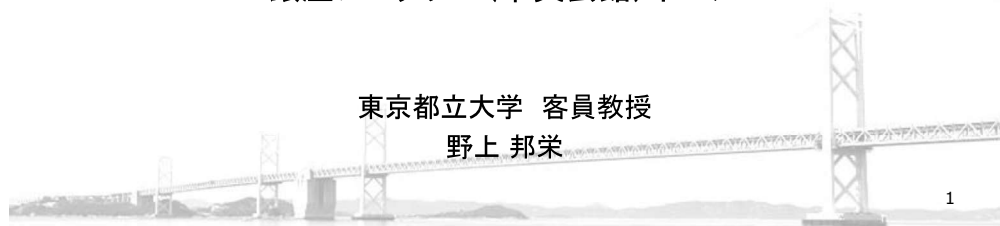


吊形式橋梁の長大化 とケーブル設計

2022年10月7日
銀座ブロッサム(中央会館)ホール

東京都立大学 客員教授
野上 邦栄



吊形式橋梁の 長大化と構造形式



1. 吊形式橋梁の長大化と構造形式

- ・ 長大化の動向
- ・ 構造形式と安全性能

2. ケーブル設計の高度化

- ・ ケーブル設計と安全率
- ・ ケーブルの高強度化

3. 今後への期待



世界最長の吊橋・斜張橋

Canakkale 1915 Bridge
2023m, 2022
Turkey



Russky island bridge
1104m, 2012
Russia



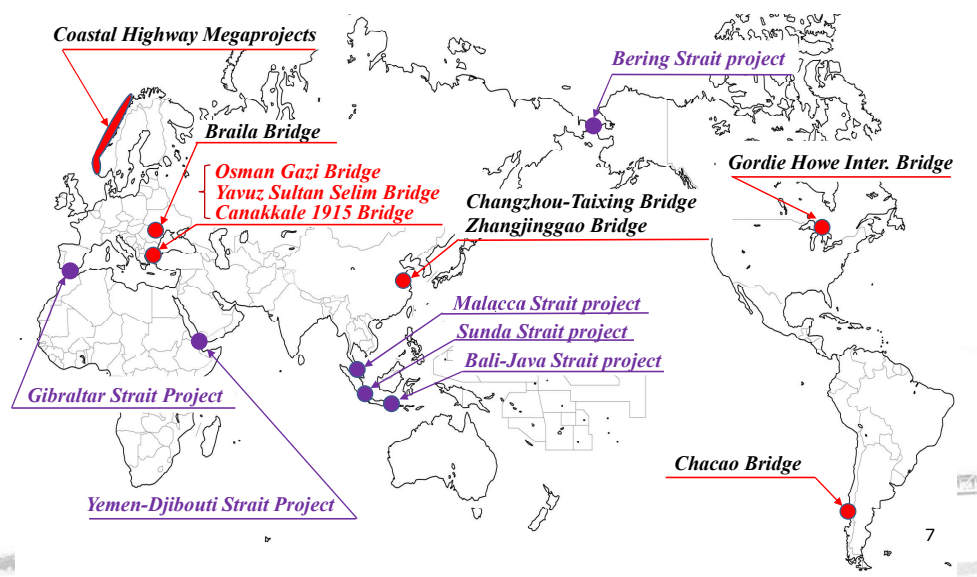
世界の 長大吊橋 ランキング

No.	Bridges	Max. length of span (m)	Country	Year
1	チャナッカレ1915大橋	2,023	Turkey	2022
2	明石海峡大橋	1,991	Japan	1998
3	楊泗港長江大橋	1,700	China	2019
4	南沙大橋(坭洲水道橋)	1,688	China	2019
5	西候門大橋	1,650	China	2009
6	グレートベルト・イースト橋	1,624	Denmark	1998
7	オスマン・ガジ橋	1,550	Turkey	2016
8	李舜臣大橋	1,545	Korea	2013
9	潤揚長江大橋	1,490	China	2005
10	杭瑞高速座洞庭湖大橋	1,480	China	2018
11	南京長江第四大橋	1,418	China	2012
12	ハンバー橋	1,410	U.K.	1981
13	ヤウズ・スルタン・セリム橋	1,408	Turkey	2016
14	金安金沙江大橋	1,385	China	2020
15	江陰長江大橋	1,385	China	1999
16	青馬橋	1,377	China	1997
17	ハルダンゲル橋	1,310	Norway	2013
18	ペラザノ・ナロウズ橋	1,298	U.S.A.	1964
18	ゴールデンゲート橋	1,280	U.S.A.	1937
20	陽邏長江大橋	1,280	China	2007

世界の 長大斜張橋 ランキング

No.	Bridges	Max. length of span (m)	Country	Year
1	常泰長江大橋	1,176	China	2024 (under const.)
2	ルースキー島連絡橋	1,104	Russia	2012
3	滬蘇通長江公鉄大橋	1,092	China	2020
4	蘇通長江公路大橋	1,088	China	2008
5	昂船洲橋	1,018	China	2009
6	青山長江大橋	938	China	2021
7	鄂東長江大橋	926	China	2010
8	嘉魚長江大橋	920	China	2019
9	多々羅大橋	890	Japan	1999
10	ノルマンディー橋	856	France	1995
11	ゴードィ・ハウ国際橋	853	U.S.A.	2024 (under const.)
12	池州長江大橋	828	China	2019
13	石首長江大橋	820	China	2019
14	九江長江公路大橋	818	China	2013
15	荊岳長江公路大橋	816	China	2010
15	蕪湖長江二橋	806	China	2017
17	仁川国際空港第二連絡橋	800	Korea	2009
18	鴨池河特大橋	800	China	2016
19	廈漳跨海大橋	780	China	2013
20	武穴長江大橋	768	China	2021

