

金属製転がり支承（CRB）の開発とその適用

舟木秀尊* 川井伸泰** 舟山勇司**

1. はじめに

近年、建物に要求される性能は高度化しており大地震においても建物の損傷を防止する免震建物の需要が高まっている。その中で従来の免震部材では免震化が難しかった建物についても免震化が望まれる場面が出てきた。そこで、これらに対応する方法として金属製転がり支承（Cylindrical Roller Bearing：以下CRB）と積層ゴム系支承を併用したハイブリッド型免震構法（図-1：CRBと積層ゴム系支承の組合せ）の適用を検討した。これにより積層ゴム系支承を単独で使用する一般の免震構法に比べて建物の固有周期をより長くすることが可能となり免震性能の向上と適用場面の拡大が図れる。本報ではCRBの概要と一連の性能確認試験及び建物への適用事例について報告する。

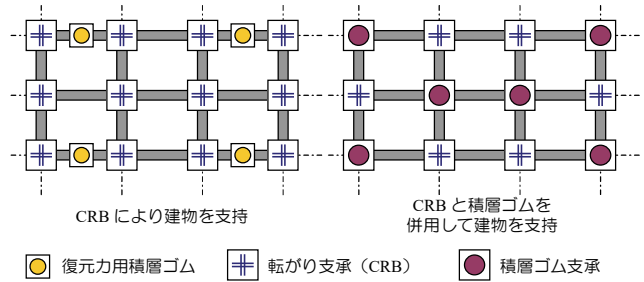


図-1 CRBと積層ゴム系支承の組合せ



写真-1 CRB支承

2. CRBの概要

金属製転がり支承であるCRBは2本のローラーとこれを挟むレールを、中間プレートを介して直交2段重ねにしており、水平面内のあらゆる方向に移動できる。高い支圧力を受けるローラーとレールには高硬度特殊ステンレス鋼を採用しており、積層ゴムと同等以上の荷重支持能力を有する。また、上・中・下段プレートの材料にはSS400を使用している。ローラーの端部にはピニオンとローラー同士を繋ぐ連結プレートを配してローラーのずれを防ぐ構造となっている。

常時の荷重が11.7 MNの支承を写真-1に、形状を表-1に示す。支承の形状は支持能力と変形能力によって決められている。転がり試験結果の一例を図-2に示す。支持機構のレールは形状が平面で復元力がないため積層ゴム系支承と組合せて建物に適用する。発生する摩擦抵抗力は摩擦係数に換算すると1/1000程度と非常に小さく、滑らかな水平移動を実現する。

表-1 CRB-11.7 MN 支承の形状

ローラー	本数(本/段)	2	
	径 (mm)	φ104	
レール	長さ (mm)	730	*1
	幅 (mm)	730	*1
上下プレート	厚さ (mm)	35	
	幅 (mm)	1000	*1
中間プレート	厚さ (mm)	70	
	幅 (mm)	1000	*1
	厚さ (mm)	175	

*1: 数値は最大変位±50cmの場合、最大±75cmまで可能

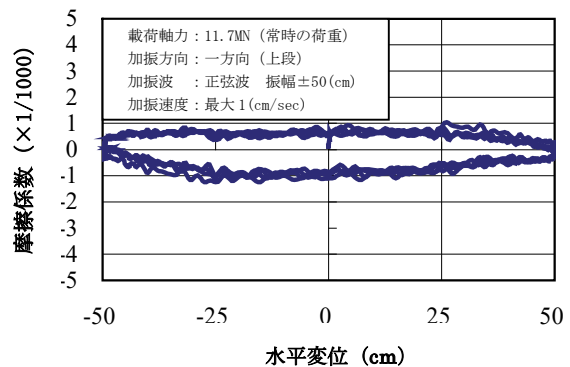


図-2 転がり試験結果 (11.7 MN 支承)

*技術研究所 **東京支社建築設計部

3. ローラー・レールの性能確認試験

3.1 接触機構

円柱を平面に押付けた場合、図-3のように接触部は最初に弾性変形を生じる。弾性範囲を超えて荷重を増加させると、まず内部のせん断応力が最大となる点Zにおいて塑性変形が始まる。さらに増加させると塑性化がこの点から広がり、荷重を除去しても支痕が残るようになる。このような状態が生じる降伏荷重は、内部において最初の塑性化が始まる荷重よりも遙かに大きいことが既往の文献¹⁾から知られている。

