

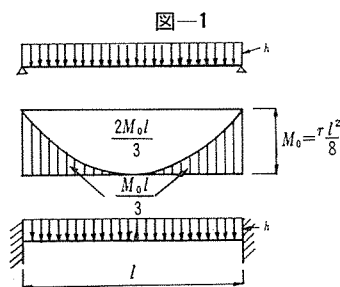
名田橋の設計に対する私見

上記報告の 10. 討議の (2) (本協会誌 Vol. 3, No. 1, p. 17) の問題について、最近筆者自身も検討することがあったので、ここにその結果と、この種の新しい橋梁型式に対する私見を發表させていただきます。

鉄筋コンクリート桁橋が長大スパンに使われなかった大きな理由の一つは、スパンが大きいほど自重がまして、死荷重曲げモーメントが活荷重曲げモーメントより大きくなり不経済になったためであり、この点でプレストレスの利用によりコンクリート橋の自重が減じたことはコンクリート桁橋のスパンをますのに大いに貢献したと思われる。しかしながら P C 橋でもスパンが大きくなると、やはり自重の増大が問題になってくる。単純ばかりでは、スパン中央で最も大きな抵抗断面を必要とし、死荷重曲げモーメントに影響の大きい径間部の自重が重くなる欠点があるので、スパンの大きいものほど、支点上に負の曲げモーメントを生じる連続ばかり、ゲルバー型式が有利になってくる。この意味で、スパン中央の曲げモーメントが 0 になるこの種のカンティレバー橋は、桁橋のなかでは最も合理的な、長スパンに適した橋梁型式といえよう。

等分布活荷重により生じる最大曲げモーメントの大きさは、スパンの同じ場合には、カンティレバー橋 (支点上) で単純ばかり (スパン中央) でも同じだが、曲げモーメント分布曲線の面積では、図-1 にみるように単純ばかりの $\frac{2M_0l}{3}$ に対して、カンティレバーでは $\frac{M_0l}{3}$ となり、半分である。理論的には曲げ強度できまる桁材料の量は、この面積に比例するわけであり、この点からいっても、カンティレバー橋は単純ばかりに比して有利といえよう。片載活荷重により橋脚に生じる曲げモーメントは上記報告にもあるように、地震時に生ずる曲げモーメントよりも小さい。

上記報告にも述べているように、死荷重では下部構造に曲げモーメントを生じない点で、1 径間ラーメン橋などにくらべてはむしろ安全であり、また井筒の断面二次モーメントが橋脚のそれにくらべて非常に大きいので、



井筒の弾性変形の影響はきわめて少ないが、井筒自体の地盤内での固定が完全でない場合には、たとえ井筒が完全剛であっても回転変位を生じるので、これについて検討してみることにする。これは次の理由から決して無駄ではないと思われる。

a) この種のタイプが適している長大橋の架設地点の地盤が必ずしも堅固でなく、むしろ軟弱地盤の場合の方が多いと思われること。

b) 井筒施工時に周囲の地盤を乱すことを心配すれば、施工いかによっては井筒の地盤内の固定が不完全なことも考えうる。

c) 土質の種類によっては地震時に常時と同じ地盤の固定度を考えてよいか疑問がある。

d) 鉄道橋では橋脚の片側径間にだけ活荷重が満載されるケースが常時考えられ、井筒にかなり大きい曲げモーメントが左右交互に作用する。この曲げモーメントの大きさは、ラーメンの場合よりも大きい。

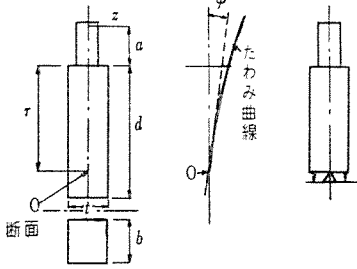
以下に述べる計算は地盤の固定度が完全でない場合の影響を概要検討するために行なったものであり、計算を簡単にするため、かなり大胆な仮定をおいているが、大体の傾向をつかむためには、これでも十分だと考える。また井筒の固定度が定量的にはっきりわかっていない場合に、他の計算をあまりに正確にすること自体が無意味でもある。

以下の計算では、活荷重と地震とに分けているが、道路橋では片載荷重の量も少なく、また作用する確率も低いので、活荷重の場合を検討する必要はあまりないと思われる。これはおもに鉄道橋を対象にしたものと考えていただきたい。