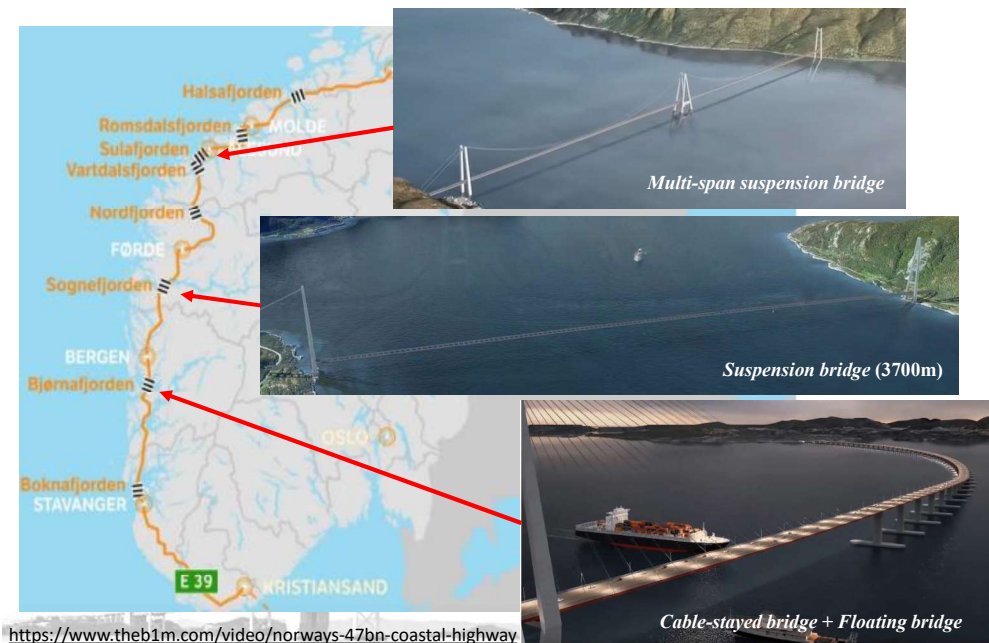
世界の海峡横断計画と 長大吊形式橋梁プロジェクト計画



世界最長の吊橋・斜張橋が いよいよ中国に!!



Norway's Coastal Highway Megaprojects



日本の海峡横断プロジェクト計画

本州四国連絡橋プロジェクトの終焉

海峡横断道路プロジェクト計画

1993 新道路整備 5ヵ年計画 (国土交通省)

1999: 7ルートの開発決定

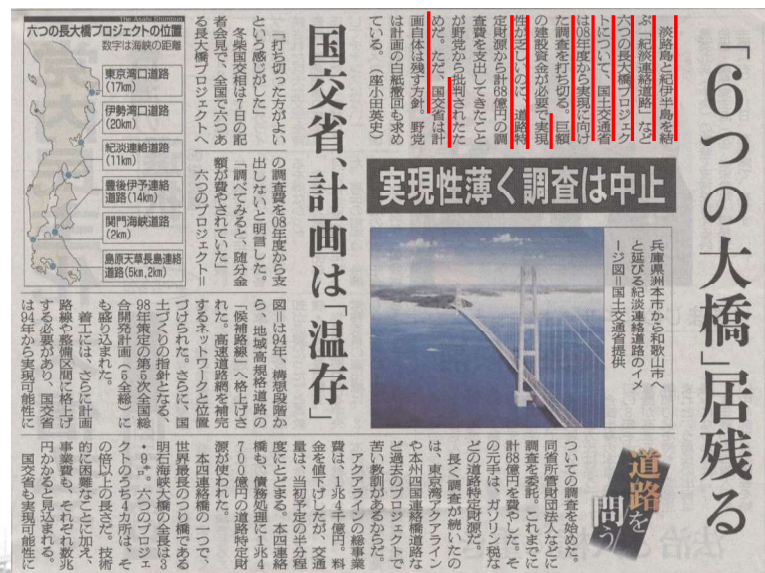
超長大橋の設計法の合理化
建設コストの縮減の追求

海峡	距離	水深 (max)
津軽海峡	18 km	270 m
東京湾口	15 km	80 m
伊勢湾口	20 km	100 m
紀淡海峡	11 km	120 m
豊予海峡	18 km	200 m



(参照)
横山功一: 海峡横断道路プロジェクトを支える橋梁技術の動向, 土木学会論文集, No. 546/VI-32, 1996
駒田敬一: 大規模海峡横断プロジェクト～挑戦の軌跡と事業興し～, 虹橋, No.69, 2005

2008 海峡横断プロジェクト調査の打ち切り (凍結) !!

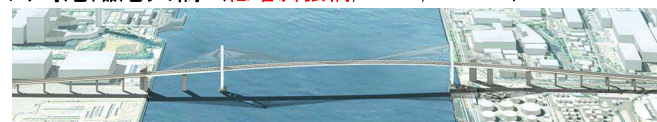


近年の吊形式橋梁プロジェクト(1)

気仙沼湾横断橋 (斜張橋, 360m, 2021)



川崎港臨港大橋 (低塔斜張橋, 525m, 2024 ?)



神戸西航路部
(1主塔斜張橋, 480m)



新港・灘浜航路部 (多径間連続斜張橋, 650m)



気仙沼湾横断橋

川崎港臨港大橋

大阪湾岸道路西伸部

多径間連続斜張橋



Five span cable-stayed bridge, 650m 大阪湾岸道路西伸部
(参照) 国土交通省近畿地方整備局 大阪湾岸道路西伸部経過報告、2021.9



Four span cable-stayed bridge, 650m Queensferry Crossing Bridge 2017



Six span cable-stayed bridge, 300m Nhat Tan Bridge 2015

13

斜張橋の低塔化の検討

- (1) 悪い地盤条件 ⇒ 自定式斜張橋
(2) 空港の近傍、高さ制限 ⇒ 斜張橋は対象外

斜張橋の最適塔高

中央径間長の1/5の塔高(桁上塔高)
本当に最適??

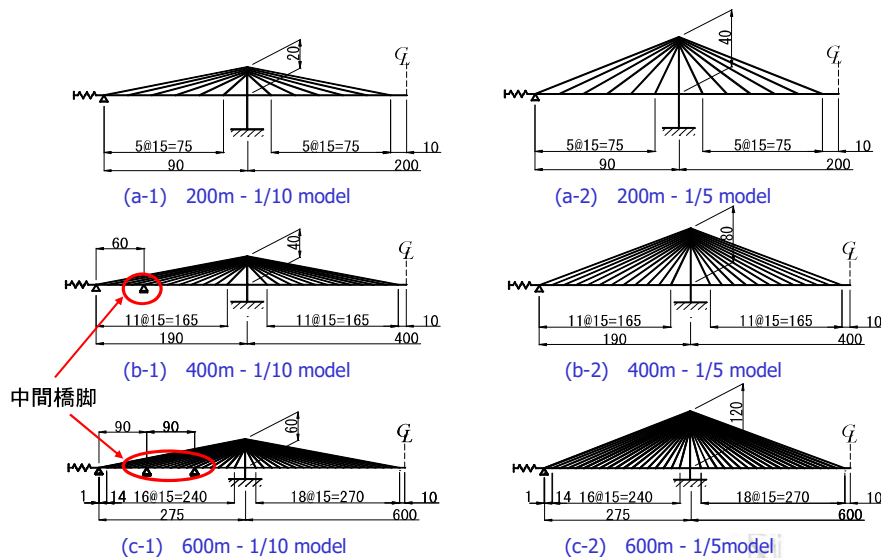
中央径間長の 1/10 の塔高
耐荷力 ??