3.2 ローラー・レールの圧縮試験

金属製転がり支承のローラー・レールに使用する材料は、防錆を考慮すると従来より道路橋のローラー支承に用いられている特殊ステンレス鋼(C-13B)が最適である。この特殊ステンレス鋼に熱処理を行うことにより硬度を高めて支圧強度を上昇させている。

ローラー・レールの支持能力を確認するために圧縮試験を行った。試験体はローラー(直径 40mm、長さ 100mm)とその上下に位置するレール(幅 80mm、長さ 100mm、厚さ 25mm)から構成されている。圧縮試験には 2000 kN アムスラー型万能試験機を用いた。支圧力は道路橋支承便覧¹⁾により求められる許容支圧力 q_0 ($q = 20.45 \text{ kN/cm}$) を基準として、基準値のおよそ 0.7 倍

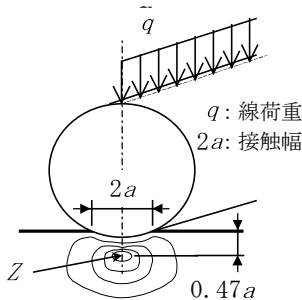


図-3 円柱と平面の接触¹⁾

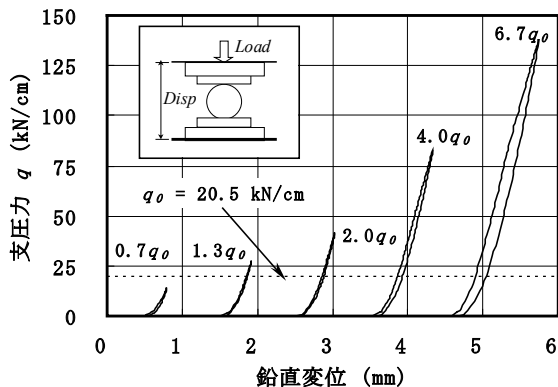


図-4 支圧力と鉛直変位の関係

～6.7 倍の支圧力を作用させた。試験の結果を図-4に示す。支圧力と鉛直変位との関係は、支圧力が許容支圧力 q_0 の4倍になっても、大きな剛性低下などは生じなかった。支圧力が基準値の5倍を超えると、若干ではあるが剛性が低下し、支圧力により降伏領域が拡大している様子が見え始めた。

3.3 ローラー・レールの転がり試験

免震部材としての金属製転がり支承に求められる機能は、支持能力と滑らかに水平移動する作動性である。そこで、水平方向に強制変位を与える転がり試験により、許容支圧力 q_0 を超える支圧力を作用させた場合の転がり摩擦係数を調べた。試験体の形状を図-5に示す。試験体は上下のレールの間に2つのローラーを設置し、それぞれを連結棒で結び間隔を保持させたものである。試験体は2体とし、所定の鉛直荷重を載荷した後、水平方向に強制変位を与え、その時に生じる水平方向の反力を測定した。所定の鉛直荷重は許容支圧力 q_0 を基準として7倍まで与えた。水平方向の強制変位は、各鉛直荷重において最大変位量±40mmとして100サイクルの繰返しを行った。転がり摩擦係数と鉛直荷重との関係を図-6に示す。鉛直荷重の増大とともに転がり摩擦係数も増加した。しかし、許容支圧力の6倍をこえる鉛直荷重を作用させた状態においても、転がり摩擦係数は 7/1000 以下であった。

