

斜張橋における桁，ケーブルの相対剛比に応じた ケーブル最適安全率に関する研究

建設構造研究室 堀江崇之
指導教官 長井正嗣
岩崎英治

1.はじめに

我が国におけるケーブル系斜張橋の建設は，現在でも幾つかの施工例が見られるものの，1990年代の本四連絡橋に代表されるような1000m前後の長大橋を建設した全盛時代からは明らかに少なくなっている．現在では，韓国や中国での長大橋建設が盛んで，特に中国はスパン1000mを超える世界最長の斜張橋2橋の建設が始まっており，また，韓国でもスパン800mクラスの斜張橋の建設が始まろうとしている．

さて，我が国のPC橋梁に目を向けると，スパン100～150m領域における経済的形式として，これまでの斜張橋と比較して塔高を低くした吊形式橋梁，エクストラドーズド橋が数多く建設されている．この場合のケーブル安全率は，活荷重を主に桁で受け持つとした設計思想のもと，疲労の問題が少ないとの立場から，床版プレストレス用のPC鋼棒と同様に破断に対して1.7を採用している．これまで我が国の斜張橋の設計では安全率として2.5が採用されており，大きな違いが見られる．疲労の観点から安全率を低減できるとしているが，その根拠は明確でなく，また終局強度特性に関してもその影響は明確でない．

2.研究目的

本研究では，スパン150mのエクストラドーズドタイプ合成2主I桁を対象に，腹桁高(1, 2, 3, 5mの4ケース)とケーブル安全率(破断に対して，1.7, 2.0, 2.2, 2.5, 3.0の5ケース)をパラメータとした終局強度解析を行い，桁，ケーブルの相

対剛比とケーブル安全率を関連付けて，ケーブル安全率の設定に関する検討を行うことを目的とする．

3.解析モデル

3-1.解析モデル

図-1に解析モデルを示す．支間割は70m+150m+70mの3径間連続合成斜張橋である．ケーブルはファインタイプの2面張りで，桁の吊間隔は10mである．桁にはプレキャスト床版合成2主I桁を用い，主桁断面の幅員は2車線用12mである．塔は鉄筋コンクリート製で，高さは桁上12m，桁下20mである．また，桁上には断面を，桁下には断面を用いる．なお鉄筋比は2.0%である．

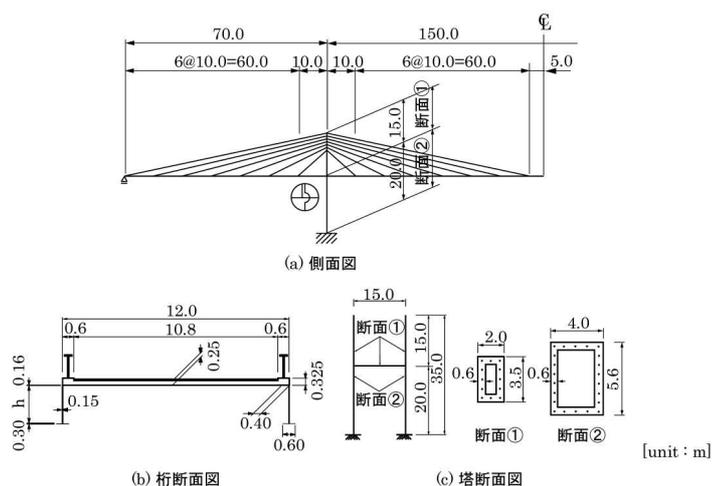


図-1 解析モデル

3-2.解析パラメータ

本研究では、桁高さとケーブル安全率を解析パラメータとして扱う。桁高さは1.0, 2.0, 3.0, 5.0mの4ケース, ケーブル安全率は1.7, 2.0, 2.2, 2.5, 3.0の5ケースである。表-1に解析ケースを示す。