川崎港臨港大橋

(出典)
秋本、野上、山沢、森園、長井: 塔高を中央径間長の1/10とした鋼製斜張橋の終局強度特性,
構造工学論文集, Vol.51A, 2005

14



荷重倍率 β (D+L)

	200-meter span		400-meter span		600-meter span	
	1/10 model	1/5 model	1/10 model	1/5 model	1/10 model	1/5 model
β_u	1.94	2.34	2.17	2.27	2.02	1.84

鋼重比較 (t)

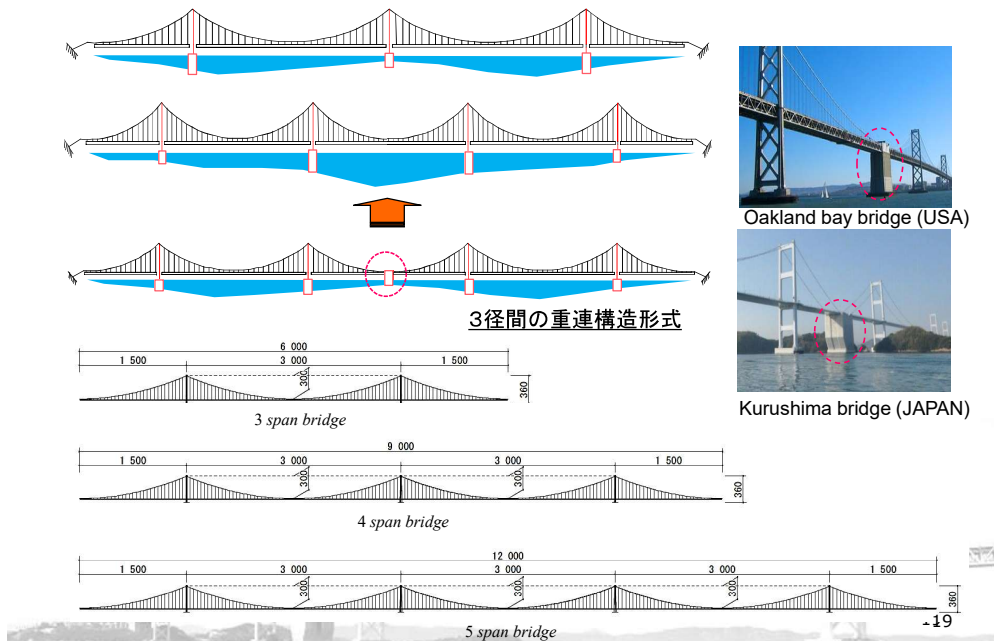
L (m)		200		400		600	
H/L		1/10	1/5	1/10	1/5	1/10	1/5
中間橋脚		無	無	2	無	4	無
桁	$B_G \times H_G$ (m)	20 × 2.5		22 × 2.5		22 × 2.5	
	t_w, t_p, t_w (mm)	20, 15, 15		20, 15, 15		20, 15, 15	
	鋼種	SM400		SM400, SM490Y	SM400	SM490Y, SM570	SM400, SM490Y
	A_G (m ²)	0.774		0.874		0.874	
	I_G (m ⁴)	1.096		1.267		1.267	
塔	$B_T \times H_T$ (m)	2.0 × 3.0		2.0 × 5.0		2.0 × 5.0	
	t_T (mm)	30		40		40	
	鋼種	SM400		SM400, SM490Y	SM400, SM490Y	SM490Y, SM570	SM490Y, SM570
	A_T (m ²)	0.296		0.594		0.594	
	I_T (m ⁴)	0.392		2.024		2.024	
ケーブル	A_c (mm ²)	7.2~11.6	4.2~7.2	4.9~16.2	4.9~10.9	5.8~19.2	4.7~10.9
	d (mm)	119~153	95~119	110~195		110~195	
鋼重	桁 (t)	3,232	3,232	7,490	7,490	11,044	11,044
	塔 (t)	880	1,140	2,283	3,327	2,805	4,677
	ケーブル (t)	246	171	969	715	2,364	1,548
	Σ (t)	4,357	4,544	10,742	11,532	16,214	17,269

16

近年の吊形式橋梁プロジェクト(2)



多径間吊橋の長大化に関する検討



韓国の4径間吊橋



チリの4径間吊橋



中国の4径間吊橋



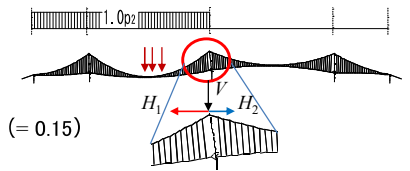
耐荷性能の検討

- 設計条件
 - 本四高速(株)の設計基準・設計要領類に基づく
 - 海峡横断道路ケーブル設計指針(案)の安全率 1.8 を採用
 - 中央塔は立体形式でなく、平面ラーメン形式を採用

