

## (22) 大阪モノレール支承部アンカーボルトの衝撃吸収材の研究

Shock absorbing system at anchor bolts for bearings of Osaka monorail

富山久男\*, 木部洋\*\*  
Hisao Tomiyama, Hiroshi Kibe

\*大阪府茨木土木事務所 総務企画課 (〒567-00354 大阪府茨木市中穂積 1-3-43)  
\*\*正会員 株式会社エスイー 営業技術部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-3-1)

Key Words: ( monorail, anchor bolt, shock absorber, weight-falling impact test )  
キーワード: モノレール, アンカーボルト, 衝撃吸収材, 重錘落下衝撃試験  
( monorail, anchor bolt, shock absorber, weight-falling impact test )

### 1. はじめに

大阪都市圏の鉄道網は主として放射状に形成されており、都市部では交通の過度の集中による弊害が生じる一方、周辺部では市街地の拡大により既存鉄道のサービスを受けられない地域が拡大する傾向にあった。このため、放射鉄道と有機的に結合する環状方向の鉄道の実現が持ち望まれていた。

このような状況のもと、大阪府が各方面にわたる調査検討を行った結果、環状モノレールを建設することになり、1982年から順次工事に着手し、千里中央～南茨木間が1990年に開通した。現在、大阪モノレールは、跨座式のモノレールとしては世界最長の営業距離を誇っている。

跨座式モノレールのPC軌道桁の支承は、4本のアンカーボルトで下部工に固定されている(写真-1)が、1995年兵庫県南部地震の後改定された道路橋示方書(1996年版)発刊以前に設計された箇所について、車両荷重載荷時のレベル2地震による動的解析を実施した結果、一部でアンカーボルトの耐力が不足して、PC軌道桁が転倒する危険性があることが判明した。

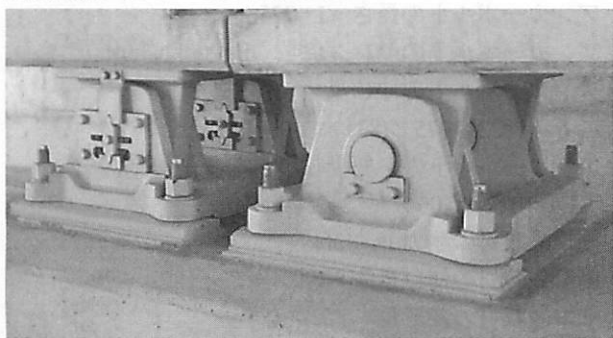


写真-1 大阪モノレールの支承

従来、支承部アンカーボルトの補強工法は、取替や増設が主流であったが、モノレールはその構造上、アンカーボルトの取替や増設には、桁のジャッキアップやコンクリートのはつり、削孔等が必要となり、モノレールの営業に支障のない運行時間外の限られた時間で工事を行うには、長期にわたる工事期間と多大な費用が発生する。また、補強が必要なアンカーボルトの本数は約1万本近くもあり、取替や増設の実施は大変困難な状況であった。

本稿では、大阪モノレールのレベル2地震時の転倒防止対策として、PC軌道桁の支承アンカーボルト部に採用した簡易な衝撃吸収材の研究について述べる。

### 2. 衝撃吸収材の設計

#### 2.1 衝撃吸収材の必要性

図-1にPC軌道桁とアンカーボルトの位置関係を示す。

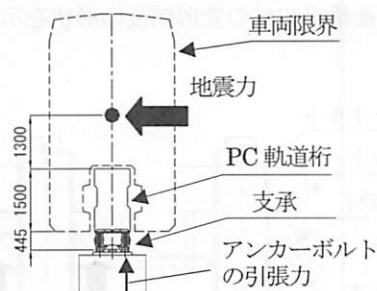


図-1 アンカーボルトに作用する荷重

モノレール車両がPC軌道桁に載ったときの重心位置

は、桁上面から 1.3m の位置にあり、走行中に軌道桁直角方向に地震力が作用した場合に、支承部に曲げモーメントが発生し、支承部アンカーボルトに引張力が発生する。この引張力よりアンカーボルトの終局耐力が不足する箇所では、PC 軌道桁の転倒を防止するための対策が必要となり、簡易な衝撃吸収材の研究が望まれていた。