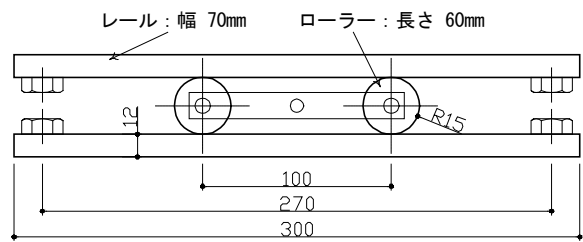


図-5 転がり試験試験体

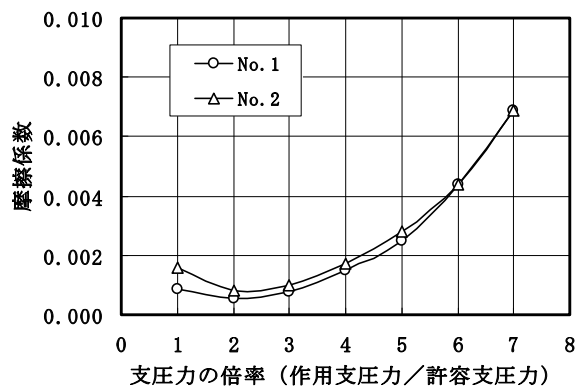


図-6 転がり摩擦係数—鉛直荷重関係

3.4 CRBの転がり試験

ローラー・レールが直交2段で構成される実機支承について作動性と基本特性を確認する目的で転がり試験を実施した。試験に使用したCRB-1.6 MN 支承の概要を図-7に示す。支承の耐力はローラー・レールの性能と支承内部の応力伝達を考慮して決定している。試験は载荷軸力が常時の荷重 1.6 MN (N_0) を基本に $0.01 \sim 2.0N_0$ 、加振方向は支承の水平軸に対して 0° と 45° 方向、加振速度は $1 \sim 50(\text{cm}/\text{s}^2)$ について実施した。1.6 MN を载荷して上下段が作動する 45° 方向の向きに加振した転がり試験結果を図-8に示す。上下段のローラーは滑らかに作動し摩擦抵抗力から換算した摩擦係数は $1/1000$ 以下であった。また、载荷軸力を 3.2 MN ($2.0N_0$) とした同様試験の摩擦係数は $3/1000$ 以下で十分に小さい値となった。一方、摩擦係数の速度依存性は確認されなかった。

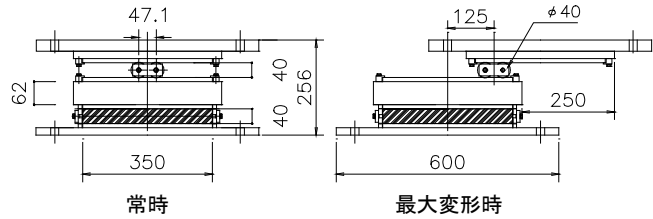


図-7 試験体の概要 (CRB-1.6 MN 支承)

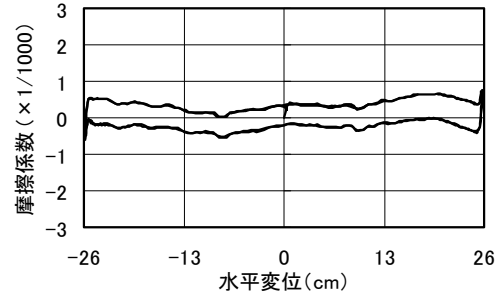


図-8 転がり試験結果 (1.6 MN 支承、 45° 方向)

4. 免震支承架台の性能確認実験

4.1 実験の概要

CRBが受ける荷重は、図-9に示すようにローラーを介して伝達されるため、支承を挟む上下の免震支承架台には集中的な線上の荷重が作用する。免震支承架台のコンクリートに対し、圧縮強度を超える支圧応力の発生が想定されたことから、支圧力に対する架台の補強方法を検討する必要が生じた。発生する支圧力に対する免震支承架台の補強方法及び耐力の関係を検討するために载荷実験を行った。

4.2 試験体

試験体は免震支承架台及びCRBを模擬したRC躯体部、取付けプレート、レールプレート及びローラープレートからなり、RC躯体部は実際に適用される免震支承の上部架台を対象とした $1/2.6$ 縮小モデルである。材料一覧を表-2に、実験因子を表-3に示す。また、試験体の概要を図-10に示す。RC躯体部の配筋はいずれの試験体も躯体中央に配した柱主筋と柱帯筋及び躯体外周部を取り囲むかご筋から構成される。試験体はかご筋量、中子筋量、柱主筋量、及びRC躯体表面の高強度グラウトモルタルの有無を実験因子とした計5体である。高強度グラウトモルタル(表-3のNo.5)は局部支圧を受ける免震支承設置表面の支圧耐力を上げる補強案で内部に溶接金網を配している。