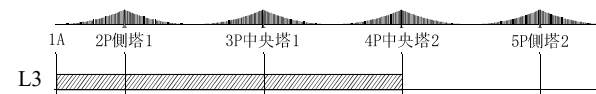
ケーブルの滑動照査

$$f = \frac{V}{\mu \delta H} \geq 2.0$$

f : 滑動安全率
 V : 鉛直力
 μ : サドル部の静止摩擦係数 (= 0.15)
 δH : 水平張力差



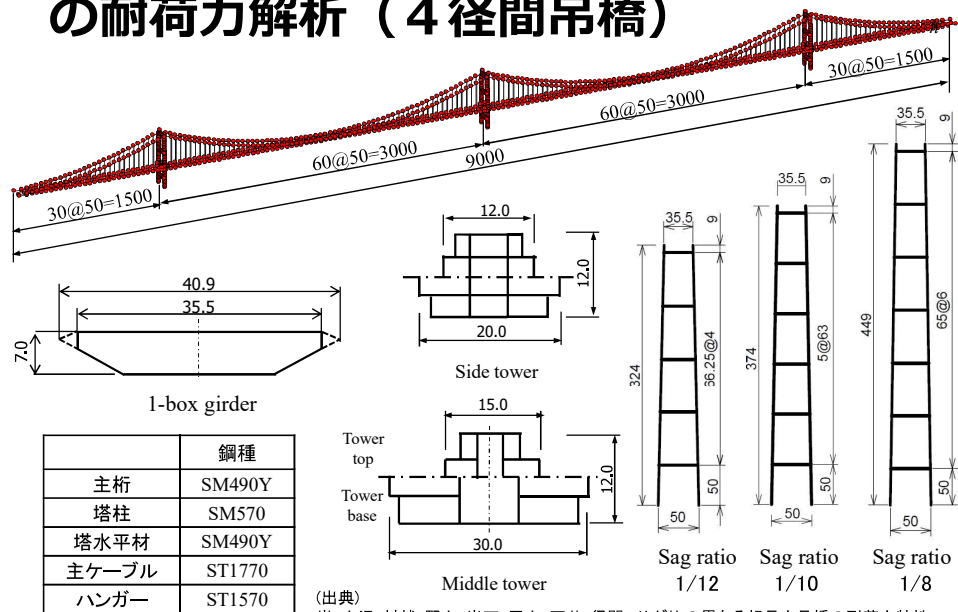
中央径間長 3000mの吊橋



径間数 (活荷重ケース)	3径間 (L2)	4径間 (L3)	5径間 (L3)
滑動安全率 f	17.46	3.01	2.85

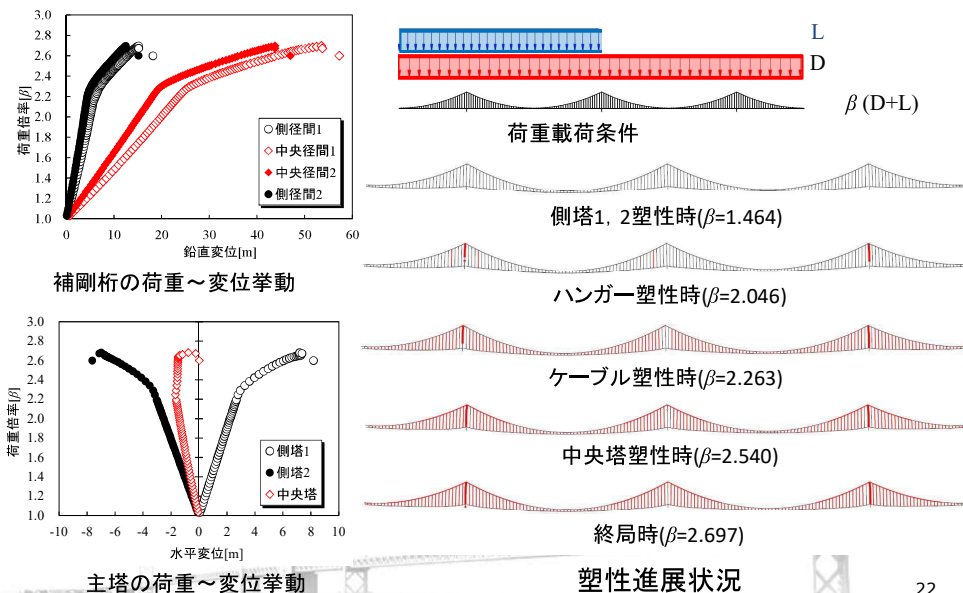


径間数・サグ比の異なる超長大吊橋の耐荷力解析（4径間吊橋）



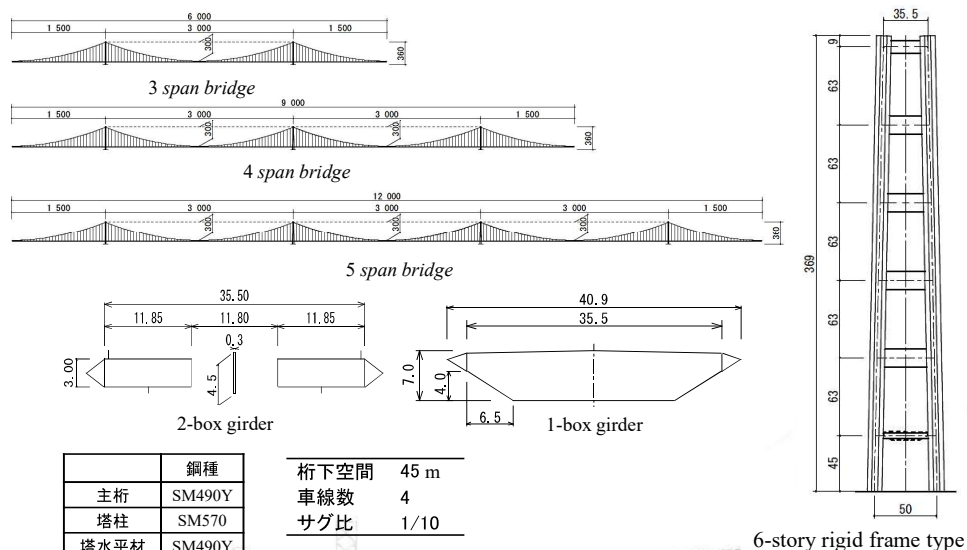
(出典) 岸, 小沢, 村越, 野上, 岩下, 平山, 石井: 径間・サグ比の異なる超長大吊橋の耐荷力特性, 構造工学論文集, Vol.64A, 2018

弾塑性挙動・耐荷力特性（サグ比1/10）



22

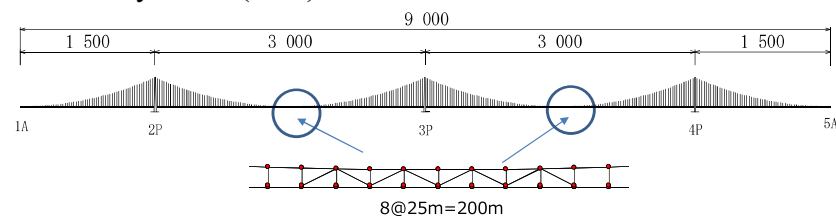
耐風安定性の検討



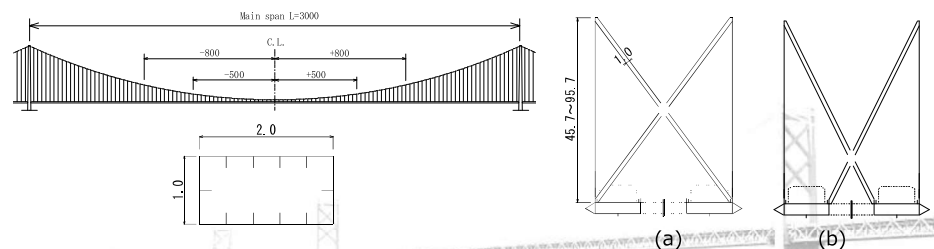
(出典) 岩下, 中村, 野上, 村越, 石井, 平山: 中央径間長3000mを有する超長大径間吊橋の耐風安定性, 構造工学論文集, Vol.65A, 2019

耐風安定性向上策

① Center stay cable (C.S.)