表-1 解析ケース

	番号	ウェブ高さ [m]	耐力に対する安全率 c	破断に対する安全率 bc
caseA	1	1.0	1.5	1.7
	2		1.7	2.0
	3		2.0	2.2
	4		2.2	2.5
	5		2.5	3.0
caseB	1	2.0	1.5	1.7
	2		1.7	2.0
	3		2.0	2.2
	4		2.2	2.5
	5		2.5	3.0
caseC	1	3.0	1.5	1.7
	2		1.7	2.0
	3		2.0	2.2
	4		2.2	2.5
	5		2.5	3.0
caseD	1	5.0	1.5	1.7
	2		1.7	2.0
	3		2.0	2.2
	4		2.2	2.5
	5		2.5	3.0

3-3.クリープ・乾燥収縮の扱い

コンクリートのクリープ・乾燥収縮の扱いは、コンクリート標準示方書に準じ、プレキャスト床版を使用し、載荷材齢を90日とすることから次式で評価する。

$$\phi(t) = \phi_{\infty} [1 - \exp(-0.09t^{0.6})] \quad (1)$$

$$s(t_0) = s_{\infty} [1 - \exp(-0.108t^{0.56})] \quad (2)$$

ここで、 $\phi_{\infty} = 1.0$, $s_{\infty} = 100\mu$ である。

6.荷重載荷方法

既往の研究より、架設ステップを忠実にフォローした解析と架設完了からクリープ・乾燥収縮が発生するとした解析結果は、最終的に応力移行量が同じになることが確認されている。架設を忠実にフォローする解析は時間を要することから、本研究では後者の方法で応力移行の計算を行う。

架設(D+PR)終了後さらにクリープ・乾燥収縮(CR+SH)による応力移行解析を行う。次に、1090

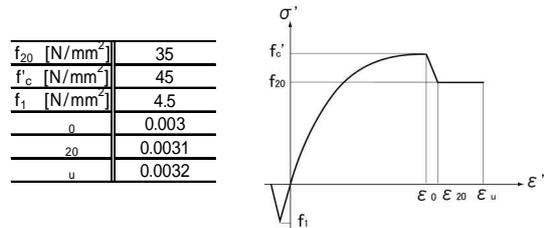
日後の桁全体に活荷重 p_2 と、支間中央 5m の範囲に活荷重 p_1 を載荷する。その後、死・活荷重(D+L)に比例する分布荷重(比例係数)を構造物が崩壊するまで増加させる。本研究における荷重倍率 $=1$ とは、死荷重, ケーブルプレストレス, クリープ・乾燥収縮, 活荷重が作用した状態に対応する。また、荷重倍率 $(=1+)$ は、先の状態に死・活荷重に比例する分布荷重が作用した状態に対応する。これを、数式で表すと以下ようになる。

$$(D + PR + CR + SH) + L = (\alpha = 1) \quad (3)$$

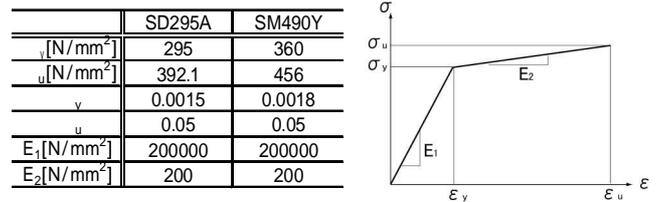
$$\{(D + PR + CR + SH) + L\} + \beta(D + L) = \alpha \quad (4)$$

3-4.材料構成則

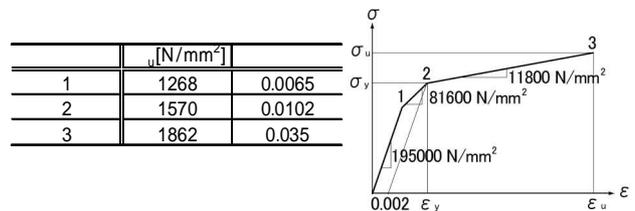
図 2 に材料構成則を示す。コンクリートには(a)の放物線モデルを、鋼桁および鉄筋には(b)のトリリニアモデルを、ケーブルには(c)のバイリニアモデルを用いる。