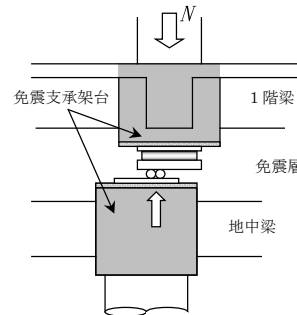


図-9 CRB設置部分

表-2 材料一覧

a) コンクリート・グラウトモルタル			
種別	対象試験体	σ_B (MPa)	E_c (GPa)
コンクリート	No. 1~5	28.6	28.6
グラウトモルタル	No. 5	63.3	22.0

b) 鉄筋・鋼板		
種別	材質	材質
鉄筋	D6	SD295-A
	D10, D16, D19	SD345
	取付プレート	PL-600×600×12
模擬ローラー	PL-400×400×40	S45C-N
レールプレート	PL-145×50×45	

表-3 実験因子

試験体	かご筋 ($\rho s1$)	中子筋 ($\rho s2$)	柱帯筋 ($\rho s3$)	横補強筋 (ρs)	柱主筋 (ρg)	高強度モルタル
No. 1	D6@100mm (0.11%)	無	D10@100mm (0.24%)	0.35%	20-D16 (1.1%)	無
No. 2	D10@100mm (0.24%)	D10@100mm (0.24%)		0.72%		
No. 3				1.18%		
No. 4	D10@50mm (0.47%)	D10@50mm (0.47%)	D10@50mm (0.47%)	1.41%	20-D16+12-D19 (2.1%)	
No. 5			D10@100mm (0.24%)	1.18%	20-D16 (1.1%)	有

・ $\rho s1 = a s1 / (B \cdot s)$ 、 $\rho s2 = a s2 / (B \cdot s)$ 、 $\rho s3 = a s3 / (B \cdot s)$: かご筋及び中子筋の補強筋比、 $\rho s = \rho s1 + \rho s2 + \rho s3$
 ・ $\rho g = a g / (B \cdot D)$: RC躯体部断面積に対する柱主筋全断面積の比
 ここに、 B, D : RC躯体部の幅、せい、 s : かご筋、中子筋、柱帯筋のピッチ
 $a s1, a s2, a s3$: 1組のかご筋、中子筋、柱帯筋の断面積
 ・ 高強度モルタル: RC躯体と支承の接地面に厚さ35mmのグラウトモルタルを敷設、溶接金網 $\phi 4 @ 50$ を配筋

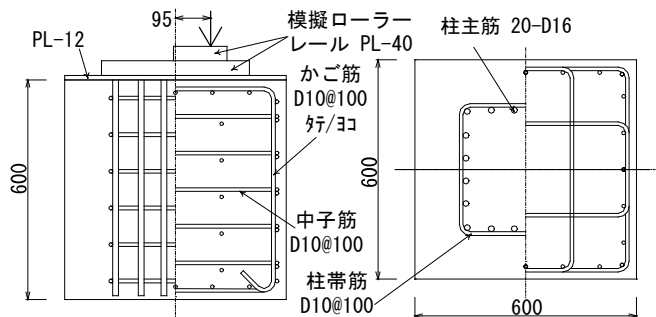


図-10 試験体の概要 (No.2)

4.3 試験方法

架台への加力は、CRB最大変位時を想定したRC躯体部に対する偏心荷重とし、模擬ローラーレールプレートを通じて10 MN 構造物試験機（圧縮試験機）による単調載荷を行った。変位量の測定項目は取付けプレート及びレールプレートにおける面外変形量とした。また、鉄筋ひずみ量の測定位置はかご横筋、中子筋、かご上面筋、柱主筋、柱帯筋とし、平面内と深さ方向について各補強筋の効果を確認できる配置とした。

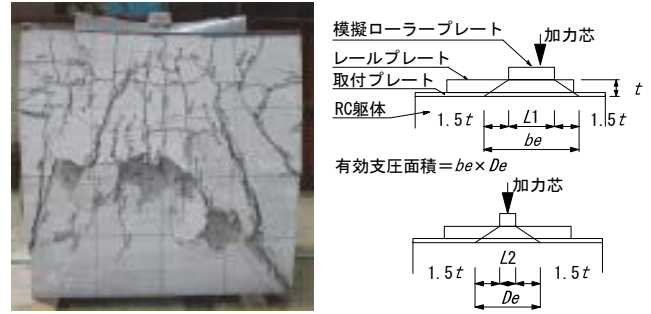


写真-2 試験後の状況 (No. 2) 図-11 支圧面積の考え方

4.4 実験結果

a. 破壊性状

各試験体ともRC躯体正面（写真-2）の加力芯近傍で1.5 MN 載荷時に縦ひび割れ（幅 0.04mm）、3.0~3.5MN 時に両側面で縦ひび割れ、3.5~4.0 MN 時に正面と側面で水平方向ひび割れが躯体上面より $H/6$ 付近（ H : 試験体高さ）で発生し、その後は徐々に本数と幅が増大した。No. 5 では、3.0~3.5 MN 時にコンクリートとモルタル界面にひび割れが発生した。破壊性状はNo. 1 が躯体脚部で圧壊し、No. 2~No. 5 は正面中央部がはらみだした。