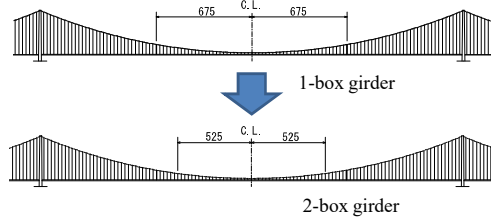
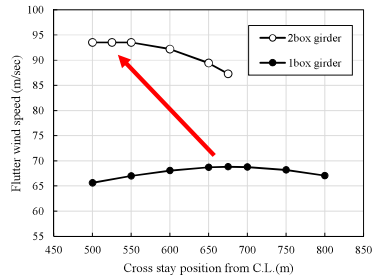
② Cross stay frame (X.F.)



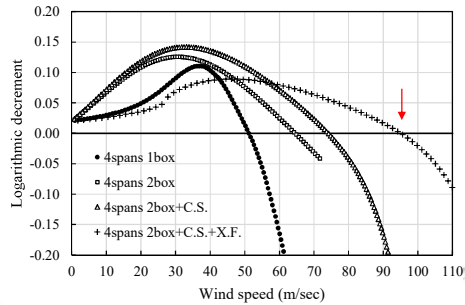
(参照) 横山功一: 海峡横断道路プロジェクトを支える橋梁技術の動向, 土木学会論文集, No. 546/V1-32, 1996

24

Cross stay frame の設置効果



Flutter wind speed by X-type frame position



Flutter wind speed U_{cr} (m/sec)

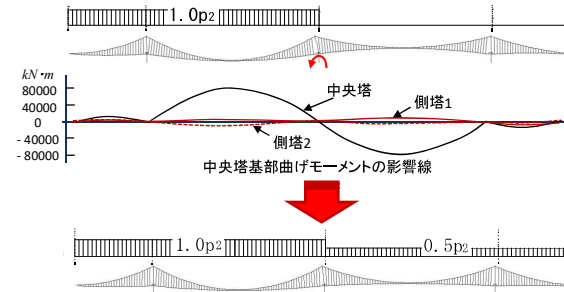
Bridge	1-box	2-box	2-box +C.S.	2-box +C.S.+X.F.
3-span	52.6	64.6	72.6	93.8
4-span	51.2	64.5	74.1	95.0
5-span	50.8	64.5	74.2	94.6

U-d curve (4-span bridge)

25

主塔設計の合理化の検討

1. 実態に近い活荷重導入の考え方の適用



多径間吊形式橋梁の活荷重導入に関する提案法を適用

・影響線載荷は過度に安全側設計

(参考)

駒田, 岩屋, 守矢, 平山: 多径間吊橋の構造特性に関する位置検討, 本州・北海道架橋シンポジウム論文集, 1996

杉山, 金治, 渡邊, 明田: 多径間連続斜張橋に対する2段階設計法の検討, 土木学会全国大会, 2017

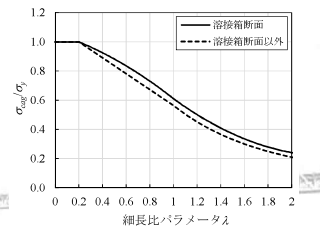
2. H24道示の溶接箱断面柱の基準耐荷力曲線を採用

基本設計基準

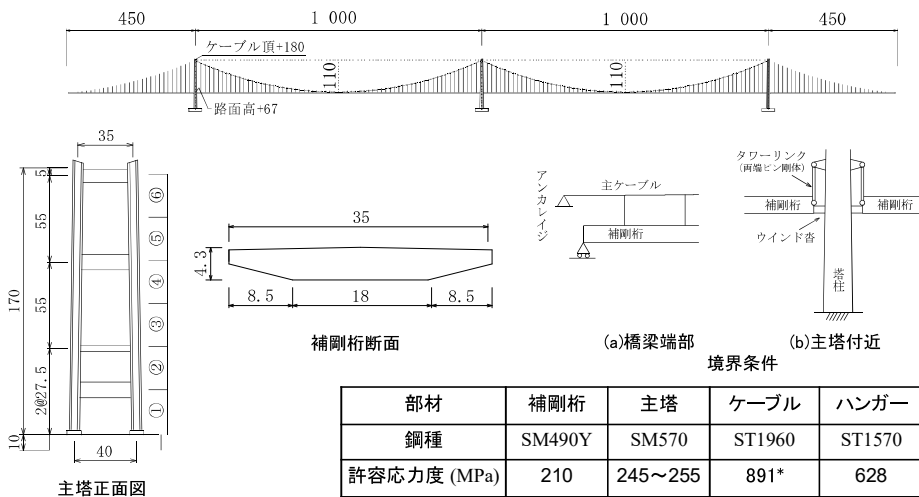
本四高速(株): 上部構造設計基準、吊橋主塔設計要領

(出典)

岩下, 野上, 中村: 4径間吊橋主塔の安全性照査の比較と断面決定に支配する要因分析, 鋼構造論文集, 投稿中



対象とした4径間吊橋



主塔正面図
車線数 6 車線
活荷重強度 39.8 kN/m
設計基本風速 U_{10} 46 m/sec

部材	補剛桁	主塔	ケーブル	ハンガー
鋼種	SM490Y	SM570	ST1960	ST1570
許容応力度 (MPa)	210	245~255	891*	628
降伏応力度 (MPa)	355	430~450	1523	1176
ヤング率 (GPa)	200	200	195	195

*ケーブル安全率は2.2を採用

27

活荷重載荷方法

現設計法:

L_3 に対して許容応力度を割り増さない

活荷重載荷条件と許容応力度の割増係数

活荷重ケース	L_1	L_2	L_3	L_4
現設計法	1.0	1.0	1.0	—
新設計法	1.0	1.0	1.5	1.0

新設計法(2段階設計):

