

クロス形式斜材を用いた斜張橋の 構造特性と造形評価

皆川 瞬¹・関 文夫²

¹学生会員 日本大学理工学研究科土木工学専攻
(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:xoxo.shun@icloud.com)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科
(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:seki.fumio@nihon-u.ac.jp)

斜張橋の斜材の張り方は、ハープ形式、ファン形式、ラジアル形式が一般的である。近年、斜材をひねったクロス形式と呼ばれる形式を有する斜張橋が欧米を中心に建設されている。クロス形式を有する斜張橋は、斜材が交差していることによりその造形に変化を与えることから採用されるケースが多い。しかし、クロス形式を用いた斜張橋の構造特性や構造的効果は不明瞭であり、構造特性と造形特性を総合的に考察した既往研究はない。本研究では、対称および非対称な二径間斜張橋の構造モデルを対象に構造解析を行い、クロス形式を用いた斜張橋の構造特性を分析し、クロス形式を有する斜張橋の合理的な造形を考察したものである。

キーワード:斜張橋, クロス形式, 自碇式, 他碇式

1. はじめに

斜張橋の斜材の張り方は、ハープ形式、ファン形式、ラジアル形式が一般的である。近年、斜材を交差させたクロス形式¹⁾と呼ばれる形式を有する斜張橋が欧米を中心に建設されている。クロス形式の斜材は、斜材が交差しているため、車両走行時のダイナミックなシーケンス景観や歩行空間に変化を与えることから採用されているケースが多い。しかし、クロス形式の斜張橋の造形は自由度が高く、多岐にわたり、構造的合理性は不明瞭である。本研究では、対称および非対称な二径間斜張橋の構造モデルを対象に構造解析を行い、クロス形式を用いた斜張橋の構造特性を分析し、クロス形式を有する斜張橋の合理的な造形を考察する。

ラジアル形式が効果的であり、地震の慣性力に対しては、ハープ形式が効果的で、ファン形式はその中間に位置する。



図-1 Bennebroekerweg橋 | 2004年

2. クロス形式

(1) クロス形式斜張橋の特徴および施工状況

クロス形式とは、主塔天端から張り出される斜材を主塔側の主桁に、主塔下段から張り出される斜材を主桁端部に、交差した状態で配置されるものである。非対称な斜張橋に採用される場合が多く、主塔は1本で、その多くは側径間側に傾斜している(図-1)。

一般的に、主桁の変位や断面力を低減させるためには

世界の橋梁等のデータベースである Structurae²⁾を用いてクロス形式が用いられている斜張橋を検索した結果を、表-1、図-2に示す。クロス形式の斜張橋は、イギリスの Trinity bridge (1995年)を始めとし、欧米を中心に十数橋の施工実績があり、日本では、鶴飼い大橋(2003年)が先駆的事例となる。クロス形式を用いた斜張橋は、近年ではコンクリートが用いられることが多い。

表-1 各国のクロス形式斜張橋の施工事例

橋名	年代	架橋国	主径間 (m)	材料
Trinity bridge	1995	イギリス	54	鋼
Lerez River Bridge	1995	スペイン	125	コンクリート
Lagardsveien Bridge	1996	ノルウェー	80	鋼
Reiman Bridge	2001	アメリカ	73	鋼
Denver Millennium Footbridge	2002	アメリカ	40	コンクリート
Petach-Tikva Pedestrian Bridge	2002	イスラエル	75	鋼
鴨飼い大橋	2002	日本	152.4	鋼
Seri Wawasan Bridge	2003	マレーシア	168.5	コンクリート
Bennebroekerweg Bridge	2004	オランダ	75	鋼
Nieuw Vennepe Bridge	2004	オランダ	87	鋼
Toolenburg Bridge	2004	オランダ	26	鋼
Millennium Bridge	2005	モンテネグロ	140	コンクリート
Martin Olav Sabo Bridge	2007	アメリカ	67	コンクリート
Chords Bridge	2008	イスラエル	160	コンクリート
Wrzosowa Footbridge	2014	ポーランド	24.7	コンクリート
Nguyen Van Troi-Tran Thi Ly Bridge	2014	ベトナム	230	コンクリート
Ennio Flaiano Bridge	2017	イタリア	85	鋼