b. 初期剛性

模擬ローラーから伝達された荷重を受けるRC表面の有効支圧面積の考え方を図-11 に示す。本報では鉛直荷重を有効支圧面積で除したものを支圧力と称している。支圧力がコンクリート強度となる1.77 MN を載荷した各試験体は加力芯近傍にヘアクラックが生じたが、図-12 に示すように鉛直荷重と鉛直変位の関係において比例限度内であった。初期剛性に着目すると横補強筋比を2倍にすることで6%程度、No. 4 のように柱主筋の内側に芯筋を配すること（柱主筋比2倍）により18%程度の剛性上昇が見られた。

c. 鉄筋の降伏と支圧耐力

鉛直荷重と鉛直変位の関係を図-13 に示す。各試験体とも柱帯筋降伏、かご筋降伏の後、剛性を急激に低下させ大きな変位を生じて最大耐力に至った。また、横補強筋（かご筋・柱帯筋・中子筋）が降伏を開始する3.3~4.2 MN を載荷した時の支圧力は、No. 1 を除いてコンクリート強度の2倍以上であった。高強度グラウトモルタルによる補強効果は殆ど見られなかった。鉄筋の降伏荷重及び支圧耐力と横補強筋比に着目すると、図-14 に示すように両者には比例関係があることがわかった。

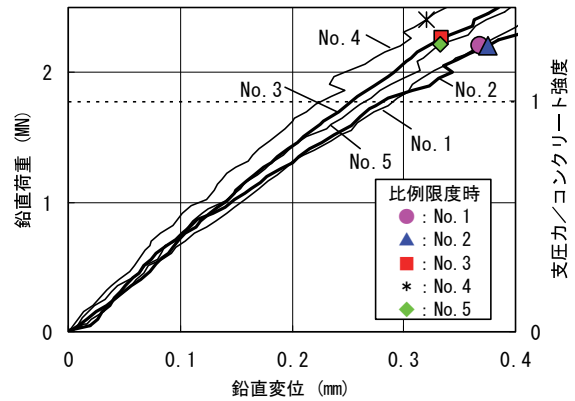


図-12 比例限度時の比較

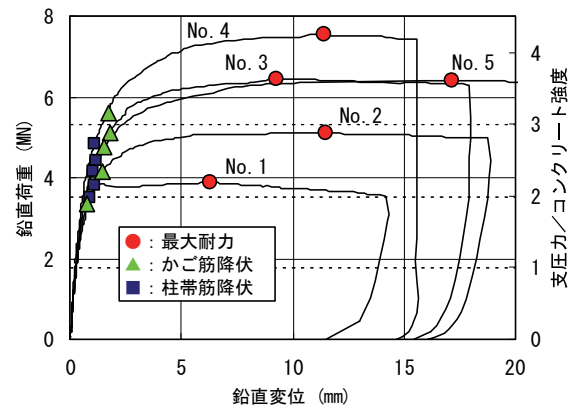


図-13 鉛直荷重と鉛直変位の関係

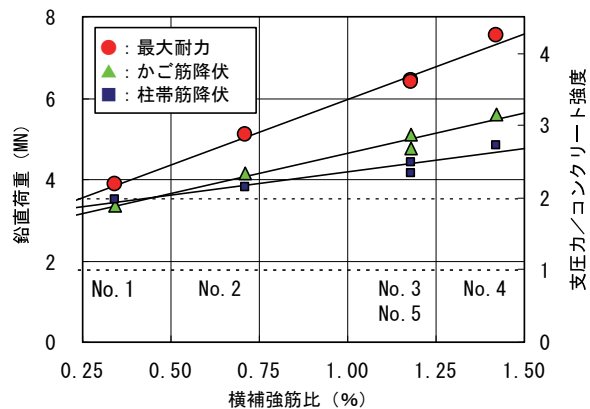


図-14 鉛直荷重と横補強筋比の関係

5. CRBの建物への適用

5.1 建物概要

CRBを適用する建物の外観パースを図-15に、建物概要の一覧を表-4に示す。対象建物は地上17階建てであり、用途は1階と2階の一部が店舗・共用スペース、2階から17階までが分譲住宅となっている。建物の平面形状はL型となっており、東棟および南棟の3スパンが接続している。構造形式はX方向およびY方向ともにRC造の耐震壁付きラーメン構造とした。