L_4 を考慮

L_3 に対して許容応力度を1.5

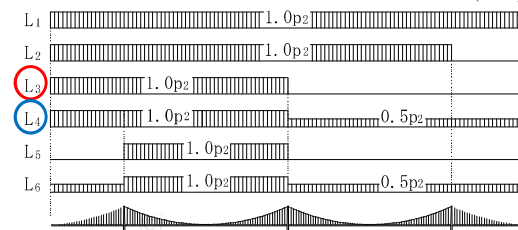
(塔位置での突発渋滞になる稀な状態を考慮)

荷重の組合せと許容応力度の割増係数

D+L±T	D+W+1/2T	D+L(EQ)+EQ±T
1.0~1.5	1.5	1.5

D: 死荷重, L: 活荷重, W: 風荷重 ($U_{10}=46$ m/s)

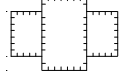
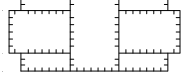
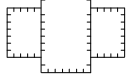
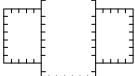
T: 温度荷重 (30 °C), 地震時活荷重 $L(EQ)=1/2 \times L_1$



活荷重載荷状態
(※ L_5 , L_6 はたわみ量算出用)

28

試設計した主塔断面

	現設計法		新設計法	
	側塔	中央塔	側塔	中央塔
断面図				
断面積 (m ²)	1.00~2.09	1.68~4.87	1.00~2.24	1.09~2.35
横軸剛性 (m ⁴)	4.74~9.64	8.89~28.10	4.74~10.32	5.14~10.86
縦軸剛性 (m ⁴)	5.36~20.33	12.03~87.65	5.36~21.77	5.82~22.90

※諸元値は頂部～基部の順。

側塔

新現設計法ともに同じ外形寸法。現設計法に対し、新設計法は2.8%重量増。
→中央塔の剛性低下が原因

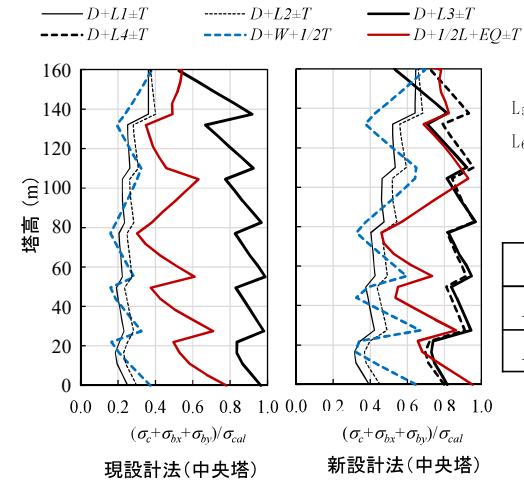
中央塔

現設計法は、橋軸方向に長い7室箱断面となり、重量は側塔の2.11倍
新設計法は、側塔と同じ1室箱断面で対応可能。重量は側塔の1.06倍

新設計法の橋梁全体では、4.1%の重量減。

29

主塔の応力度照査とたわみ量の比較

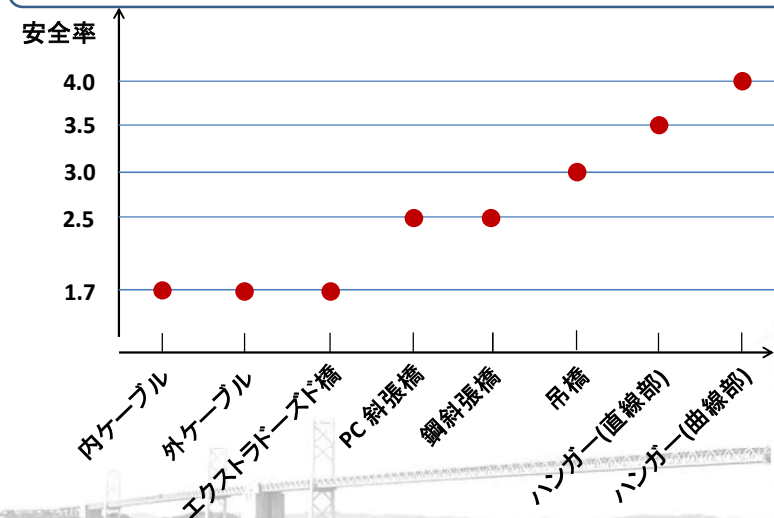


応力度照査

30

H24道示のケーブル安全率

構造形式や橋の種類によって異なる安全余裕を確保



32

ケーブル設計の高度化

31

H29道示のケーブル設計法

● ケーブル部材の区分

200万回繰返し載荷試験を利用して、疲労耐久性の最小値の品質保証

ケーブル部材の区分	200万回繰返し載荷における応力範囲 (N/mm ²)	
	初期張力0.4P _u 又は0.45P _u の場合	初期張力0.55P _u 又は0.6P _u の場合
C1	194	160
C2	160	100
C3	130	80
C4	80	40

C1: 工場製作の平行線ケーブル
(新定着法)
C2: エポキシ樹脂被膜PC鋼より線
及び垂鉛めっきPC鋼より線
(現場製作ケーブル)
C3: 工場製作の平行線ケーブル
(垂鉛め込み法)及び現場製作
の裸PC鋼より線
C4: 工場製作のロープケーブル
(垂鉛め込み法)

- ・素線の破断率が2%以下
- ・ケーブル部材の引張強度の95%以上

● 限界状態3の照査

$$\sigma \leq \xi_1 \xi_2 \Phi_{Ut} \sigma_{uk}$$

σ : 作用応力
 ξ_1, ξ_2 : 調査・解析係数と部材・構造係数の積
 Φ_{Ut} : 抵抗係数
 σ_{uk} : ケーブルの引張強度の特性値

(参照) 道路橋示方書・同解説、II 鋼橋・鋼部材編、平成29年

33

部分係数 Φ_{Ut} ξ_1 ξ_2

抵抗係数 Φ_{Ut}

材料強度のばらつきと、その他の部材耐力算出に関わる不確実性を考慮し、部材強度の変動係数を5%と設定(5%フラクタイル値)

$$\Phi_{Ut} = 1.00 - 1.64 \times 0.05 = 0.90$$

調査・解析係数 ξ_1 と部材・構造係数 ξ_2

- ・ 調査・解析係数と部材・構造係数の積で与える根拠
 - － ケーブル部材に生じる作用効果を算出する過程に含まれる不確実性と部材応答が弾性域を超えたあとの挙動の不確実性を明確に分離することができない
 - － ケーブル構造は、構造全体の挙動として弾性域を超えた後の非線形性が強く、部材相互の境界条件も個々の橋梁によって大きく異なる