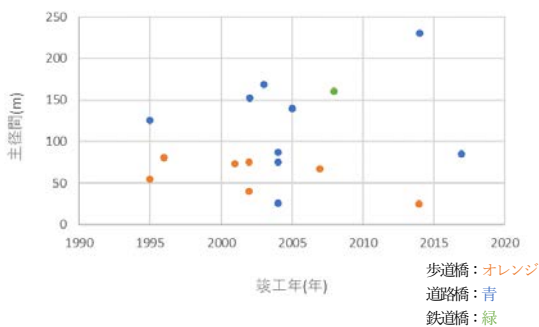


図-2 クロス形式斜張橋の竣工年と主径間の関係

クロス形式は、斜張橋の側径間側に用いられる場合が多く、桁に定着する自碇式のもの、桁外に定着する他碇式のものがある。表-1 に示した各国のクロス形式斜張橋について、クロス形式の使用位置と使用方法を表-2 に示す。

表-2 クロス形式の使用位置と使用方法の分布

		使用位置		
		主径間	側径間	両径間
使用方法	自碇式	2	4	1
	他碇式	2	8	0

(2) 造形特性

クロス形式の斜張橋は、主に一本主塔で、主径間は一面吊りで側径間は二面吊りの非対称な斜張橋である。クロス形式の造形は、ケーブルが交差していることにより、ハープ形式、ファン形式、ラジアル形式と大きく異なる(図-3, 4, 5, 6)。また、これらの斜張橋の造形は、自碇式と他碇式を比較すると、橋軸直角方向から見た場合はそれほどの差異はないが、橋軸方向から見た場合に大きく異なる(図-7, 8)。自碇式は橋にスリムな印象を与え、他碇式は橋にダイナミックな印象を与える。また、他碇

式モデルでは、斜材のねじり度合いや開き度合いを自由に決定できるため、造形的自由度は高い。



図-3 ハープ形式 (自碇式)



図-4 ファン形式 (自碇式)



図-5 ラジアル形式 (自碇式)



図-6 クロス形式 (自碇式)



図-7 自碇式クロス形式 (橋軸直角方向)



図-8 他碇式クロス形式 (橋軸直角方向)

(3) 空間特性

図-9, 10, 11, 12に斜張橋の内部から主塔を見上げたときの空間特性を示す。クロス形式は、斜材が交差しているため、他の形式と大きく異なる空間特性を生み出す。クロス形式の空間特性は、主塔天端の斜材が主塔側の主桁に定着されていることにより、主塔天端に開放的な印象を与える。また、車両走行時には、他の形式にはないダイナミックなシーケンス景観や歩行空間に変化を生み出す。



図-9 空間特性 (ハープ形式)



図-10 空間特性 (ファン形式)



図-11 空間特性 (ラジアル形式)



図-12 空間特性 (クロス形式)

3. クロス形式の構造特性

(1) 解析結果

a) 自碇式対称モデルの構造特性

解析モデルは、2径間の斜張橋で支間長130m+130mの対称モデルとし、橋脚12.6m、主塔64.4m（橋脚下端から主塔天端まで77.0m）、斜材吊り点間隔10mでハープ形式、ファン形式、ラジアル形式、クロス形式の4種類を作成した（図-13, 14, 15, 16）。ここで、クロス形式は両径間に用いた。使用材料は、主桁に設計基準強度 $\sigma_{ck}=39.2\text{N/mm}^2$ のコンクリート、主塔および橋脚に設計基準強度 $\sigma_{ck}=58.8\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いた。主桁の支点条件は、桁端部をローラー支点、橋脚上部を剛結合とし、橋脚基部の支点条件は固定とした。