## 2.2 アンカーボルトに発生する断面力

地震動による照査を以下の条件で行った。下沓と橋脚の接合部における橋軸直角方向の断面力を表-1 に示す。

橋長 L=22m

設計水平震度 (レベル 2)  $k_h c=0.90$  (I 種地盤)

(レベル 1)  $k_h=0.25$  (II 種地盤)

アンカーボルトの本数・間隔  $n=4$  本,  $L=0.6$ m

アンカーボルトの径・材質  $\phi 36$  (M36), SUS431

アンカーボルト 1 本の引張荷重  $P_u=648$ kN

アンカーボルト 1 本の降伏荷重  $P_y=490$ kN

表-1 接合部における橋軸直角方向の断面力

	N(kN)	H(kN)	h(m)	M(kN・m)
桁	269	242(67)	1.195	289(80)
添架物	16	14(4)	1.260	18(5)
活荷重	383	345(96)	3.245	1120(312)
合計	668	601(167)		1427(397)

( )内は、レベル 1 地震動の場合を示す。

アンカーボルト 1 本に作用する引張力は、

レベル 2 地震  $P=1427/(2 \times 0.6) - 668/4 = 1022$ kN  $> P_u$

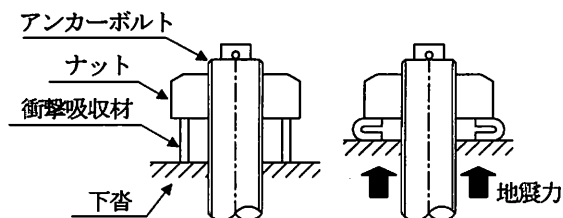
レベル 1 地震  $P=397/(2 \times 0.6) - 668/4 = 164$ kN  $< P_y$

以上より、レベル 2 地震動に対してアンカーボルトの安全性が確保できていない。

## 2.3 衝撃吸収材の要求性能と照査方法

前記の発生断面力に対して、既設のアンカーボルトは構造的に交換できないため、アンカーボルトの下沓とナットとの間に衝撃吸収材を設置して、レベル 2 地震動の荷重に対して安全な構造とする必要がある。

図-2 に衝撃吸収材の変形前後の形状を示す。



(a)変形前 (b)変形後

図-2 衝撃吸収材の形状

衝撃吸収材の要求性能と照査方法は、次のように設定した。①既設のアンカーボルトに取り付けられる構造であること。②衝撃吸収材の最大耐力はアンカーボルトの降伏耐力以下であること。③衝撃吸収材は、レベル 1 地震動および風荷重作用時では降伏しないこと。④レベル 2 地震動では許容変形量以下であること。

## 2.4 衝撃吸収材材の設計の考え方

衝撃吸収材の設計は、道路橋示方書 V 耐震設計編のエネルギー一定則を適用して設計することができる (図-3)。

すなわち、アンカーボルトが弾性構造であると仮定した場合の吸収エネルギーと衝撃吸収材の吸収エネルギーが等しくなるように非線形応答変位  $\delta_N$  が生じると仮定し、衝撃吸収材が塑性変形する荷重と変位量を設定することにした。

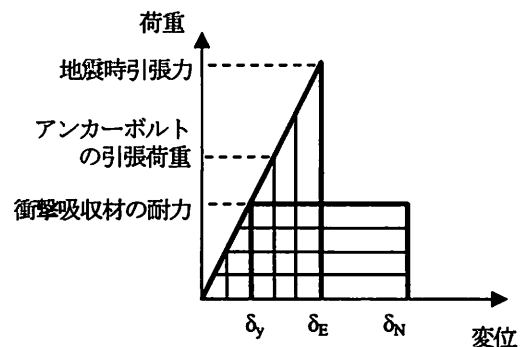


図-3 エネルギー一定則<sup>1)</sup>

## 2.5 衝撃吸収材の設計

### (1) レベル 1 地震動に対して

レベル 1 地震時にアンカーボルト 1 本に作用する引張力は 164kN である。したがって、衝撃吸収材は 164kN では降伏しないように耐力を確保する必要がある。

### (2) エネルギー吸収量および変形量

レベル 2 地震に対して、アンカーボルトの必要吸収エネルギー以上を確保するための衝撃吸収材の変形量は  $\delta_N=8$ mm 以上必要であるため、高さを 30mm 以上とした。条件を以下に示す。

