

高炉セメント コンクリートに関する研究

丸安 隆和・小林 一輔・阪本 好史

高炉セメントの品質は、製造方法の改良* によって、この十数年間に著しく向上したが、これにともなってその需要も急激に増大し、現在ではダム、鉄道、港湾、道路、建築関係の諸工事に広く用いられている。これらの中には高炉セメントを使用し、その特性を十分に活かして好成績をあげているところもあるが、一方使用方法が不適当であったり、施工に不当に苦勞しているところもあるようである。高炉セメントはもちろん普通ポルトランドセメントとその性質を異にする点もあり、同じ高炉セメントでもスラグの含有量によって性質が異なるので、取扱ひ方も当然変えなければならない。しかるにわが国では高炉セメントの使用法についての研究は非常に少なく、組織的にかつ長期間にわたって研究された実績も少ない。本文は高炉セメントを用いたコンクリートについて、その諸性質を総合的に検討し、その特性を普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと対比しつつ明らかにするとともに、その適正な使用方法に対する指針を示したものである。以下に研究の内容について述べる。

まず、まだ固まらないコンクリートの性質に関してつぎの諸点を明らかにした。

1) 所要のスランプを得るのに必要な単位水量は、水セメント比が 40% 付近を境として、これ以上の場合には普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも少なくなるが、これ以下の場合にはより多くなる。

2) ブリージングはセメントの種別による実用上の差異はないものと考えられるが、一般に高炉系セメントの方が普通ポルトランドセメントよりやや少ない傾向にある。

3) 一般に所要の空気量を連行させるのに必要な単位 AE 剤量は、高炉系セメントの方が普通ポルトランドセメントよりも多くなる。水セメント比が 50% 以上の場合で約 1.5 倍、40% の場合で約 2 倍程度である。

コンクリートの強度ならびに弾性係数について得られた結論はつぎのとおりである。

1) 高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、初期材令では普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて強度の発現が多少遅れるが、長期におい

* たえば分離粉砕方式の採用

て強度が増進し、この傾向はスラグ含有量の多いセメントほど顕著である。

2) 曲げ強度は、圧縮強度が 300 kg/cm² 前後までは普通ポルトランドセメントを用いた場合とほとんど同じ値となるが、これ以上の強度では高炉セメントを用いた場合の方がやや大きくなる。

3) 引張強度および付着強度については、もし圧縮強度が等しければ普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に取扱って差し支えない。

4) 弾性係数は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べてやや小さい値を示すが、鉄筋コンクリート構造物の設計にさいしてとくに考慮を要するほどの差ではない。

つぎに打込み時のコンクリート温度が圧縮強度におよぼす影響について検討し、以下の結論を得た。すなわち打込み時のコンクリート温度を 10~30°C の範囲で変化させた場合における、材令 7 日~91 日の実験結果では、打込み時のコンクリート温度が低くなるほど高い強度が得られる。この傾向はいずれのセメントを用いた場合でも、水セメント比が小さくなるほど顕著となり、打込み時のコンクリート温度が高い場合と低い場合の強度差が大きくなるが、その程度はセメント中のスラグ含有量によって異なる。スラグ含有量の多いセメントほど、打込み時のコンクリート温度が圧縮強度におよぼす影響は遅れてあらわれる傾向がみられる。

AE 剤、減水剤、塩化カルシウムなどの混和剤の使用が、高炉セメントコンクリートの性状におよぼす影響について検討した結果、強度の発現性については多少の差があるが、その他の性質については普通ポルトランドセメントを用いた場合とほとんど差がないといえる。したがって、普通ポルトランドセメントに対するこれらの混和剤の効果は、多少の差はあるがそのまま高炉セメントにも期待できると考えてよいようである。

コンクリートの乾燥収縮と、乾燥および湿潤のくり返し作用の影響に関しては、つぎの諸点を明らかにした。

1) 高炉系セメントを使用したコンクリートの乾燥収縮は 1 週間程度の水中養生を行なった場合、水セメント比、空気連行の有無にかかわらず大体において普通ポルトランドセメントを用いた場合と変わらない。