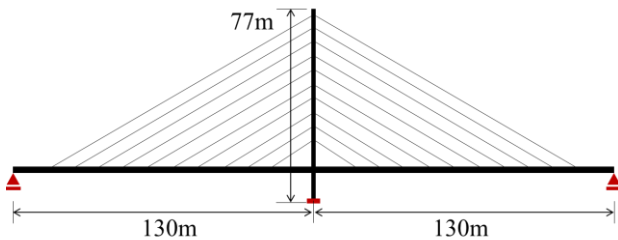


図-13 ハープ形式（自碇式対称モデル）

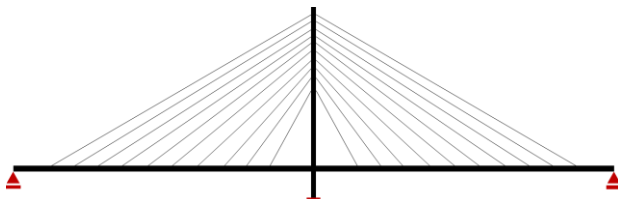


図-14 ファン形式（自碇式対称モデル）

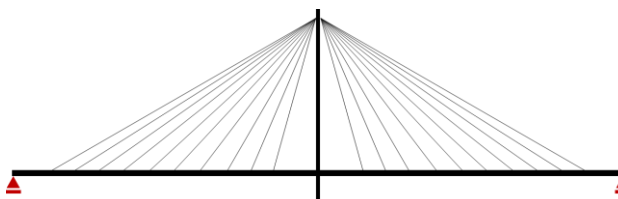


図-15 ラジアル形式（自碇式対称モデル）

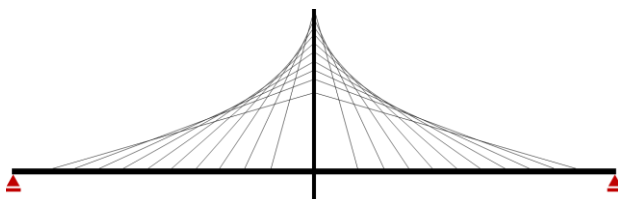


図-16 クロス形式（自碇式対称モデル）

L1地震荷重（設計水平震度 $kh=0.2$ ）を載荷した際、クロス形式の主塔変位は、他形式の4割増程度となった（図-17）。これは、主塔天端の斜材が、主桁の主塔側に定着されているため、最外縁の斜材の見かけの剛性が低下していることに起因している。

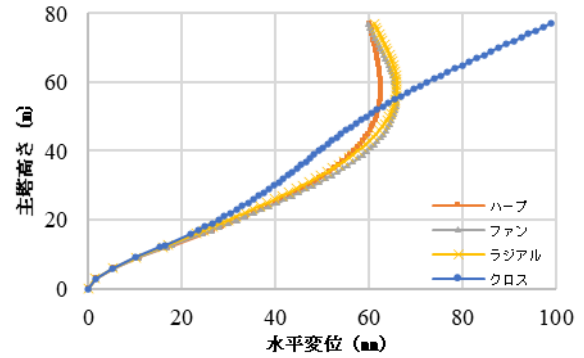


図-17 自碇式対称モデルの各形式での主塔の水平変位（地震荷重載荷時）

b) 自碇式非対称モデルの構造特性

解析モデルは、2径間の斜張橋で支間長130m+90mの非対称モデルとし、斜材吊り点間隔は主径間で10m、側径間で7.5mとした。使用材料および主桁、橋脚の支点条件は対称モデルと同様とした。以上の条件で、ハープ形式、ファン形式、ラジアル形式、クロス形式の種類を作成した（図-18, 19, 20, 21）。ここで、クロス形式は側径間側に用い、主径間側はファン形式とした。