1. 井筒の固定度

井筒の固定度は簡単に次のように考えることにする (図-2 参照)。すなわち井筒にモーメントが作用するとき、井筒は点 O を中心に回転する。回転角 ϕ は点 O に関するモーメントの量、図-2 では $\alpha \times (a+r)$ に比例するものとし、単位曲げモーメントが作用して生じる回転角を θ ラジアンとする。以下の計算ではこの固定度を 図-2 右のように O にあるバネであらわし、O より上で井筒は free だとする。すなわち周囲の地盤が井筒の回転

図-2



に対して抵抗することはバネによって考えるが、Oより上にある地盤が井筒の弾性たわみを減ずる影響は無視したことになる。井筒が剛なほど、地盤が軟かいほど、このように仮定

したことによる誤りは小さくなる。

Oの位置は井筒の剛度と地盤の堅さなどにより決るわけだが、一般にその深さは井筒の根入れの8割以上の所にあるようである。θは抵抗土圧の大きさに関係し、井筒断面寸法の大きいものほど、地盤の堅固なものほど小さい。θの値は正確にはその地盤のk値、井筒の寸法、根入れ深さによって求めるべきであろうが、ここでは大体の傾向をしることが目的なので、表-1に示す測定結果からθの値の範囲を推定することにする。ここにあげ

表-1 θの測定例(白石氏論文より抜すい)

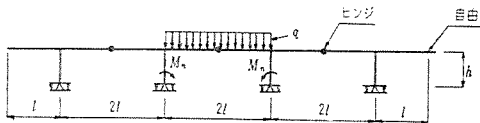
例	場 所	地 盤	井筒断面 (m)	a (m)	d (m)	r (m)	z (t)	$M_0 = z(a+r) \times 10^{-5}$ (t·m)	$\frac{\phi}{\text{rad}} \times 10^{-5}$	$\frac{\theta}{\text{rad}} \times 10^{-8}$
1	山陽本線 吉井川橋梁	砂混り小砂利 粘土混り小砂利	だ円 b=7.4 t=5.7	6.3	11.0	8.7	30	450	3~3.5	6.7~7.8
2	川崎火力 発電所ケーソン	0~9m 砂質ローム 9~20m 軟粘土 20~27m 砂質ローム	矩形 b=4.0 t=8.0	0	27.0	24.0	200	4800	2.3	0.5
3	大阪環状線 安治川 6ポット沈下時	0~9m ゆるいシルト混り砂 N=5~9 9~11m きわめて軟い砂混りシルト N=5 11~19m きわめて軟いシルト N=4~5 19~25m 軟い細砂混りシルト N=7	円 φ=5.5	0.7	21.5	18.3	156	2970	40	13.4

た例は、いずれも白石俊多氏の論文「構造物基礎の安定に関する土質力学的研究」より抜すいたものであり、図-2のように、水平力を作用させて測定したものである。数少ない例ではあるが、根入れの少ない例1は地盤がよいにもかかわらずθがかなり大きく、地盤の悪い例3はかなり根入れがあるにもかかわらずθが大きい傾向はあると思われる。

2. 活荷重作用時の検討

図-3のようなカンティレバー橋(以下Tと仮称する)

図-3



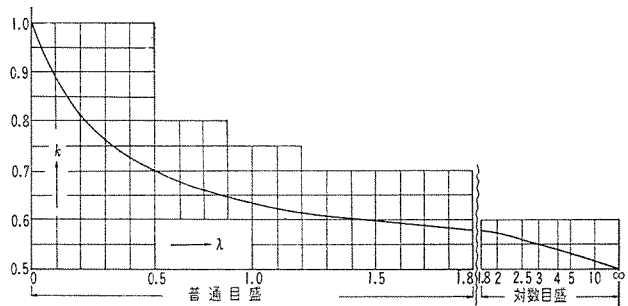
4組からなる両端自由の橋梁中央部に等分布活荷重qが作用したとき、荷重径間の両側の橋脚に生ずる曲げモーメント Mb を、井筒の固定度θを考慮して求めてみよう。井筒の回転中心Oから水平部材軸までの距離をhとし、図-2の右図のように仮定して計算する。

水平部材、垂直部材の断面二次モーメントをそれぞれ I_h、I_v とし一様とすると、Mb は次式であらわせる。

$$M_b = \frac{2+3\lambda}{2(1+3\lambda)} \cdot \frac{ql^2}{2}$$

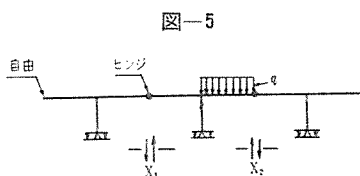
ここに $\lambda = \frac{I_v}{I_h} \left(\frac{h}{l} + E\theta \right)$ でEは部材の弾性係数である。