(a)コンクリート



(b)鋼桁および鉄筋



(c)ケーブル

図-2 材料構成則

4.解析結果

4-1.caseA の解析結果

(a)荷重倍率 変位関係

図-3 に caseA の荷重倍率と変位の関係を示す。図より、安全率の違いに関わらず、荷重倍率の増加に伴い支間中央鉛直変位および塔頂水平変位は、線形的な増加傾向を示す。

(b)変形状態および弾・塑性域の広がり

図-4 に caseA-1 の終局時での変形状態と弾・塑性域の広がりを示す。図よりわかるように、caseA の変形状態の特徴は、塔から少し離れた位置で桁が終局に至り折れ曲がるように変形する。また、弾・塑性域の広がりの特徴は、桁は終局に至った位置を中心に塑性域が広がり、ケーブルは二次勾配領域と塑性域が全体に広がる。

4-2. caseB の解析結果

(a)荷重倍率 変位関係

図-5 に caseB の荷重倍率と変位の関係を示す。図より、このケースも caseA と同様の傾向を示す。

(b)変形状態および弾・塑性域の広がり

図-6 に caseB-1 の終局時での変形状態と弾・塑性域の広がりを示す。図よりわかるように、caseB の変形状態の特徴は、塔位置で桁が終局に至り折れ曲がるように変形する。弾・塑性域の広がりの特徴は、桁は終局した塔位置の桁が塑性化し、ケー

ブルの二次勾配領域が全体に広がる。

4-3. caseC の解析結果

(a)荷重倍率 変位関係

図-7 に caseC の荷重倍率と変位の関係を示す。図より、このケースも他のケースと同様の傾向を示す。

(b)変形状態および弾・塑性域の広がり

図-8 に caseC-1 の終局時での変形状態と弾・塑性域の広がりを示す。図よりわかるように、caseC の変形状態と弾・塑性域の広がりの特徴は、caseB と同様の傾向を示す。

4-4. caseD の解析結果

(a)荷重倍率 変位関係

図-9 に caseD の荷重倍率と変位の関係を示す。図より、このケースも他のケースと同様の傾向を示す。

(b)変形状態および弾・塑性域の広がり

図-10 に caseD-1 の終局時での変形状態と弾・塑性域の広がりを示す。図よりわかるように、caseD の変形状態の特徴は、側径間側の端部を支点として桁全体が沈み込むような変形をする。また、弾・塑性域の広がりは、鋼桁下縁全体が塑性化し、ケーブルの二次勾配領域と塑性域が全体に広がる。

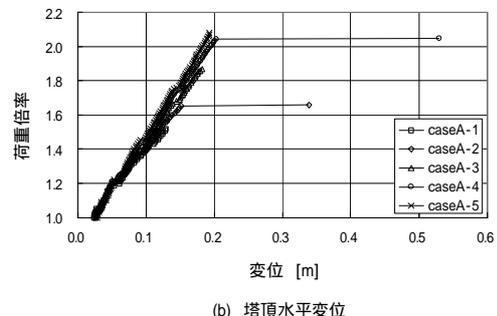
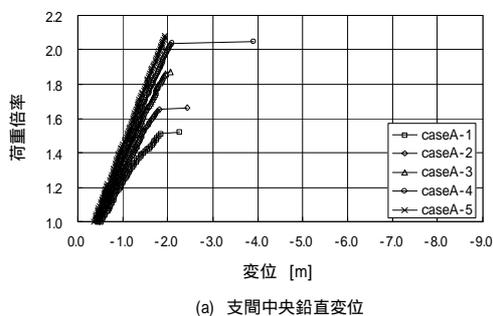
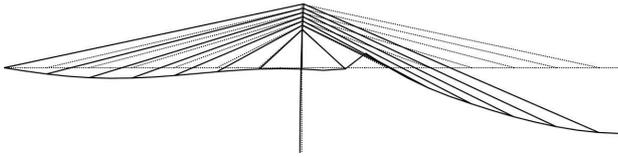
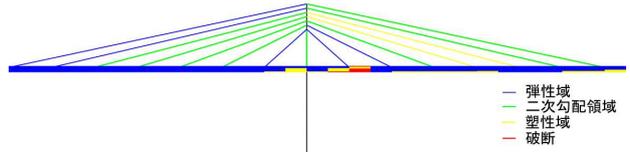