2) 高炉系セメントのうちでもとくにスラグ含有量の多い高炉セメント C 種は、水中養生期間中の膨張量が普通ポルトランドセメントにくらべて大きい。

3) 乾燥および湿潤のくり返し作用を受けたコンクリートの容積変化の状態に関しては、とくに高炉セメント

C種を用いた場合、乾燥と湿潤のサイクルの進行とともにその長さ変化率が次第に膨張側に偏倚する傾向が特徴的である。

高炉セメントの耐熱性に関しては、従来より研究者によりその評価が異なっていたが、本文ではこの点を明らかにするために種々の条件の下で実験を行ない、得られたデータを詳細に検討して、これまでの高炉セメントの耐熱性についての評価の差異は、それぞれの実験条件の差が大きい原因であることを確かめた。結論の主なものはつぎのとおりである。

1) 高炉セメントは、セメントペースト硬化体としては普通ポルトランドセメントよりも熱に対して安定であると考えてよい。

2) 高炉セメントは、モルタルまたはコンクリートとして用いた場合は、必ずしも普通ポルトランドセメントよりも耐熱性にすぐれているとはいえない。すなわちコンクリートとしての耐熱性は、セメント水和物中のCa(OH)₂の脱水分解が顕著となる500°C以上の温度に対しては普通ポルトランドセメントよりもすぐれているが、それ以下の温度ではとくにすぐれているとはいえない。モルタルとして用いた場合には、ほぼ普通ポルトランドセメントと同等の耐熱性を示す。

気象作用、化学侵食および磨耗に対する耐久性に関しては以下のような結論を得た。

1) 凍結融解作用に対する耐久性については、高炉セメントと普通ポルトランドセメントとの間には差はないと考えてよい。

2) 化学抵抗性については、海水、硫酸塩溶液、温泉水による浸漬試験を行なったが、いずれの場合にも、普通ポルトランドセメントにくらべて高炉系セメントの抵抗性の大きいことが確認された。

3) 磨耗に対する抵抗性では、使用セメントの種別により磨耗量の差はほとんどないと考えてよい。

以上を総括すると、高炉セメントを用いたコンクリートの耐久性は、物理的には普通ポルトランドセメントとほぼ同じで、化学抵抗性は高炉セメントのほうがすぐれているといつてよいようである。

これらの研究を基礎として、高炉セメントを用いたコンクリートの適正な配合設計を行なう場合に必要の諸量を決定した。

丸安：正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所
 小林：正会員 東京大学助教授 同
 阪本：正会員 東京大学生産技術研究所研究員

鉄道橋としての鉄筋コンクリート 斜角げたの設計に関する研究

松本 嘉司

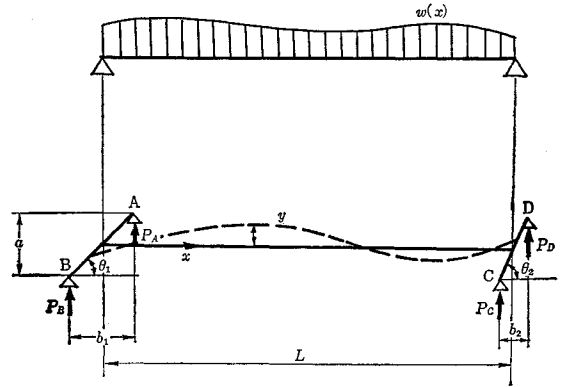
最近では鉄道の高速度化にともなって計画路線の線形が直線に近くなり、斜角交差がきわめて数多くなってきたので、斜角橋梁としての斜角げたの設計方法を確立することが強く要求されてきた。

本論文は斜角げたについて理論的に解析し、その結果に対して実験的研究を行ない、研究結果にもとづいて鉄道橋としての鉄筋コンクリート斜角げたの設計方法に対する提案を行なったものである。