免震支承の配置を図-16に示す。免震部材には、復元力とダンパー機能を有する鉛入り積層ゴム支承（以下LRB）を11基、CRBを6基用いた。建物形状が不整形であるため、各階の偏心率はX方向で0.16~0.55、Y方向で0.05~0.38と0.15を大きく上回る値となっていた。そのため、免震層において偏心が十分に小さくなるように留意して支承を配置し（偏心率：0.012程度）、地震時における上部構造のねじれ振動の励起を防いでいる。また、敷地条件から免震支承の変形能力を±50cmとし、建物と擁壁との間隔も50cmとした。基礎構造はGL-2.25m以深の礫層（平均N値48）を支持地盤とする直接基礎とした。

5.2 免震性能

地震応答解析により建物の免震性能を調べた結果の一例を図-17に示す。検討に用いた地震波はレベル2の極めて希に発生する地震動（震度VI強~VII）であり、建設地周辺における活断層を考慮して作成した模擬地震波および観測地震波を増幅したものとした。解析の結果、建物の応答加速度は最大330~510cm/sec²の入力加速度に対して12層から上層で若干大きくなるものの、概ね1/3~1/2に低減されることがわかった。また、各層の層間変形は2~3mm程度と非常に小さな値に抑えることができた。

免震建物では、支承に引抜き力を発生させないことが設計の基本となっている。支承に作用する軸力は、地震動の水平成分による変動軸力に加えて、鉛直成分による軸力を震度0.3として求めた。検討の結果、いずれの地震波に対しても支承に引抜き力が発生しないことが確認された。また、地震波を水平方向と鉛直方向に同時に入力した解析によっても、同様の結果が得られた。



図-15 CRB適用建物の外観パース

表-4 建物概要の一覧

建築面積	760.43m ²
延べ床面積	9014.99m ²
基準階面積	553.33m ²
階数	地上17階 塔屋1階
軒高	51.05m
基礎底深さ	5.50m
構造種別	RC造
基礎形式	直接基礎（べた基礎）
免震部材	鉛入り積層ゴム（角形） 転がり支承

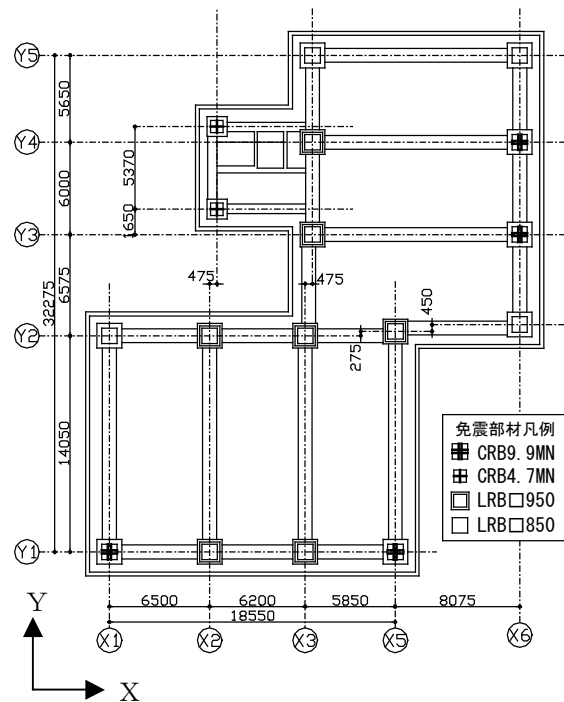


図-16 免震支承の配置

5.3 支承の組合せの検討

この建物に用いるCRBの数をパラメータとして、0、6、10、12 基を適用した場合の地震応答解析を行い、免震性能の比較を行った。免震層の相対変位が30cm 時の固有周期の比較を図-18 に示す。CRBの数を増やしてLRBの割合を減らすことで免震建物の長周期化を実現できる。実際の設計では極めて稀に発生する地震動に対して免震層の応答変位が可動範囲内となるようにCRBを6基、LRBを11基とした。