図-3 荷重倍率と変位の関係(caseA)

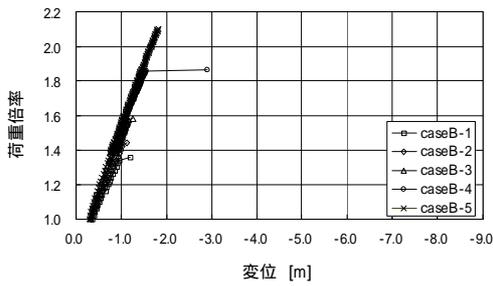


(a)終局時の変形状態(caseA-1)

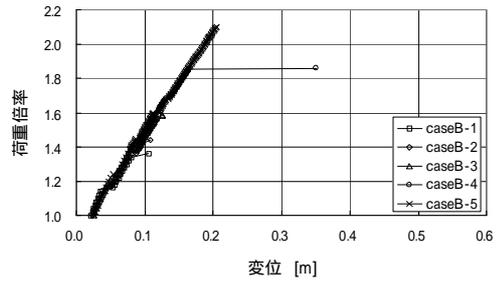


(b)終局時の弾・塑性域の広がり(caseA-1)

図-4 終局時の変形状態と弾・塑性域の広がり(caseA)

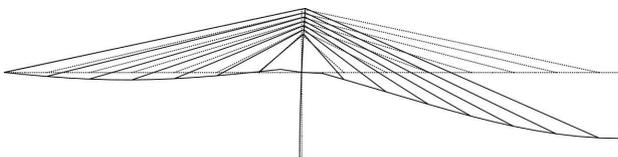


(a) 支間中央鉛直変位

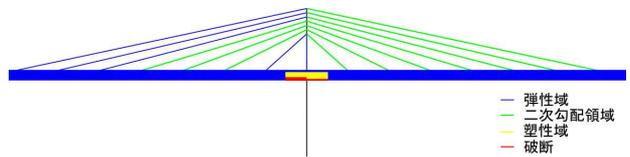


(b) 塔頂水平変位

図-5 荷重倍率と変位の関係(caseB)

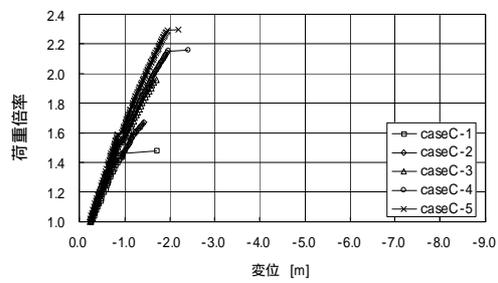


(a)終局時の変形状態(caseB-1)

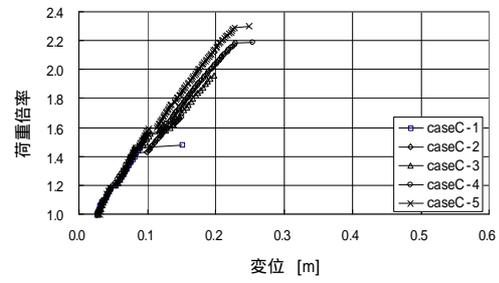


(b)終局時の弾・塑性域の広がり(caseB-1)

図-6 終局時の変形状態と弾・塑性域の広がり(caseB)

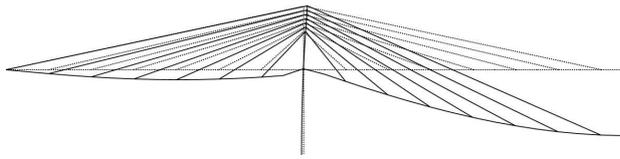


(a) 支間中央鉛直変位

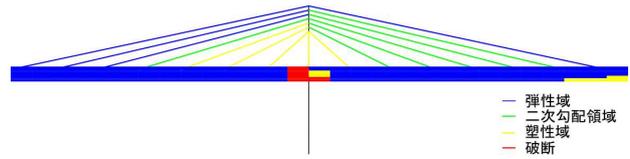


(b) 塔頂水平変位

図-7 荷重倍率と変位の関係(caseC)