アンカーボルトの長さ  $L=775$ mm

アンカーボルトのヤング係数  $E=200$ kN/mm<sup>2</sup>

アンカーボルトの伸び量

$$\delta_E = 1022 \times 775 / (831 \times 200) = 4.77$$
mm

アンカーボルトの必要吸収エネルギー

$$E_a = 1022 \times 0.00477 / 2 = 2.44$$
kN・m

衝撃吸収材の耐力  $P_s=490$ kN

衝撃吸収材の伸び量  $\delta_y=490 \times 4.77 / 1022 = 4.29$ mm

衝撃吸収材の変形量

$$\delta_N = (2440 - 490 \times 4.29 / 2) / 490 + 4.29 = 7.12$$
mm

### 3. 衝撃吸収材の試験

#### 3.1 衝撃吸収材の圧縮試験

衝撃吸収材は、強度と伸び性能を必要とするが、コストが安く市場性のある材料としてSS400相当の鋼管を使用することにした。

材料のミルシート値は引張試験での値であるため、衝撃吸収材としての使用状況と同じ圧縮試験を行い、厚さを変化させた場合の荷重・変位関係を確認した(図-4)。

寸法は外径φ59mm、高さ50mm、厚さを5.5mm、7.0mm、8.5mm、10.0mmの4種類とした。使用した材料のミルシート値の降伏点は301N/mm<sup>2</sup>、引張強さは501N/mm<sup>2</sup>である。

圧縮試験の結果を表-2に示す。厚さにより最大荷重の点が変わっているが、降伏点荷重に対してはミルシート値の1.26~1.29倍、最大荷重に対してはNo.4を除くとミルシート値の1.14~1.35倍であり、圧縮状態での使用は引張状態よりも強度が増加する傾向にある。

衝撃吸収材としては、図-3に示すように荷重が一定のまま変形するのが望ましいので、厚さ5.5~7mm程度が適しているものと思われる。

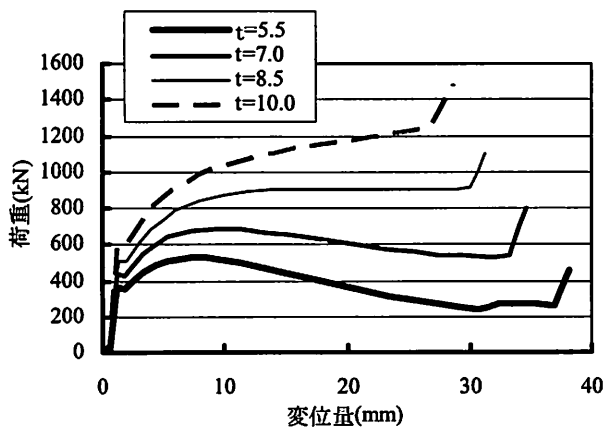


図-4 衝撃吸収材の荷重・変位関係

表-2 衝撃吸収材の圧縮試験

No.	厚さ (mm)	降伏点荷重(kN)			最大荷重(kN)		
		試験 P1 (kN)	計算 P2 (kN)	P1 — P2	試験 P3 (kN)	計算 P4 (kN)	P3 — P4
1	5.5	360	278	1.29	528	463	1.14
2	7.0	435	344	1.26	690	573	1.20
3	8.5	510	406	1.26	910	676	1.35
4	10.0	585	463	1.26	1250	771	1.62

#### 3.2 重錘落下試験

衝撃的な地震力に対する衝撃吸収材の効果を確認するため、重錘落下試験を行い、衝撃吸収材有無の比較を行った。

#### (1) 試験装置の概要

図-5に鉛直に配置したアンカーボルトに引張力を発生させるための重錘落下試験装置を示す。

アンカーボルトを固定するためのフレームとして、内側の固定フレームと外側の載荷用フレーム(上下に移動)がある。重錘を落下させるガイドの内寸法が500mmのため、固定フレームは十字型にしており、四隅の切り欠き部を載荷用フレームがスライドする構造である。

最下部に3000kNロードセルを配置し、その上にアンカーボルトの上部を固定する固定フレームを設置し、アンカーボルト下部ナットの上に載荷用フレームを設置する手順で組み立てる。

載荷用フレームの天端に重錘を落下させると、アンカーボルトの下部ナットに荷重が伝達され、アンカーボルトの引張力を固定フレームが受けて、ロードセルに圧縮力として伝える構造である。