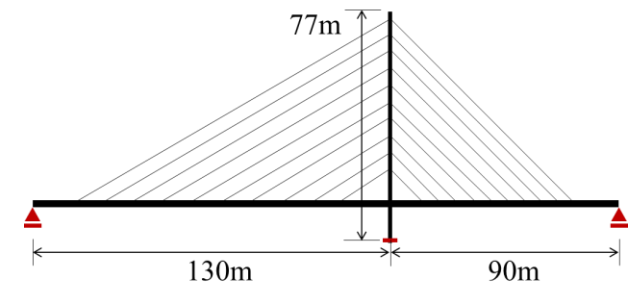


図-18 ハープ形式（自碇式非対称モデル）

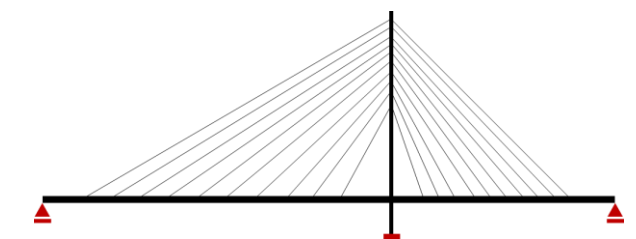


図-19 ファン形式（自碇式非対称モデル）

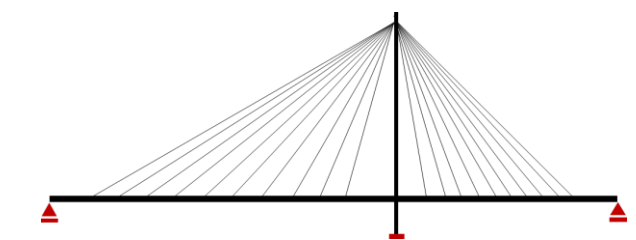


図-20 ラジアル形式（自碇式非対称モデル）

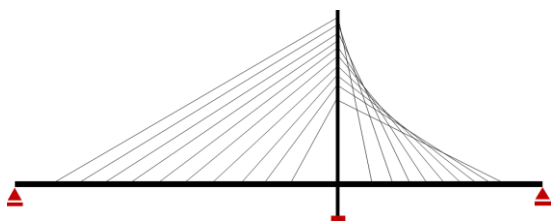


図-21 クロス形式（自碇式非対称モデル）

L1地震荷重を載荷した際の主塔天端の変位は、自碇式対称モデル（図-17）と自碇式非対称モデル（図-22）を比較すると、クロス形式以外の形式はほぼ同程度に対して、クロス形式は約35%減少している。これは、クロス形式による効果ではなく、主径間にファン形式を用いたことによる斜材の見かけの剛性が増加したことに起因している。また、クロス形式の主塔の水平変位は橋脚基部に向かってなだらかに減少するため、主塔の曲げモーメントは、他の形式よりも減少した。

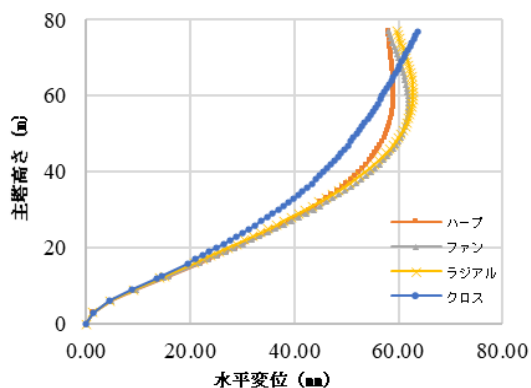


図-22 自碇式非対称モデルの各形式での主塔の水平変位（地震荷重載荷時）

c) 他碇式非対称モデルの構造特性

解析モデルは、非対称モデルを前提とし、主径間と側径間をファン形式としたモデル（図-23）、主径間と側径間をラジアル形式としたモデル（図-24）、主径間をファン形式かつ側径間をクロス形式としたモデル（図-25）の3種類とした。この時、主径間側の斜材は、桁中央に10m間隔に定着し、側径間側の斜材を橋軸方向から30°面外方向に張り出し、6m間隔に定着した他碇式モデルを作成した。主塔と主桁は剛結合とし、主桁両端は、ローラー支点とした。

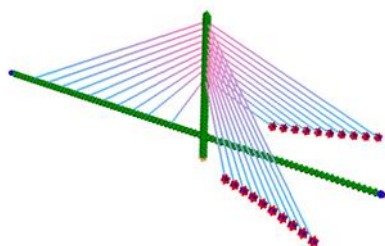


図-23 ファン形式（他碇式非対称モデル）

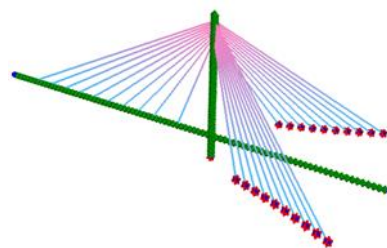


図-24 ラジアル形式（他碇式非対称モデル）

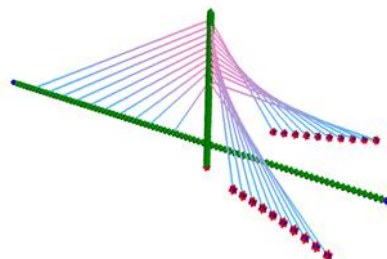


図-25 クロス形式（他碇式非対称モデル）

面内方向にL1地震荷重を載荷した場合、各形式での他碇式非対称モデルの主塔水平変位は、各形式での自碇式非対称モデルの1/3程度となった。面外方向にL1地震荷重を載荷した場合、クロス形式の主塔の面外方向の変位は、最も小さい変位量となり、主塔天端の変位は、ラジアル形式、ファン形式の9割削減されている（図-26）。

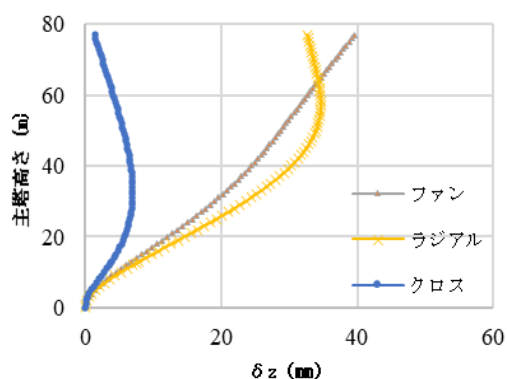


図-26 他碇式非対称モデルの各形式での主塔の水平変位（地震荷重載荷時）

(2) まとめ

両径間にクロス形式を用いた場合の主塔天端の変位は、水平荷重載荷時、他の形式よりも増加する。これは、主塔天端の斜材が、主桁の主塔側に定着されているため、最外縁の斜材の見かけの剛性が低下していることに起因している。一方で、主塔中間部の変位は低減され、主塔の曲げモーメントは減少する特性がある。主径間にファン形式かつ側径間にクロス形式を用いた場合の主塔変位は、斜材の見かけの剛性が増加することにより低減される。さらに、クロス形式の斜材を他碇式にすることで、面外方向の水平力に強い抵抗力を示し、主塔変位は大幅に低減される。