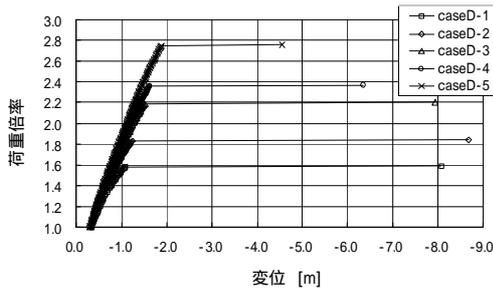


(a)終局時の変形状態(caseC-1)

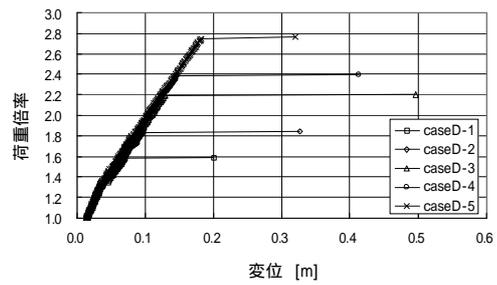


(b)終局時の弾・塑性域の広がり(caseC-1)

図-8 終局時の変形状態と弾・塑性域の広がり(caseC)

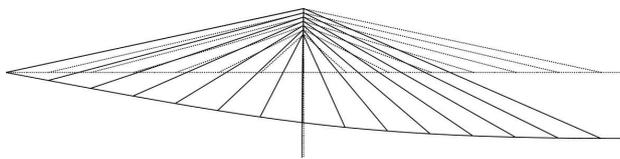


(a) 支間中央鉛直変位

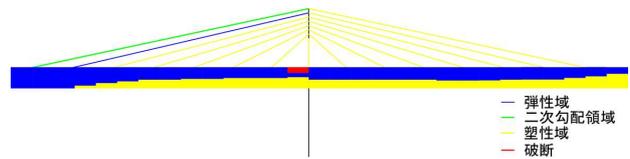


(b) 塔頂水平変位

図-9 荷重倍率と変位の関係(caseD)



(a)終局時の変形状態(caseD-1)



(b)終局時の弾・塑性域の広がり(caseD-1)

図-10 終局時の変形状態と弾・塑性域の広がり(caseD)

5.初期降伏と終局時での荷重倍率

5-1.初期降伏と終局時での荷重倍率

表-2 に各ケースの初期降伏と終局時での荷重倍率の関係を示す。なお、()内の数値はケーブルが二次勾配領域に至ったとき荷重倍率を示す。表より、caseA, B, C はケーブルが二次勾配領域に至るか塑性化すると、直ちに桁が終局状態に至る。これは、ケーブルが二次勾配領域に至るか塑性化にともない、桁の鉛直方向の支持機能が低下し、桁の鉛直たわみが増加したためである。一方、caseD はケーブルが塑性化しても、急速に桁が終

