

ここで、 u_{RG} は落橋防止装置が作動し始める遊間（以下、ケーブル遊間という）であり、 u_1 、 u_2 はPCケーブルの第1降伏点、第2降伏点、 k_1 、 k_2 は第1降伏点の前、第2降伏点の前の剛性である。PCケーブル型落橋防止装置では、徐荷時の復元力は0となるが、ここでは解析プログラムの制約上、式(3)と同じ復元力を持つ非線形弾性型の履歴を仮定した。本解析では、落橋防止装置を桁の両端に1組ずつ取り付けるものとし、桁1の重量（13534kN）の1.5倍に相当する水平力に耐えられるように、式(3)の第2降伏点の耐力 $P_{Ru} = k_{R1}u_1 + k_{R2}(u_2 - u_1)$ を8068kN（1組）とし、第1降伏点の耐力 $k_{R1}u_1$ はこの約90%とした。

桁は鋼製支承によって支持されているが、強震動下では支承は破壊されたと考え、その後は摩擦型の抵抗力が桁に作用すると仮定した。摩擦係数は0.1とした。

斜橋には、兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録のNS成分、EW成分をそれぞれ橋軸方向、橋軸直角方向に作用させた。

3. 衝突と落橋防止の装置の作用による斜橋の基本的な振動特性

斜橋は非常に複雑な振動応答を示すが、このうち斜橋の回転を支配するものとしては、次の3種類の作用がある。

(a) 衝突力による回転

図-3に示すように長さ l 、幅 d の斜橋の端部に衝突力が作用した場合に斜橋の重心に生じるモーメント M_I は、

$$M_I = I_A e_A + I_B e_B \quad (4)$$

ここで、 I_A 、 I_B は鋭角端および鈍角端に作用する衝突力の大きさであり、 e_A 、 e_B は重心から I_A 、 I_B を延長した線分までの長さである。

(b) 落橋防止装置の作用力による回転

ケーブル式の落橋防止装置を考え、図-4に示すように鋭角端側と鈍角端側にそれぞれ各1本ずつ計2本を支承線直角方向に設置した場合（以下タイプIと呼ぶ）と橋軸方向に設置した場合（タイプII）を考える。図-5に示すように落橋防止装置が作用した場合に、斜橋の重心に生じるモーメント M_{RI} はタイプIの落橋防止装置では、