図-4 k と λ との関係



$\frac{2+3\lambda}{2(1+3\lambda)} = k$ とおき、k と λ の関係を図示すると図-4 のようになる。

垂直部材が剛なほど、井筒の固定度が高い(θが小さい)ほど、λの値は低くなり、水平部材が垂直部材との交点で完全固定されている場合はλ=0でk=1となる。逆に水平部材が完全剛だとλ=∞である。λ=∞でk=0.5となっているのは図-3のように4組のTを考え、両端でfreeとしたからであり、6組のTをとればk=1/3となる。λの値が大きくなるほど、qの影響は遠くにおよぶようになるので、Tの組数が多いときには多くの組数を考え、両端の支承条件も正しく計算に入れるべきであるが、λの値が小さいときには、たとえ、実際のTの組数が多くても、荷重径間の前後数組を考えれば近似的には十分であり、また両端をfreeとしても、かまわないと思われる。このことは次の図-5の場合にもい



えることであり、Tを何組考えるかは、計算の目的、 λ の値によって決定すべきである。

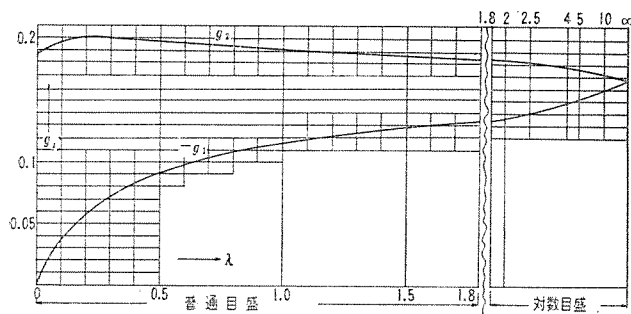
次に 図-5 のように、3組のTの中央Tの片腕に等分布活荷重 q が作用した場合、各ヒンジに作用する力 X_1, X_2 を λ の関数であらわしてみよう。ヒンジから桁に作用する力 X の正の方向は図の矢印の方向とする。 X_1, X_2 は次式で与えられる。

$$X_1 = g_1 ql = -\frac{3\lambda(5+12\lambda)}{8(2+3\lambda)(2+9\lambda)} ql$$

$$X_2 = g_2 ql = \frac{6(1+\lambda)(1+6\lambda)}{8(2+3\lambda)(2+9\lambda)} ql$$

これを図示すると 図-6 のようになる。

図-6 g と λ との関係



いま $l=30\text{ m}$, $h=24\text{ m}$, $I_l=16\text{ m}^4$, $I_h=67\text{ m}^4$, $E=3 \times 10^6\text{ t/m}^2$ の場合につき、 $\theta=0, 1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-6}$ として、図-4, 6 から k と、 g_1, g_2 を求めてみよう。これは井筒根入れ $d=19\text{ m}$, $r=16\text{ m}$, 井筒天端から桁上端まで 10 m の複線鉄道橋の場合の概算用計算値である。実際には I_l, I_h は一様ではないが、便宜的な平均値をとって一様とした。計算結果を表-2 に示す。

表-2 k と g の計算例

$\theta \left(\frac{\text{rad}}{\text{t} \cdot \text{m}} \right)$	0	1×10^{-8}	1×10^{-7}	1×10^{-6}	$\theta=0$
$E\theta \left(\frac{1}{\text{m}^3} \right)$	0	0.030	0.300	3.000	$h=8.1\text{ m}$
$\frac{E\theta}{h/I_h + E\theta}$	0	0.080	0.450	0.890	$I_h=51\text{ m}^4$
λ	0.190	0.210	0.350	1.800	0.085
k	0.820	0.810	0.740	0.570	0.910
g_1	-0.055	-0.058	-0.076	-0.133	-0.030
g_2	+0.200	+0.200	+0.198	+0.183	+0.196

表-2 では $\theta=1 \times 10^{-8}$ 以下ならば θ が λ の大きさにおよぼす影響は小さいが、 1×10^{-7} 以上ではかなり大きい。表の最右欄は井筒天端で橋脚が完全固定されている場合で、第一欄に比して λ の値は半分以下になってい