・ 調査・解析係数 × 部材・構造係数の取り方

- － 死活荷重比率:
(変動荷重による断面力のばらつきが耐力に与える影響度)
 - － 活荷重による応力振幅:
(変動荷重による応力変動範囲の規模)
- 両係数の小さい係数を採用

(参照) 道路橋示方書・同解説、II 鋼橋・鋼部材編、平成29年

34

ケーブル安全率の変遷

H24道示

部材		安全率
ケーブル	吊橋	3.0
	斜張橋	2.5
ハンガー	直線部	3.5
	曲線部	4.0

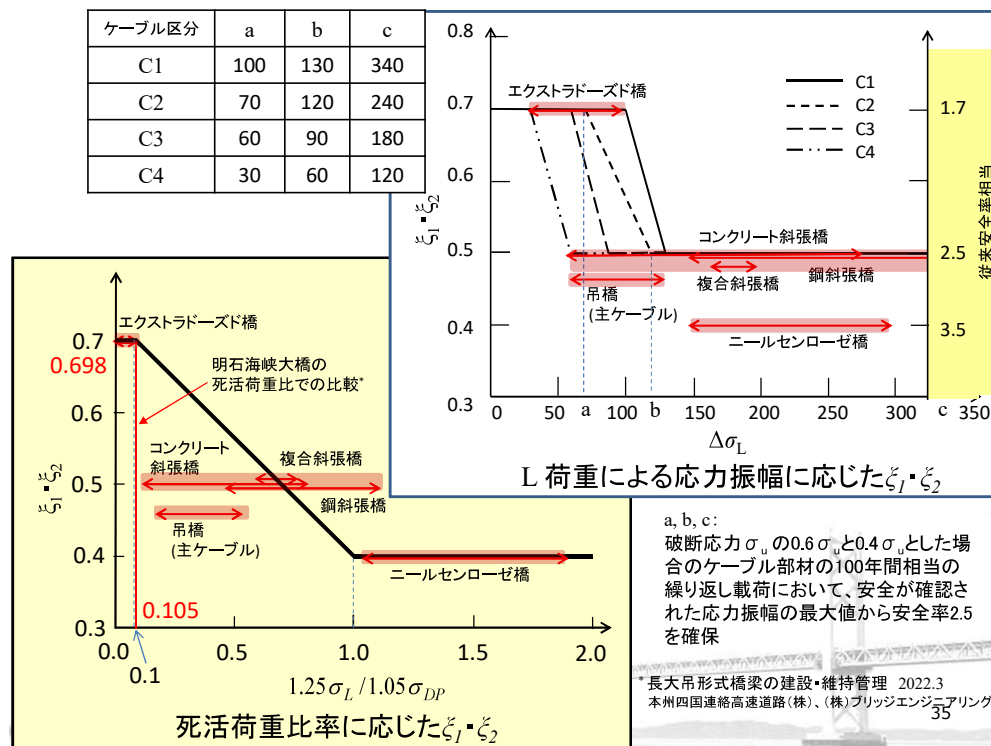
H29道示

$$\approx \xi_1 \xi_2 \Phi_{Ut} \gamma_p \gamma_q$$

本州四国連絡橋

完成年	橋梁名	引張強度 σ_B	降伏点 $\sigma_{0.7}, \sigma_{0.8}$	許容応力度 σ_a	安全率 ν
1965	因島大橋	1568	1156	549	2.86
1978	大鳴門橋	1568	1156	627	2.5
1998	明石海峡大橋	1768	1372	804	2.2

(N/mm²)

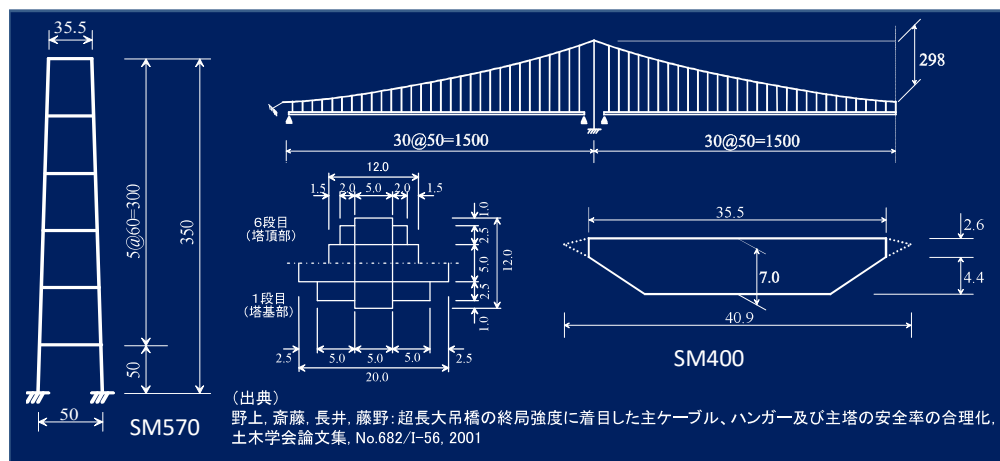


長大吊橋の安全率の合理化の検討

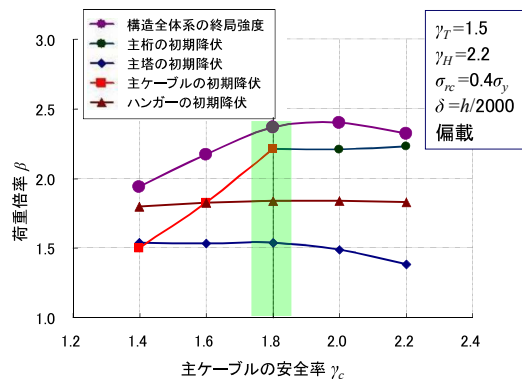
均一耐力の発想からの脱皮

- 部材の終局強度＝橋全体の終局強度？
- 構成要素の安全率低減の可能性の検討
- 合理的な安全率の組合せの提案

構成部材の安全余裕とのバランス化（耐力階層化）



提案安全率による塑性進展と鋼重の低減化



安全率の組合せ			荷重倍率	
γ _T	γ _H	γ _c	降伏時	終局時
1.7	2.5	2.2	1.66	2.81
1.7	2.5	1.8	1.65	2.72
1.5	2.2	1.8	1.54	2.37