$$M_{RI} = -(R_A e_A + R_B e_B) \quad (5)$$

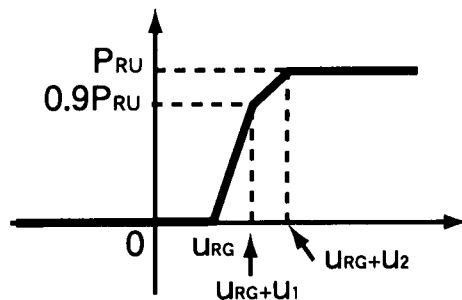


図2 落橋防止ケーブルの荷重変位曲線

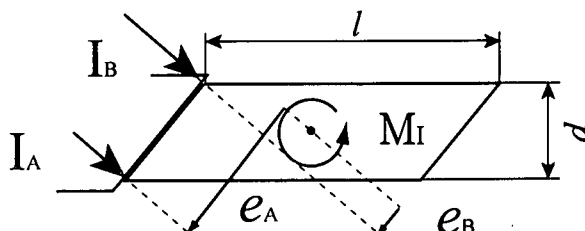


図3 衝突によって生じる回転モーメント

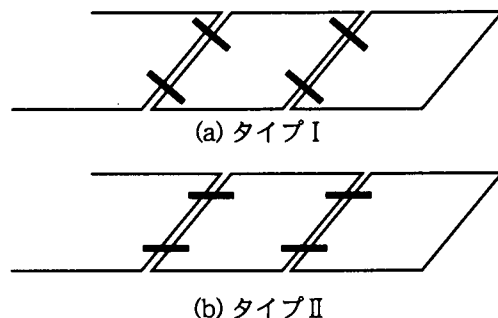


図4 落橋防止装置の設置方向

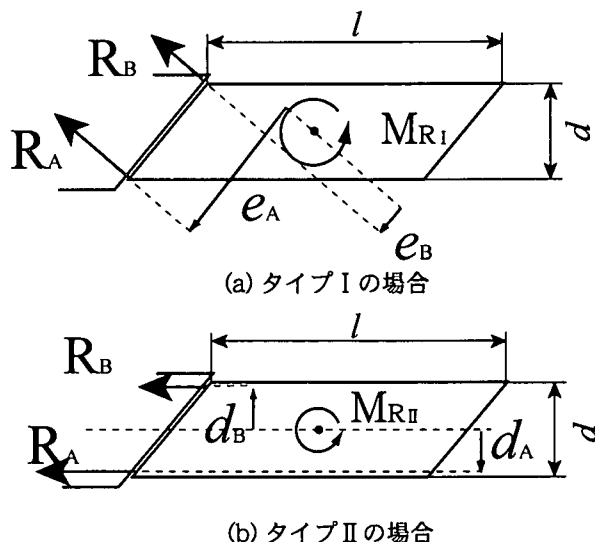


図5 落橋防止装置に作用する水平力によって生じる重心位置に作用する桁の回転モーメント

ここで、 e_A 、 e_B は式(5)で与えられる偏心距離である。一方、タイプⅡの落橋防止装置では、重心に作用するモーメント M_{RII} は、

$$M_{RII} = -(R_A - R_B)d/2 \quad (6)$$

ここで、 R_A 、 R_B は鋭角端、鈍角端側に作用する落橋防止装置からの水平力である。

(c) 剛性の異なる下部構造間の弱軸方向に生じる 応答変化の差による回転

図-6に示すように、斜橋が剛性の異なる橋脚、橋台によって支持されている場合には、橋脚と橋台の応答変位の違いにより、回転が生じる。いま、図-6に示すように、橋脚、橋台とも弱軸方向、すなわち、支承線直角方向にそれぞれ u_p 、 u_A だけ振動するとし、桁は橋脚、橋台と橋軸方向には拘束されておらず、支承線方向には自由であるとする、桁には、

$$\theta = (u_p - u_A) \cos \theta / l \quad (7)$$

の回転角が生じる。前述したように、本解析では強震動を受けて、支承が破断し、桁と橋脚や橋台間の拘束は摩擦力によって表されると仮定しているため、必ずしも式(9)の通りとはならないが、弱軸方向への橋台と橋脚の応答変位の違いは斜橋に回転を与える。

4. 落橋防止装置を設けた場合の桁の振動

タイプⅠの落橋防止装置を取り付けた場合の最大応答付近における桁の動きを示した結果が図-7である。ここでは、桁の外周面の形状のみを示し、また、幾何学的な寸法に比較して応答変位を20倍に拡大して示している。このため、桁と橋台間や桁間の間隔は実際の状態とは一致なくなっている。桁には並進運動の他、回転も生じており、これを示した一例(桁遊間およびケーブル遊間がともに5cmの場合)が図-8である。これによれば、地震動が作用し始めると桁1は橋台1側に並進振動し、1.99秒(図7(1)点)において左端が橋台1と衝突する。図3のメカニズムにより、桁は反時計回りに回転し始め、桁が橋台1から離れる方向に運動する。反時計回りに回転しているため、左端鋭角端側では1.99秒から2.00秒と短時間にしか衝突が継続しないのに対して、左端鈍角端では1.99秒から2.13秒と比較的長く衝突が継続する。最大衝突力は鋭角端、鈍角端ともに約6000kNである。