1階での層せん断力係数および支承に発生する最小軸力の比較を図-19 に示す。CRBを多く用いることにより1階における層せん断力係数は小さくなり支承に生じる最小軸力は高くなることわかった。

6. まとめ

CRBの開発に伴う一連の性能確認試験と建物への適用の結果、以下のことが確かめられた。

- i. 高硬度特殊ステンレス鋼のローラーとレールで構成されるCRBが、高い荷重支持能力を持ち、滑らかな水平移動を実現できることが実証できた
- ii. 免震支承架台の支圧耐力と横補強筋比には比例関係があることがわかった
- iii. CRBの架台に必要な補強筋量と配筋方法を概ね把握することができた
- iv. 支圧耐力は最大耐力ではなくRC躯体の破壊性状や横補強筋の降伏荷重で評価する必要がある
- v. CRBとLRBと併用することにより地震時においても支承に引抜き力を生じさせない免震建物を設計することができた
- vi. CRBをより多く用いるとともに免震層の可動範囲を広げることで、従来の積層ゴム支承では得られなかった免震効果を得ることができる

7. おわりに

今回、常時の荷重で1.6 MNから11.7 MNまで11タイプのCRBが建物に適用できるようになった。今後はCRBのさらなる高軸力化によって超高層免震への適用を目指すとともに、それに伴う風荷重対策の検討にも取り組む予定である。なお、CRBの開発はオイス工業株式会社と共同で実施したものである。

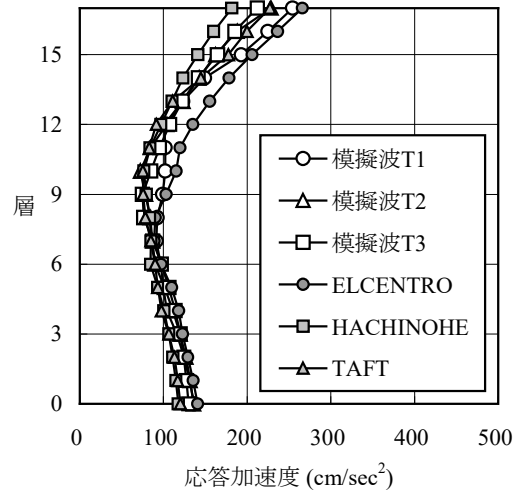


図-17 最大応答加速度の分布

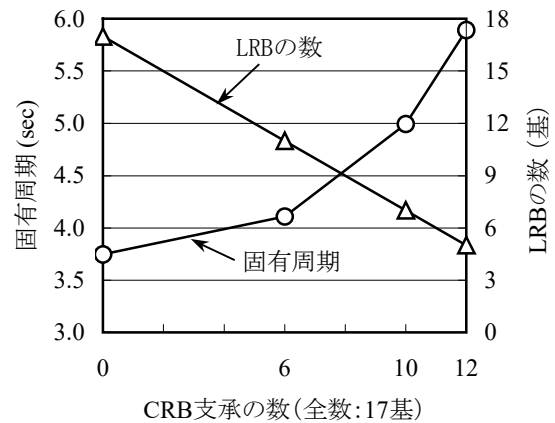


図-18 固有周期の比較

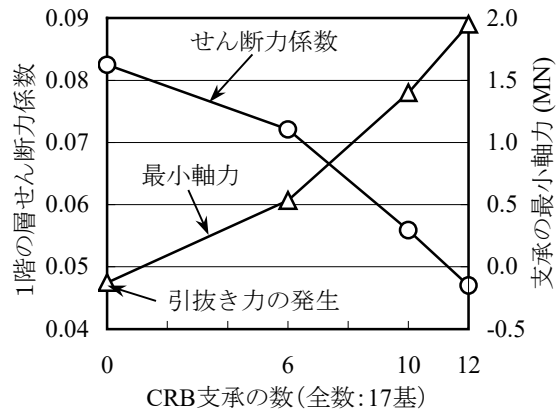


図-19 免震性能の比較

本研究にあたり、東京大学生産技術研究所・藤田隆史教授にご指導を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会、「道路橋支承便覧」、1991年
- 2) (社) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」、1987年