1. 斜角げたの理論

斜角げたはこれを図-1に示すような一次元のはりの

図-1 斜角げたの構造



端部を平面的に任意の斜角度をなす斜線上に弾性的に支持する構造に置換えることができる。ここに斜角度が任意の場合について解を求めたのは、平面的に見て平行四辺形状でない斜角げたが最近用いられてきていることを考慮したからである。また支点に弾性を与えて理論を導いたのは、前述のように斜角げたの支点反力が大きくなれば、その微小な変形によって支点反力および応力が大きく影響をうけることを考慮したからである。最近では設計施工を容易にするために、鉄筋コンクリート橋の支承に合成ゴム支承が使用されてきているので、支承自体に弾性がある場合もあり、また軟弱地盤上に作られた場合には下部構造が沈下することもある。したがって支点の変形を考慮して解析を行なうことは必要なことである。

この斜角げたの支持状態として

- (i) けたの端部の斜線上の両端を集中的に4点で支持する場合(4点支持の場合)
- (ii) けたの端部を一定の長さをもつ斜線上に支持する場合(線支持の場合)

とについて理論的解析を行なったが、実際の斜角げたの

支持状態は複雑で、この両者の中間の状態にあることが多い。ここでこのような支持条件を仮定したのは近似的には上記のいずれかの状態に近く、またこの2つの場合について解析しておけば、その中間の状態にある一般的な斜角げたの性質も知ることができるものと考えたからである。

以下図-1 に示すような4点支持の場合の斜角げたの一般解を示すことにする。この場合に鈍角端と鋭角端の支点反力の差を不静定量とすれば、最小仕事の原理によってこの不静定量が求められる。以下この解析結果を示すとつぎのようになる。

けたの支点反力

$$P_A = \frac{1}{4}A + \frac{1}{2l}B + \frac{b_2}{2al}C + \frac{2l+b_1-b_2}{4l}X$$

$$P_B = \frac{1}{4}A + \frac{1}{2l}B + \frac{b_2}{2al}C - \frac{2l-b_1+b_2}{4l}X$$

$$P_C = \frac{1}{4}A - \frac{1}{2l}B - \frac{2l+b^2}{2al}C + \frac{2l-b_1+b_2}{4l}X$$

$$P_D = \frac{1}{4}A - \frac{1}{2l}B + \frac{2l-b^2}{2al}C - \frac{2l+b_1-b_2}{4l}X$$

曲げモーメント

$$M_B = \frac{Xl}{2} \left\{ \frac{b_1-b_2}{l} \frac{x}{l} - \frac{b_1}{l} \right\} + \frac{b_2}{a} \frac{x}{l} C + M_0(x)$$

ねじりモーメント

$$M_T = \frac{\alpha}{2} X - \int_0^x yw(x) dx$$

ここに $X = \frac{X_2}{X_1}$

$$X_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{b_1-b_2}{l} \right)^2 - \frac{b_1}{l} \frac{b_1-b_2}{l} + \left(\frac{b_1}{l} \right)^2 + \alpha \left(\frac{a}{l} \right)^2$$

$$+ \frac{EI}{4l^3} \left[4 + \left(\frac{b_1-b_2}{l} \right)^2 \right] k_1 + \frac{4(b_1-b_2)K_4}{l}$$

$$X_2 = \frac{2}{a} \left\{ \frac{1}{2} \frac{b_1}{l} \frac{b_2}{l} - \frac{1}{3} \frac{b^2}{l} \frac{b_1-b_2}{l} \right\} C + \frac{2\alpha a}{l^3} D$$

$$+ \frac{2b_1}{l^3} F - \frac{2(b_1-b_2)}{l^4} H - \frac{EI}{2l^3}$$

$$+ \left[\left(k_3 \frac{b_1-b_2}{2l} k_2 \right) A + \left(2k_4 + \frac{b_1-b_2}{l} k_1 \right) \frac{B}{l} \right]$$

$$+ \left\{ \frac{b_2}{l} \frac{b_1-b_2}{l} k_1 + \frac{2b_2}{l} k_4 + 2 \left(\frac{b_1-b_2}{l} - 2 \right) \frac{1}{K_C} \right.$$

$$\left. - 2 \left(\frac{b_1-b_2}{l} + 2 \right) \frac{1}{K_D} \right\} \frac{C}{a}$$