これにより、桁1は反時計回りの回転と同時に、橋台1から遠ざかる方向に運動し、橋台1からの離隔がより速く進む左端鋭角端側では、2.28秒(図7

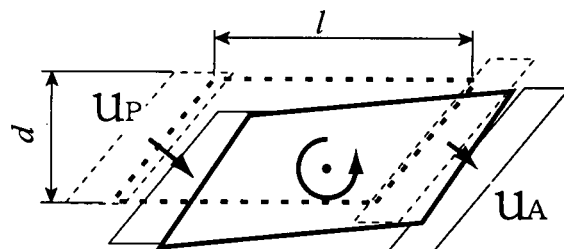


図6 橋脚と橋台の変位が異なるために桁が回転するメカニズム

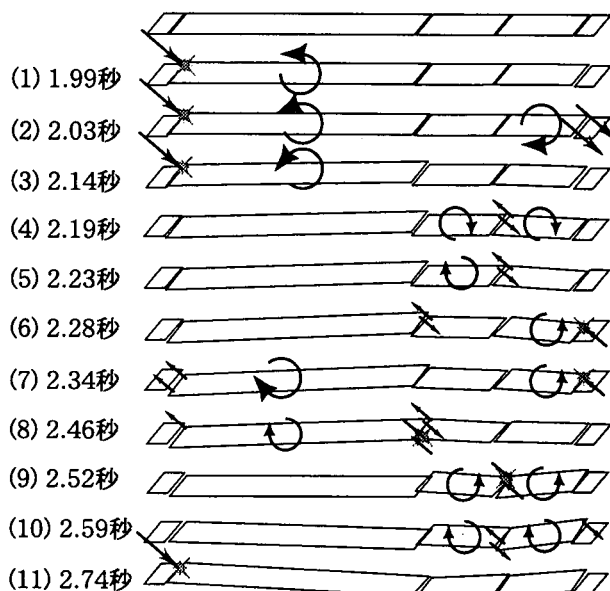


図7 斜橋の応答

(6)点)から、次に左端鈍角端側では2.34秒(図7(7)点)から、それぞれ、2.39秒、2.59秒まで落橋防止装置が作動する。落橋防止装置に作用する最大水平力は、鋭角端側では3800kN、鈍角端側では7500kNである。このため図-4に示したメカニズムにより、桁の回転方向は時計回りに変化していく、なお、左端鈍角端側で落橋防止装置が作動した2.34秒にはこれと同時に、右端鋭角端側において桁2の左端鈍角端側との間の落橋防止装置が作動し約2300kNの引張力が作用した。さらに2.46秒(図7(8)点)から2.52秒にかけて、右端鈍角端側で桁2の左端鋭角端側と衝突し、約11000kNの衝突力が作用した。これらはともに桁の時計回りの回転を加速させ、これによりやがて2.74秒(図7(11)点)において左端鈍角端が橋台1と衝突し、最大12000kNの水平力が作用した。これにより、桁は、再び反時計回りの回転を生じるようになる。