る。名田橋では橋脚の I が井筒の I に比してこの例よりも小さいので、この差はそれほど大きくならないと思う。実際には点Oより上にある井筒は土の抵抗をうけ自由にたわめないで、 θ が同じでも λ の値はこの計算値よりも小さくなるはずである。

3. 地震時の検討

図-7 (a) のような多連T橋に地震が作用した場合につき検討してみよう。橋の両端の腕は橋台上でローラーにより単純支承されているものとする。両端の支点が沈下せず、各Tに働く地震力の方向と大きさが同じだとすると、各ヒンジは上下方向に変位せず、単独のTが両端でローラー支承された 図-7 (b) の場合に地震力が働いたときと同じになる。

図-7 (a)

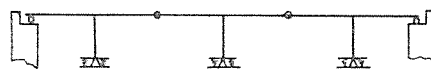
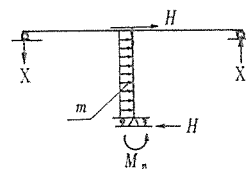


図-7 (b)



水平部材の軸に水平力 H が作用したときの M_h と X は次式で与えられる。

$$M_h = mhH = \frac{1+3\mu}{1+6\mu + \frac{6EI_l\theta}{l}} hH = \frac{1+3\mu}{1+6\lambda} hH$$

$$X = x \cdot \frac{hH}{l} = \frac{1+3\mu + \frac{6EI_l\theta}{l}}{2\left(1+6\mu + \frac{6EI_l\theta}{l}\right)} \frac{hH}{l} = \frac{1+3\lambda + \frac{3EI_l\theta}{l}}{2(1+6\lambda)} \cdot \frac{hH}{l}$$

ここに $\mu = \frac{hI_l}{II_h}$ である。

表-2 の例と同じく $l=30\text{ m}$, $h=24\text{ m}$, $I_l=16\text{ m}^4$, $I_h=67\text{ m}^4$, $E=3 \times 10^6\text{ t/m}^2$ の場合につき、 m, x と θ との関係を図示すると 図-8 のようになる。

次に垂直部材に等分布水平方向荷重 m が作用する場合は

$$M_h = y \cdot \frac{mh^2}{2} = \frac{1+4\mu}{1+6\mu + \frac{6EI_l\theta}{l}} \cdot \frac{mh^2}{2} = \frac{1+4\mu}{1+6\lambda} \cdot \frac{mh^2}{2}$$

$$X = x \cdot \frac{mh^2}{2l} = \frac{\mu + \frac{3EI_l\theta}{l}}{1+6\mu + \frac{6EI_l\theta}{l}} \cdot \frac{mh^2}{2l} = \frac{\mu + \frac{3EI_l\theta}{l}}{1+6\lambda} \cdot \frac{mh^2}{2l}$$

図-8 m, x と θ との関係

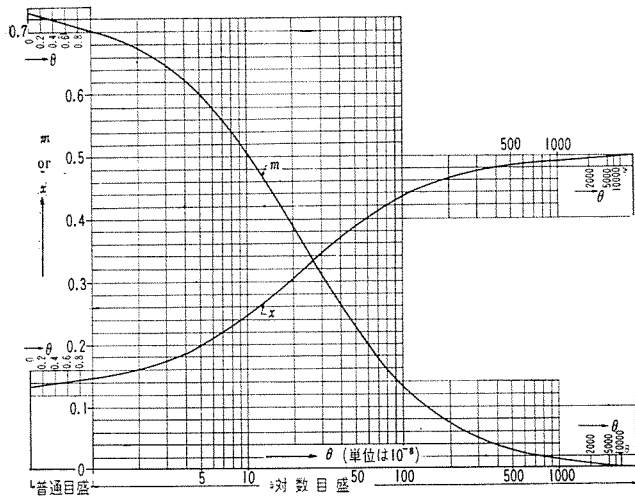
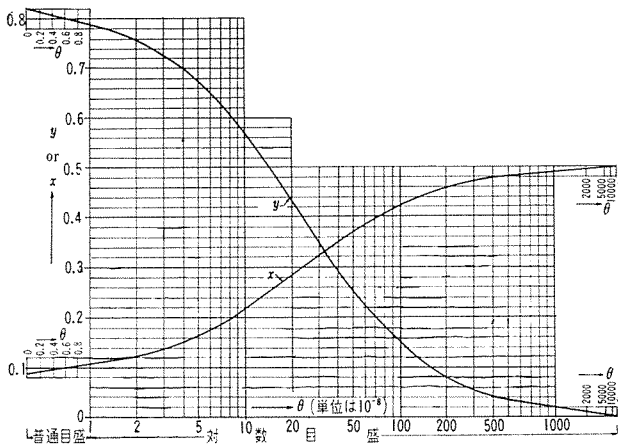