上式中 $\alpha =$ 曲げねじり剛比 (EI/GJ)

$$A = \int_0^l \omega(x) dx \quad B = \int_0^l \omega(x) \left(\frac{l}{2} - x \right) dx$$

$$C = \int_0^l \omega(x) y dx \quad D = \int_0^l \int_0^x \omega(x) y(dx)^2$$

$$F = \int_0^l M_0(x) dx, \quad H = \int_0^l M_0(x) x dx$$

$$k_1 = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_D}$$

$$k_2 = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} - \frac{1}{K_C} - \frac{1}{K_D}$$

$$k_3 = \frac{1}{K_A} - \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} - \frac{1}{K_D}$$

$$k_4 = \frac{1}{K_A} - \frac{1}{K_B} - \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_D}$$

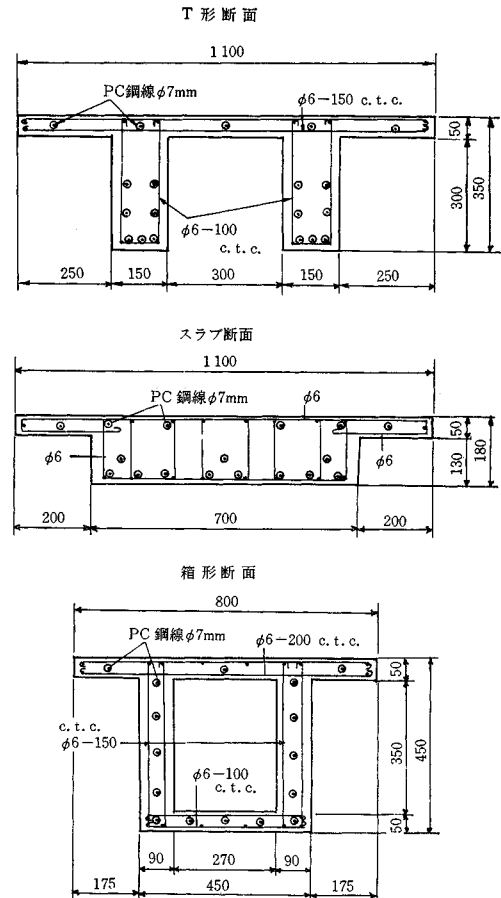
(K_A, K_B, K_C, K_D は支点のばね係数)

$M_0(x) =$ 単純ばねとしての直角げたの曲げモーメント

2. 実験的研究による理論の検討

斜角げたの理論を検討するため、コンクリート実験げたによって実験的研究を行ない、その斜角度および支点の弾性とけたの支点反力および応力との関係を求めた。ここに用いた実験げたは図-2 に示すようなスパン 3m

図-2 実験げたの断面および配筋



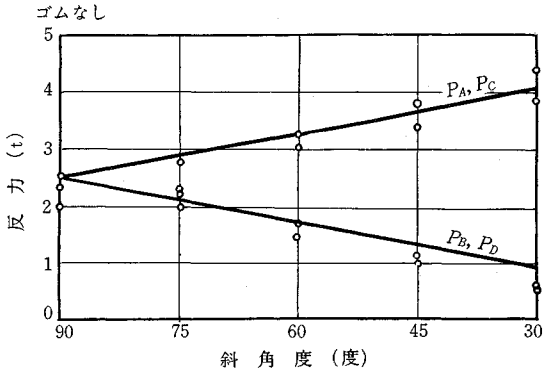
のスラブ断面、スパン 4m の T 形断面、スパン 5m 箱形断面の 3 種で、支点位置を $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ の 5 種に変え、かつ支点にはゴム板を挿入して弾性を与えて載荷試験を行ない、支点反力および応力を測定した。

実験結果によれば、支点が弾性的構造である場合には前節で示した斜角げたの理論が正しいことが実証された。支点到弾性のない場合には、T 形断面のコンクリー

ト実験げたの実験値はほぼ理論値と一致している。

図-3 は T 形断面の模型げたについての実験結果の一

図-3 T 形斜角げた支点反力の実験結果



例を示したもので、実線は理論値、○印は実験値である。しかし、スラブ断面および箱形断面の実験げたによる実験値は理論値に対して斜角の影響が小さくなる結果を示した。すなわちスラブ断面および箱形断面の実験げたでは、実験結果より求めた支点反力の不静定量（鈍角端と鋭角端との支点反力の差）は理論値の約 80% および約 50% となった。