5. タイプⅠおよびタイプⅡの落橋防止装置の有効性

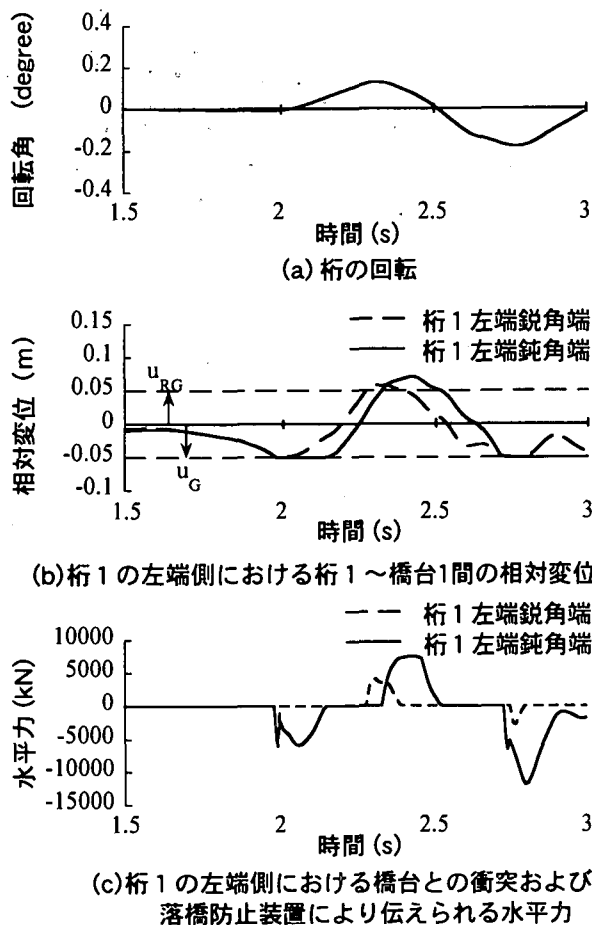


図8 桁1に生じる回転とこれを引き起こす衝突力および落橋防止装置の作用力

以上のようにしてタイプI、タイプIIの落橋防止装置を取り付けた場合の桁の回転を求めた一例 ($u_G = u_{RG} = 5\text{cm}$ の場合) が図-9である。タイプIIの落橋防止装置を用いた場合には、正側、負側ともに15度の回転が桁に生じているが、タイプIの落橋防止装置を用いた場合には、ほとんど負側の回転は生じていない。これは、アーム長 $d/2$ が短いため式(8)による回転モーメント M_{RI} が小さく、このため、図-5に示した落橋防止装置による時計回りの回転が小さく、図3に示した衝突による反時計回りの回転が卓越するためである。

図-10は支承線方向および支承線直角方向に生じる桁の最大応答変位を示したものである ($u_G = u_{RG} = 5\text{cm}$ の場合)。桁の変位は全体として、タイプIIの場合の方がタイプIよりも大きい。

6. 結論

(1) 斜橋の回転を拘束するためにPCケーブル式落橋防止装置を設置する場合には、タイプIのように設置する方がタイプIIのように設置するよりも効果がある。

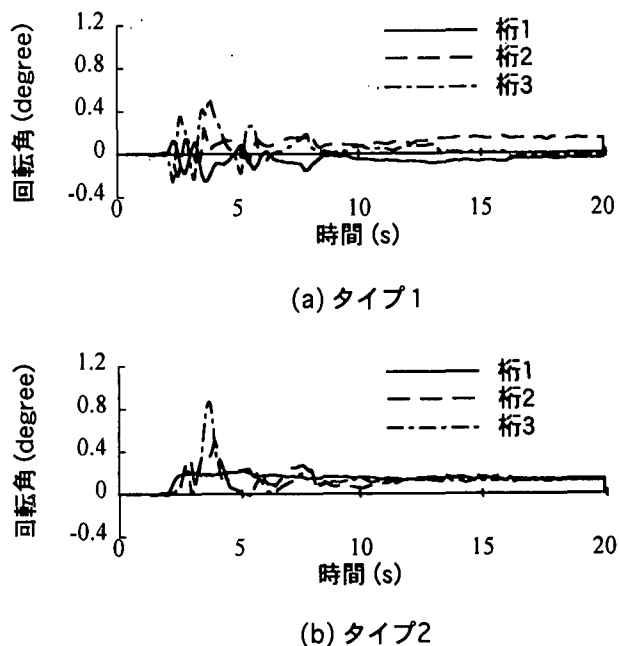


図9 桁の回転角

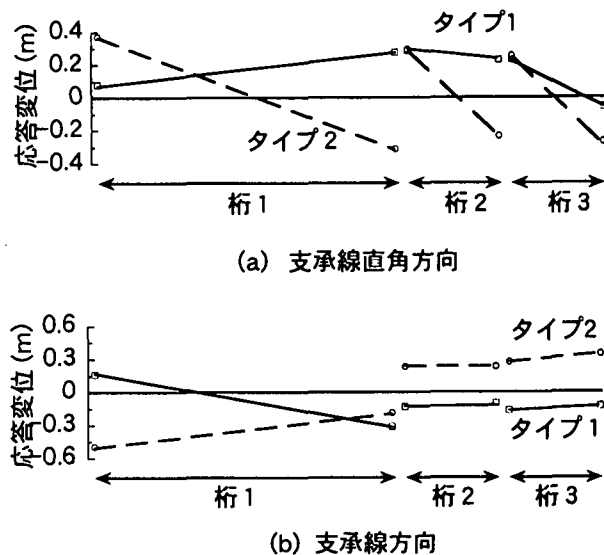


図10 桁の応答変位

(2) 桁中間掛け違い部における桁の変位を抑制するためには、タイプIIのように桁間を連結する落橋防止装置を設置してもその効果は限定される。

謝辞：本解析の実施に際して、(株)ピー・エスの武村浩志氏(元、東京工業大学土木工学科研究生)に大変お世話になりました。

参考文献

- 1) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察，土木学会論文報告集，第308号，pp.123-126，1981.4.