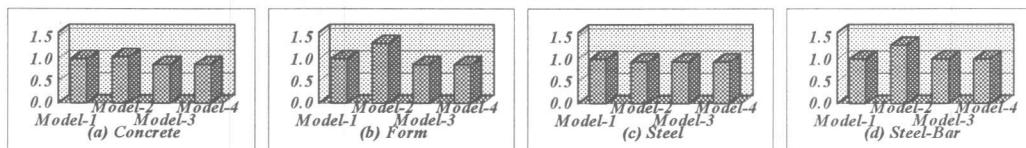
図-10 層せん断力係数 (100gal)



7. 構造躯体数量

各モデルの構造躯体数量の比較をModel-1に対する数量比率で表-4に示す。Model-2の数量低減はほとんど見られないが、Model-3,4については各項目とも10%前後の数量低減効果が見られた。

表-4 構造躯体数量比較 (対象は地上部のみ)



8. 結論

本試設計を通して、偏心K型ブレースを適用したモデルについて、以下の結論を得た。

- 1) RC耐震壁モデルが必ずしも合理的な設計になるとは限らない。
- 2) RC耐震壁に比較して、容易に剛性調節 (変形制御) が可能である。
- 3) Dsの評価について、純ラーメン構造の算定基準を準用できる可能性を示唆した。
- 4) 構造躯体数量の低減が図れた。

9. おわりに

柱RC・梁Sのハイブリッド構造に、偏心K型ブレースを適用したモデルについて、合理的な耐震設計の可能性を示唆した。しかし、ハイブリッド構造のDsの評価手法やブレース端接合部のディテールと施工性の問題、シアリンク部分の耐力の評価とブレースの座屈安全率[7]の考え方、柱・梁・ブレース接合部の応力伝達機構の解明など残された問題点が多いが、偏心K型ブレースを適用することで、柱RC・梁Sのハイブリッド構造の適用領域と設計自由度の拡大が図れると思われる。

(謝辞) 本研究は、(財)日本建築センターの「ハイブリッド構造に関する日米共同研究」におけるテーマ・ストラクチャーの試設計[4]を参考にさせていただきました。また、試設計にあたっては、フジタ建築設計部の園部、吉田の両氏の協力を得た。深く感謝します。

(参考文献)

- 1) 西山:合成構造の設計法と問題点Ⅲ-7.混合構造(柱RC+はりS),コンクリート工学, Vol.28, No.10, pp.70-76, 1990.10
- 2) 日本建築学会編:柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム, 1994.12
- 3) 藤本, 青柳, 鷗飼, 和田, 斉藤:偏心K型ブレース架構の特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第195号, pp.39-49, 1972.5
- 4) 日本構造技術者協会編:ハイブリッド構造に関する日米共同研究におけるテーマ・ストラクチャーの試設計, 1994.3
- 5) 日本建築防災協会編:臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討のうち動的設計用入力地震動の設定に関する検討報告書, 1993.3
- 6) 芳賀, 渡部, 阿世賀, 藤堂, 平澤:東京臨海部における動的設計用入力地震動の検討(その2)模擬地震動を用いた各種地盤の応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.363-364, 1991.9
- 7) 穂山, 福知, 野村, 豊島:偏心K型ブレースの耐力と変形性能に関する実験的研究(その2.実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.363-364, 1991.9