局状態に至らない。これは、桁の剛性が大きいためである。

5-2.安全率と終局状態での荷重倍率

図-11 に各ケースの安全率と荷重倍率の関係を示す。図より、各ケースともケーブル安全率が大きくなるにつれて、荷重倍率が大きくなることわかる。

6.ケーブル安全率と桁・ケーブル重量の関係

図-12 に荷重倍率が一定となる場合のケーブル

表-2 各ケースの初期降伏と終局時での荷重倍率

		caseA		caseB		caseC		caseD	
		初期降伏	終局状態	初期降伏	終局状態	初期降伏	終局状態	初期降伏	終局状態
1	ケーブル	(1.30)	-	(1.32)	-	(1.31)	-	(1.32)	-
	桁	1.52	-	-	-	1.40	-	1.34	-
2	ケーブル	(1.52)	-	(1.44)	-	(1.39)	-	(1.40)	-
	桁	1.66	-	-	-	-	-	1.53	-
3	ケーブル	(1.78)	-	(1.58)	-	(1.53)	-	(1.56)	-
	桁	1.60	1.87	1.50	1.58	1.48	1.96	1.52	2.20
4	ケーブル	(1.97)	-	(1.63)	-	(1.65)	-	(1.67)	-
	桁	1.66	2.05	1.86	1.86	2.14	-	1.95	-
5	ケーブル	(2.08)	-	(1.89)	-	(1.92)	-	(1.93)	-
	桁	1.78	2.08	1.61	2.10	1.53	2.30	1.57	2.76

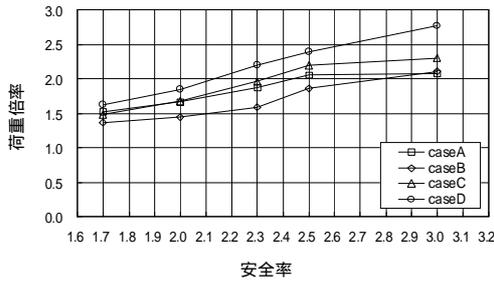


図-11 安全率と終局状態での荷重倍率

安全率と桁高の組合せの関係について示す。図より、橋全体として同じ荷重倍率を得るためには、桁高を低くするにつれてケーブル安全率を大きくする必要がある。

図-13 に同一荷重倍率が得られる場合の桁高と鋼桁重量の関係を示す。なお、桁とケーブルでは単価・施工費用が異なることからケーブル重量については2, 3倍した値を用いて鋼桁重量に換算している。図より、桁高5mは桁高2, 3mと比較すると大きな値となっている。これより、桁とケーブルの剛比を大きくすることは不経済となることわかる。

7. 結論

以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) スパン 150m では、塔位置付近の鋼桁下縁を中心として塑性域が広がり、その位置で桁が折れ曲がるように変形し終局状態に至る。
- (2) 斜張橋の終局状態における作用荷重倍率が同

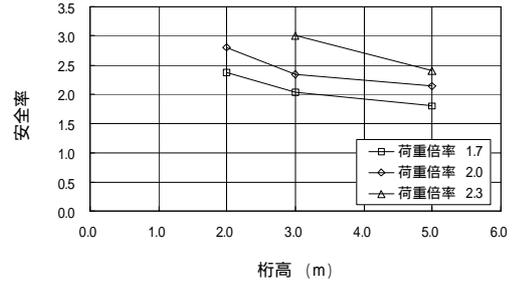


図-12 荷重倍率を一定とするケーブル安全率と桁高の組合せ

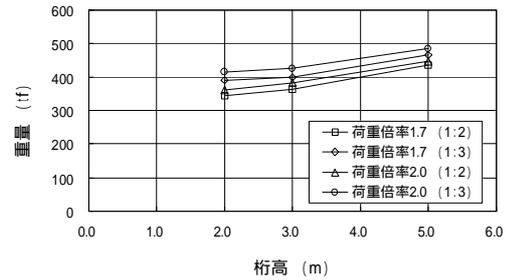


図-13 同一荷重倍率での桁高と鋼桁重量の関係

一となるケーブル安全率を桁高に応じて明らかにした。これより、桁高を低くするにつれてケーブル安全率を大きくする必要がある。

(3) 今回のモデルを対象に、異なる桁高、ケーブル安全率で同一の強度を得るための主桁鋼重量とケーブル重量を計算した。これより、桁の曲げ剛性を大きくすることは不経済になることを明らかにした。

8. 参考文献

- (1) 長井正嗣, 井澤衛, 中村宏: 斜張橋の基本計画設計法, 森北出版, 1997.11
- (2) 新井田勇二: 斜張橋主桁の弾塑性終局挙動の解明と安定照査法の確立
- (3) 田村公伯: 合成斜張橋のクリープ・乾燥収縮・耐荷力性状に関する研究, 長岡技術科学大学修士論文, 2002.2