4. クロス形式斜張橋の造形の考察

(1) 合理的造形

a) 基本モデル

側径間にクロス形式を用い、主径間にハープ形式またはファン形式を用いた斜張橋は、主塔の曲げモーメントが低減される合理的な構造である(図-27)。さらに、側径間の斜材を他碇式にすることで、面外方向の水平力に対する抵抗力が大幅に増加する(図-28)。斜張橋の造形は、自碇式モデルは、橋にスマートな印象を与え、他碇式モデルは、橋にダイナミックな印象を与える。また、クロス形式の斜張橋内部の空間特性は、主塔天端から張り出される斜材は主桁の主塔側に定着されることにより、主塔天端に開放的な印象を与える。他碇式はさらに開放的な空間特性となる。



図-27 自碇式モデル



図-28 他碇式モデル

b) 主塔傾斜モデル

各国の非対称なクロス形式斜張橋の主塔は、側径間のカウンターウェイトを低減するためにその多くが側径間側に傾斜している。斜張橋の空間特性は、主塔が傾斜したことにより、主塔天端と下部の斜材が為す角度が大きくなり、ダイナミックなシークエンス景観を生み出す(図-29)。斜張橋の造形は、主径間の斜材角度が通常の斜張橋と比較して、水平に近いシャープな印象となる。

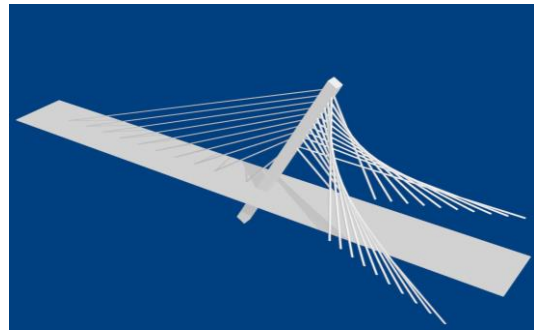


図-29 他碇式主塔傾斜モデル

b) 両径間クロス形式モデル

両径間にクロス形式を用いた斜張橋は、主塔天端の斜材の見かけの剛性が低下していることにより、主塔天端の変位が増加することが欠点である。両径間にクロス形式を採用する場合は、主塔天端の変位を抑えるために、主塔天端から張り出される斜材を最外縁に定着することが合理的である。図-30に示したモデルは、両径間をクロス形式の二面吊りとして、主塔天端から張り出された斜材を桁外の最外縁に定着した自碇式と他碇式の混合モデルである。

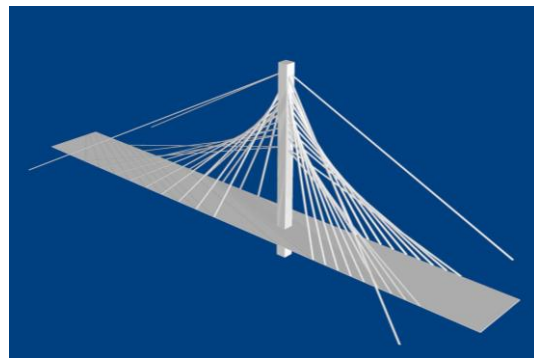


図-30 両径間クロス形式モデル

(2) まとめ

両径間にクロス形式を用いた斜張橋は、他の形式にはない特異的な造形である一方で、その構造的欠点から採用されているケースは少ないが、図-30では構造的欠点が改良され、両径間にクロス形式を使用することが可能となった。各国のクロス形式斜張橋の主塔は、傾斜主塔だけでなく、曲線的な形状や多様な形状が存在する。また、他碇式の斜材の開き度合いは様々であり、造形や構造特性に変化を与えるパラメータとなる。クロス形式を採用する場合は、これらの構造特性の変化を考慮して造形を選定することが重要となる。

参考文献

- 1) クロス形式斜材を用いたPC斜張橋の構造特性と効果
- 2) Structurae : <https://structurae.net/en/>