重錘の質量は30.2kN、載荷用フレームの移動量を測定するため、下面にレーザー変位計を設置し、サンプリング速度は50μsecとした。

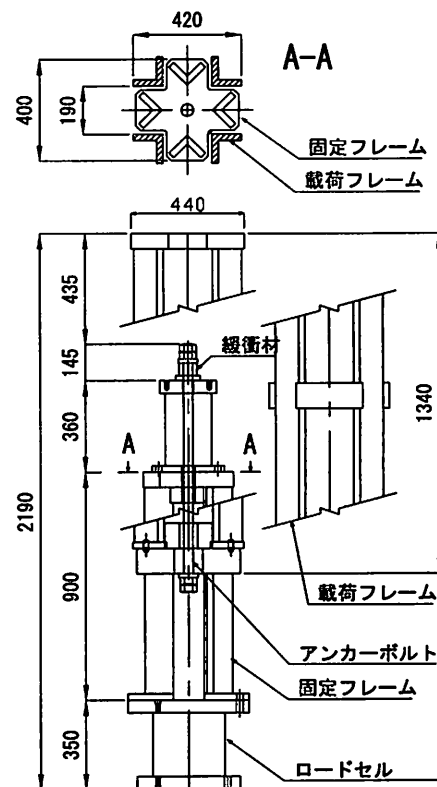


図-5 重錘落下試験装置

#### (2) 使用材料

アンカーボルトの材質はステンレス鋼棒SUS431(JIS G 4303)で、規格耐力590N/mm<sup>2</sup>、規格引張強さ780N/mm<sup>2</sup>、伸び15%であり、実験に使用した材料のミルシート値は、耐力760N/mm<sup>2</sup>、引張強さ940N/mm<sup>2</sup>、

伸び 20%である。アンカーボルトの寸法は、軸径  $\phi$  36mm (No.2 のみ  $\phi$  48mm), 全長 965mm, 固定側ねじ長 55mm, 調整側ねじ長 120mm である。

また、衝撃吸収材の材質は、汎用品で価格の安い一般構造用圧延鋼材 SS400 (JIS G 3101) 相当の機械的性質を想定しており、実験に使用した材料のミルシート値は、耐力 313N/mm<sup>2</sup>, 引張強さ 476N/mm<sup>2</sup>, 伸び 33%である。緩衝材の寸法は、外径  $\phi$  59mm, 高さは No.3 は 50mm, No.4 は 40mm とした。

### (3) 試験体の種類および落下高さ

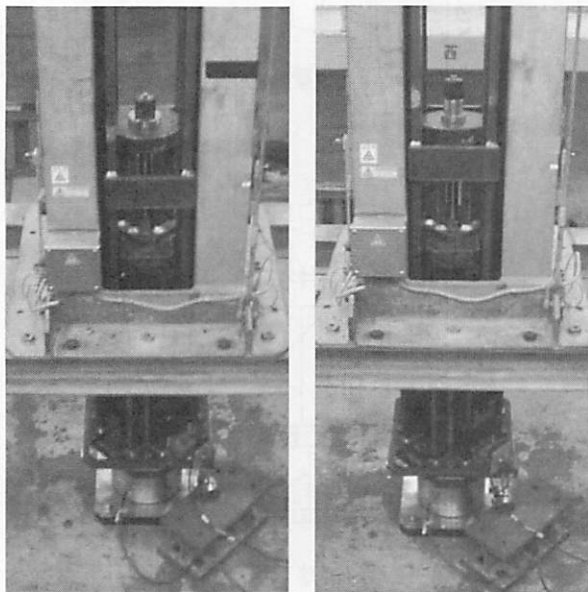
表-3 に試験体の種類を示す。事前に落下高さを決定するための試験を行い衝撃吸収材がない場合のアンカーボルトの破断する重錘の落下高さを M36 の場合は 0.9m, M48 の場合は 1.5m であることを確認している。

表-3 重錘落下試験の試験体

No.	アンカーボルト径	衝撃吸収材 (mm)	落下高さ h (m)	速度 V (m/sec)	エネルギー E (kJ)
1	M36	なし	0.90	4.20	27.2
2	M48	なし	1.50	5.42	45.3
3	M36	H=50	1.50	5.42	45.3
4	M36	H=40	1.30	5.05	39.3