図-9 x, y と θ との関係



となる。 x, y と θ との関係を 図-9 に示す。

図-8 にみるように $\theta = \infty$, すなわち O 点がヒンジのときは, $M_h = 0, X = \frac{hH}{2l}$ となる。このように地盤が軟かくなるほどヒンジに作用する力 X が大きくなり, それに応じて桁に生ずる曲げモーメントが大きくなる。しかしながら名田橋の報告 10. 討議(1)にもあるように, このような長大スパンではプレストレスによる曲げモーメントと死荷重曲げモーメントはほとんど等しく, 桁は活荷重が作用していないときにはほとんど軸圧力をうけている状態にあるので, 地震時に X により桁の正負の曲げモーメントが生じても十分抵抗できる。前記複線鉄道橋でカンティレバーつけねの圧縮応力が 0 になる X は約 220 t である。このように X によって地震力に抵抗するための条件は, 両端の支点が沈下しないことと, ヒンジに X を伝えうる強さがあることである。

$\theta = 0, 1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-6}$ のときの m, x の値を 図-8 から求めると表-3 のようになる。前記複線鉄道橋では震度 0.2 とすると $H = 360$ t になる。各 T がヒンジで結ばれていないとすると, O 点には $360 \times 24 =$

表-3 m, x, φ, δ の計算例

θ	0	1×10^{-8}	1×10^{-7}	1×10^{-6}
m	0.73	0.70	0.51	0.13
x	0.13	0.15	0.25	0.43
φ_0 (rad)	0	8.65×10^{-5}	8.65×10^{-4}	8.65×10^{-3}
$\delta_0 = \varphi_0 h$ (cm)	0	0.21	2.08	20.8
φ (rad)	0	6.05×10^{-5}	4.41×10^{-4}	1.13×10^{-3}
$\delta = \varphi h$ (cm)	0	0.15	1.06	2.7
X (t)	37.4	43.2	72.0	124

8 650 t・m のモーメントが作用して回転角 φ_0 を生じる。ヒンジで結ばれていれば X が作用して, O に働くモーメントは減じ, 回転角は φ となる。回転角に h を乗ずれば桁中心軸における井筒回転による変位 δ_0, δ をうる。これらの値と X を表-3 に示す。表から, T を互いにヒンジで結ぶことにより地震時の変位を, いちじるしく減じることがわかる。また $X < 220$ t なので桁には有害な応力も生じない。

今までの計算では φ は M_h に比例するとしたが, M_h が次第に大きくなり破壊モーメントに近づくと φ の増加はいちじるしくなり, 他の材料と同じような降伏現象を示すものと推定される。

以上は各 T に作用する地震力が同方向, 同量の場合であるが, 実際には各 T に作用する地震力が必ずしも同一であるとは考えられない。極端な例として, 相隣れる T に作用する地震力の大きさが等しく, 方向が逆の場合を考えてみよう。橋の両端は 図-3 のように自由とすると, この場合にはヒンジには力が作用せず, 各 T は独立しているときと同様に地震力を井筒だけでうけることになる。しかしながら地震力が大きく, それによる桁の水平変位 δ が, T の境の目地巾よりも大きくなると, 桁端は互いにぶつかることになり, 井筒のそれ以上の傾斜は妨げられる。この点を考えればカンティレバーの端面には例えばゴム支承をおき, 衝突力をこれでうけるようにした方がよいのではなかろうか。

このようにスパン方向の地震力に対して, この種の橋梁はむしろ 3 単純ばり, 連続ばり型式よりも抵抗力が強いといえるが, スパン直角方向の地震に対しては, 理論的には各 T に作用する地震力をその井筒でうけるわけであり, 他の型式の場合と差がない。しかしながら実際の震害をみると, 局所的な条件の差によるものか, 同じ橋梁の根入れの等しい橋脚でも地震による残留横変位にかなり差のあるものがある(例えば吉野川鉄道橋)。これを見ても, 根入れの差, 地盤の差, 洗掘の差, 施工の良否などによって, 一本一本の井筒の横抵抗に差があることは十分考えられ, 特定の井筒の横抵抗が弱いときには, 相隣れる T と横方向にもヒンジ状に連結することにより, 図-10 のように F なる抵抗力が作用し, その井筒の変