さらにこの実験結果を検討するため、前述の理論にもとづいて設計したスパン 20 m、斜角度 60° の新幹線第二鹿乗川橋について載荷試験を行ない、理論との比較を行なった。またスパン 14.5 m、斜角度 41° の鹿児島本線松原添加道橋およびスパン 20 m、斜角度 29°-6' の北陸本線松原架道橋の載荷試験結果についても検討を加えた。これらの実際の斜角コンクリート橋に載荷試験を行なった結果によれば、その支点反力は理論から求めた値と傾向的には一致しているが、その差は実験げたの場合より大きく、たとえば箱形断面の斜角コンクリートげた橋についての反力の不静定量の実測値は理論値の 65% 以下となっている。この主な理由は剛性の大きいコンクリートげたにおいては一部の支点が浮いていて均等な支持状態にならないことによるものと思われる。

3. 設計方法に対する提案

a) 鉄筋コンクリート斜角げたは理論的な解析結果を上述の実験結果および載荷試験結果を考慮して修正し、荷重も換算等分布荷重 ω_0 として求めた実用設計方法を示すとつぎのようになる。

支点反力

(i) 4点支持の場合

$$\begin{Bmatrix} P_A, P_C \\ P_B, P_D \end{Bmatrix} = \frac{\omega_0 l}{4} \left\{ 1 \pm \kappa \frac{l}{3a} \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \tan^2 \theta} \right\}$$

ここに

P_A, P_C : 鈍角端の支点反力

P_B, P_D : 鋭角端の支点反力

l : スパン

a : 支点の間隔 (スパン直角方向)

θ : 斜角度

α : 曲げねじり剛比 $\left(\frac{EI}{GJ} \right)$

(ii) 線支持の場合の斜角げた

$$\begin{Bmatrix} p_A, p_C \\ p_B, p_D \end{Bmatrix} = \frac{\omega_0 l}{2C} \left\{ 1 + \kappa \frac{l}{a} \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \tan^2 \theta} \right\}$$

ここに

p_A, p_C : 鈍角端の単位長さ当りの支線反力

p_B, p_D : 鋭角端の単位長さ当りの支線反力

C : 斜角方向の支線の長さ

ねじりモーメント

$$M_T = \kappa \frac{\omega_0 l^2}{12} \frac{\tan \theta}{1 + \tan^2 \theta}$$

げた端の負の曲げモーメント

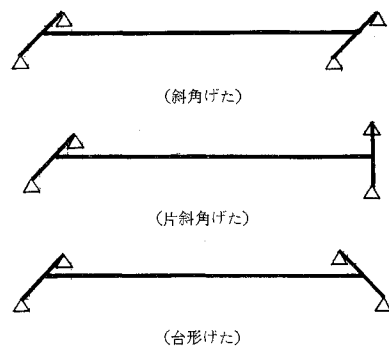
$$\bar{M} = \kappa \frac{\omega_0 l^2}{12} \frac{1}{1 + \alpha \tan^2 \theta}$$

この κ は実験結果にもとづく補正係数で、T 形断面では 1.0、スラブ断面では 0.9、箱形断面では 0.8~0.6 程度の値である。

b) 斜角げたの正のスパン曲げモーメントはげた端の負の曲げモーメントによって理論的には減少する。しかし実験結果および載荷試験の結果よりすれば支線の微小な沈下によって反力の不静定量が理論値より減少する傾向があるので、斜角げたの正のスパン曲げモーメントおよび鋭角端の支点反力は斜角の影響を無視して直角げたの値を用いて設計するのが実用的である。

c) 図-4 に示すような片斜角げた、台形げたについて

図-4 斜角げたの形式



ても斜角げたと同様に理論解を単純化し、それに実験結果に基づく補正係数を用いて設計式を導くことができる。また荷重が偏心して作用する場合におけるその偏心の影響は、偏心量が小さい範囲では斜角の影響と偏心の影響とを重ね合わせて取扱うことができる。

[筆者: 正会員 工博 東京大学助教授 土木工学科]