### (4) 試験結果

写真-2 に試験状況, 図-6 に荷重・時間関係, 表-4 に重錘落下試験の結果を示す。



(a) 衝撃吸収材なし (b) 衝撃吸収材あり

写真-2 重錘落下試験装置

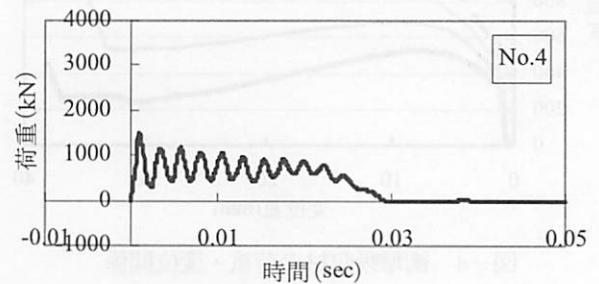
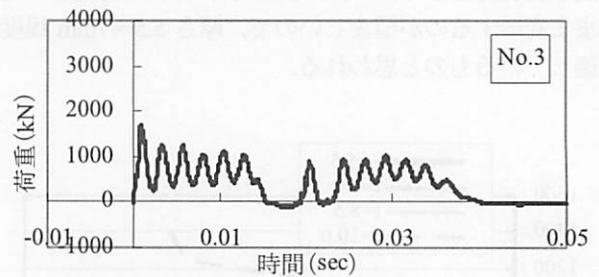
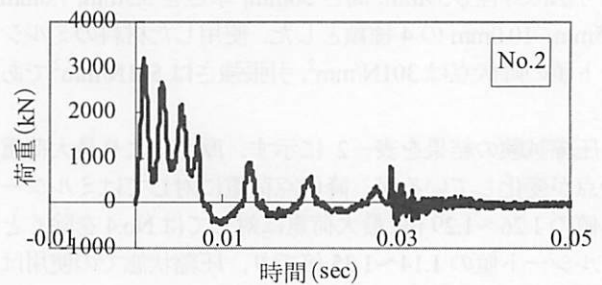
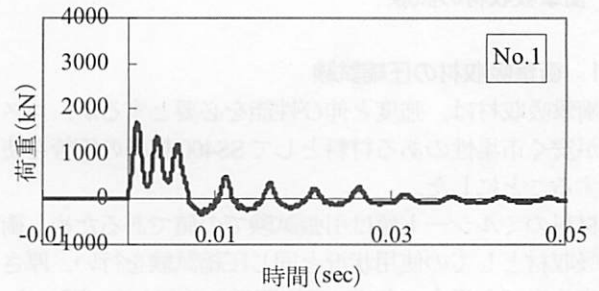


図-6 重錘落下試験の荷重・時間関係

表-4 重錘落下試験の結果

No.	アンカーボルト径	衝撃吸収材 (mm)	最大荷重 (kN)	試験後の状態
1	M36	なし	1698	ねじ部破断
2	M48	なし	3210	ねじ部破断
3	M36	H=50	1701	破断せず
4	M36	H=40	1499	破断せず

注) 速度  $V = \sqrt{2gh}$ , エネルギー  $E = m \cdot h$

- ①No.1の結果より、M36のアンカーボルトは衝撃吸収材なしでは高さ0.9mのエネルギー27.2kN・mで破断する。
- ②No.2の結果より、M48のアンカーボルトは衝撃吸収材なしでは高さ1.5mのエネルギー45.3kN・mで破断する。
- ③No.3の結果より、M36のアンカーボルトに衝撃吸収材(H=50mm)を設置すると、高さ1.5mのエネルギー45.3kN・mでも破断しない。
- ④No.4の結果より、M36のアンカーボルトに衝撃吸収材(H=40mm)を設置すると、高さ1.3mのエネルギー39.3kN・mでも破断しない。

以上のことから、M36のアンカーボルトに衝撃吸収材(H=40mm)を設置することで、約1.44倍以上の荷重に対して破断しないことが確認できた。

### 3.2 繰返し载荷試験

#### (1) 試験概要

繰返し载荷試験では、実橋の支承に近似した荷重形態での衝撃吸収材の破壊形態・効果を確認すると共に、解析に使用する履歴モデル作成のためのデータを採取することを目的とした。試験体の種類は、内径、厚さ、高さの影響を確認するため、7種類とした(表-5)。

表-5 試験体の種類 (mm)

No.	1	2	3	4	5	6	7
内径	45	45	45	55	63	63	63
厚さ	6	6	6	6	4	5	6
高さ	30	40	50	40	30	30	30

試験装置は、反力床に台座を固定し、実橋を想定したアンカーボルトの配置間隔になるように支柱を決定して設置した。アクチュエータ(1000kN)により、支柱の水平方向に繰返し载荷し、アンカーボルトの軸力(1000kNロードセル)とベースプレート変位の変化量(変位計)を計測した(図-7)。

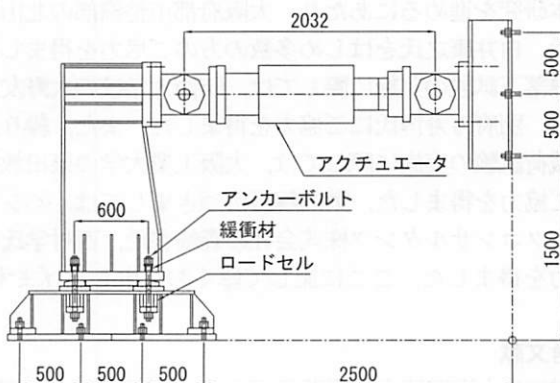
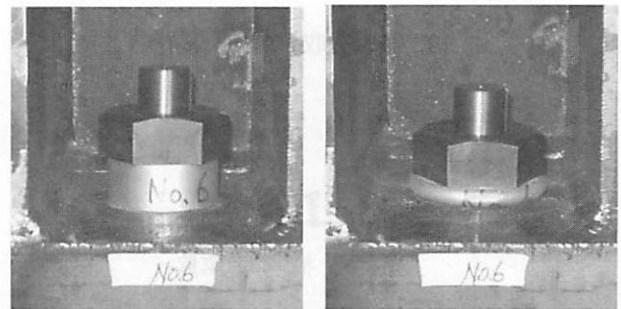


図-7 繰返し载荷試験装置

### (2) 実験結果

写真-3 に試験前と試験後の衝撃吸収材の状況(No.6)を示す。図-8 に示す衝撃吸収材の荷重・変位関係では、最初は剛性が大きい、衝撃吸収材が降伏した後はほぼ一定に変位のみ増大する。途中でアクチュエータのストロークを0に戻し(2)(4)、再度载荷すると(3)(5)、除荷した時の変位までは荷重を受けていないが、それからまた荷重が増加し始めるといった状況が確認できた。



(a)試験前 (b)試験後  
写真-3 衝撃吸収材の状況 (No.6)

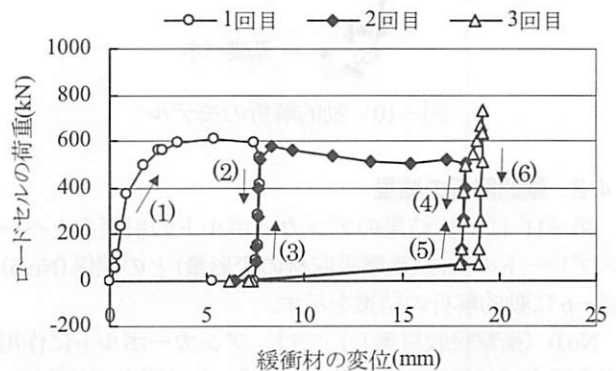


図-8 衝撃吸収材の荷重・変位関係 (No.6)

## 4. 解析シミュレーション

### 4.1 モデル化

繰返し载荷試験で得られた衝撃吸収材の履歴特性(引張力-変形特性)をモデル化(図-9)し、レベル2地震動に対する支承部アンカーボルトの安全性を動的解析により検証した。

解析モデルは、図-10に示すように車両・桁・支承部(簡易モデル部)とし、支承部アンカーボルトは衝撃吸収材の履歴特性を有した非線形バネでモデル化した。入力地震動は、道路橋示方書に示されるレベル2地震動タイプII-II種地盤の波形<sup>1)</sup>を用いた。

- K1: アンカーボルトと衝撃吸収材の軸方向合成バネ
- K2: 衝撃吸収材降伏後のバネ (K2=0)
- Kb: アンカーボルトの軸方向バネ
- P1,P2: 衝撃吸収材の降伏荷重

δ1：衝撃吸収材が降伏するときの変位

δ2：衝撃吸収材の許容変位

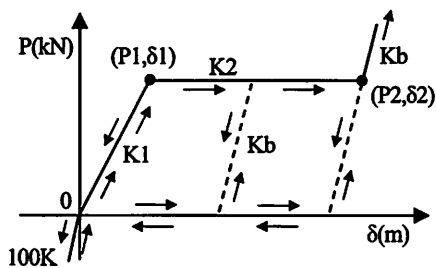


図-9 衝撃吸収材のモデル化

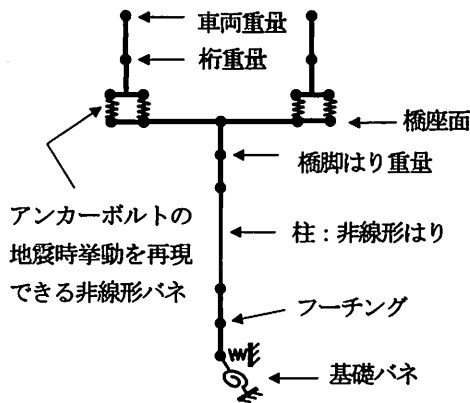


図-10 動的解析のモデル

#### 4.2 動的解析の結果

図-11 に解析結果のアンカーボルトの引張力とベースプレートの変位(衝撃吸収材の変形量)との関係(No.6)、表-6 に動的解析の結果を示す。

No.0 (衝撃吸収材無し) では、アンカーボルトに作用する反力(1068kN)がアンカーボルトの耐力(660kN)を超えており、破断する危険がある。No.1~6 (衝撃吸収材材の高さと厚みを変化させたもの) ではアンカーボルトに作用する反力はアンカーボルトの耐力以下であり、アンカーボルトの安全性が確認できた。

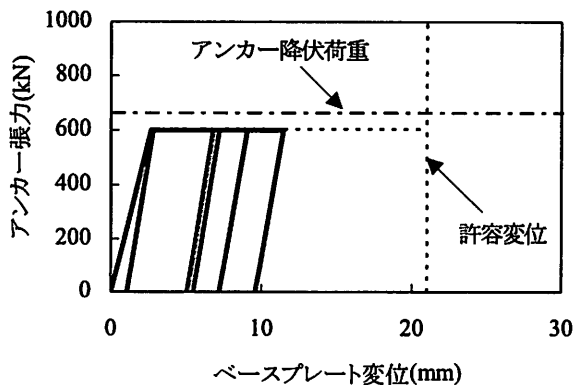


図-11 引張力と変位の関係 (No.6)

表-6 動的解析の結果

No.	最大反力 P (kN)	最大変位 δ (mm)	アンカー耐力 Pa (kN)	許容変位量 δa (mm)	判定 $P \leq Pa$ $\delta \leq \delta a$
0	1068	2.1	660	—	NG
1	604	11.0	660	18.5	OK
2	551	10.5	660	27.2	OK
3	573	9.7	660	39.5	OK
4	634	11.4	660	29.2	OK
6	594	11.1	660	21.1	OK

注) No.1~No.6の衝撃吸収材履歴は、表-5の番号と同じ

#### 5. まとめ

本研究では、跨座式モノレールの支承部アンカーボルトが、レベル2地震動で降伏・破断するのを防止するため、アンカーボルトのナットと支承ベースプレート間に設置する衝撃吸収材について、重錘落下試験および繰り返し載荷試験を行った。さらに、非線形動的解析も行った。以上の試験・解析から得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 重錘落下試験および繰り返し載荷試験により、衝撃吸収材のエネルギー吸収効果を確認できた。
- 2) 解析シミュレーションにより、衝撃吸収材を設置すると、レベル2地震時にアンカーボルトの降伏および破断を防止することができることを確認できた。
- 3) 衝撃吸収材の材料として、汎用品であるSS400相当の鋼管を使用できることを確認できた。

衝撃吸収材の設置工事は、桁のジャッキアップやアンカーボルトのはつり作業等、大規模な工事を必要としない。また、ナット部分を交換するだけなので、短時間で多数のアンカーボルトを補強できるため、工期短縮と工事費の削減が可能である。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、大阪府都市整備部の北山明生氏、白井康之氏をはじめ多数の方のご尽力を頂きました。重錘落下試験の実施に際しては、防衛大学の大野友則教授、別府万寿博氏にご協力を頂きました。また、繰り返し載荷試験の実施に際しては、大阪工業大学の栗田教授にご協力を頂きました。動的解析につきましては、パシフィックコンサルタンツ株式会社の森崎啓氏、西村学氏に協力を頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002.3