現行の安全率 (総重量:35.9)	13.50	9.54	12.50	0.38
	主桁	主塔	主ケーブル	ハンガー
低減率	0%	15%	30%	12%
提案の安全率 (総重量:30.6)	13.50	8.11	8.75	0.34
	主桁	主塔	主ケーブル	ハンガー

(単位: 万t)

総重量の低減率⇒15%

安全率の選定条件と最適組合わせ

- ① 構成要素の初期降伏時の荷重倍率は、現行安全率の場合のそれと同等であること
- ② 終局限界状態において、ハンガー、主ケーブル、主塔及び主桁の全ての構成要素が降伏すること
- ③ 吊橋の終局強度は、所要荷重倍率 $\beta_{req} \cong 2.4$ を確保すること

$$\frac{\sum r_a S(r_f F_k)}{r_i R(f_k / r_m) / r_b} \approx r_i r_b r_a r_f \frac{(D+L)}{R} = \frac{\beta_{req} (D+L)}{R}$$

$$\beta_{req} = r_i r_b r_a r_f$$

$$r_i = 1.40$$

$$r_b = 1.05$$

$$r_a = 1.20$$

$$r_f = 1.39$$

$$1.3D+2.2L=1.39(D+L)$$

S : 荷重効果

R : 抵抗値

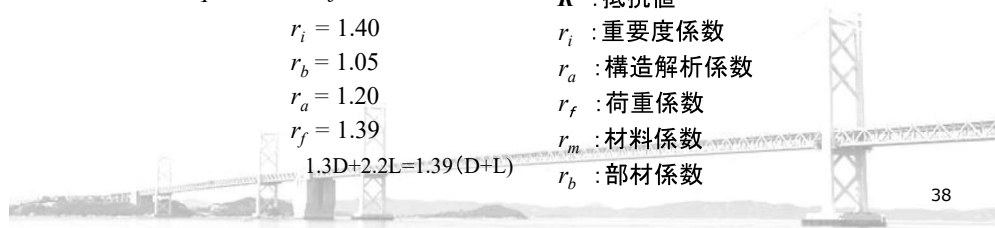
r_i : 重要度係数

r_a : 構造解析係数

r_f : 荷重係数

r_m : 材料係数

r_b : 部材係数



38

亜鉛メッキ鋼線の高強度化

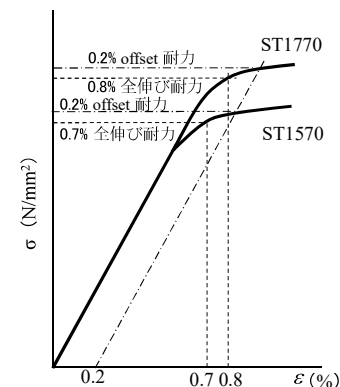
H29道示

種別	降伏強度 (N/mm ²)		引張強度 (N/mm ²)
	0.7%全伸び耐力	0.8%全伸び耐力	
ST1570	1160以上	—	1570以上 1770以下
ST1770	—	1370以上	1770以上 1960以下

2021 JSS規格

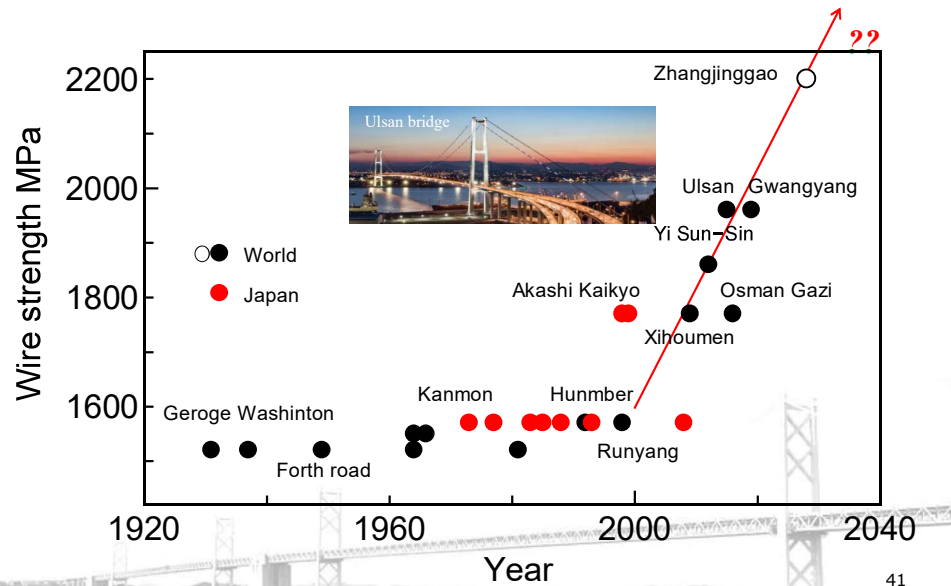
種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
	0.2% offset 耐力	
ST1570	1180	1570以上 1770未満
ST1670	1250	1670以上 1870未満
ST1770	1330	1770以上 1970未満
ST1860	1400	1860以上 2060未満
ST1960	1470	1960以上 2160未満

(参照) 日本鋼構造協会 JSS構造用ケーブル材料規格, 2021.3



39

ケーブルの引張強度の変遷



今後への期待

吊形式橋梁の長大化への技術開発

- ケーブル高強度鋼線の開発
長期使用性・機械的性質の向上
- 吊橋、鋼製・合成・PC斜張橋、エクストラードード橋のケーブル材料の安全率の設定に関する統一化に関する更なる高度化
- 新たな鋼製主塔の開発およびフレキシブルタワーとしての複合主塔の開発
- 主塔、補剛桁、ケーブルなどの構成部材および構造全体系としての限界状態の明確化
- 全体系として限界となる荷重、どのような破壊モードが重要かなどを考慮した設計のバランス化と橋全体系の照査法の構築

吊形式橋梁の維持管理の高度化

- 中小規模吊形式橋梁の正確な状態把握と健全性診断の信頼度の検討（国道、県道、市町村道）
- 点検のあり方の検討
 - ・ 近接目視が容易でない部材、見えない部材に対して、近接目視を補完・代替するための技術の活用などによる点検の合理化（高解像度カメラ、非破壊検査、全磁束法、高所作業設備）
 - ・ 同じ機能を持つ部材を多く有する場合に対して、点検の最適化に向けた状態変化による構造安全性に関する解析的検討
- 構造全体系の健全度評価の検討
 - ・ ケーブル部材の状態変化と部材の重要度や橋の機能への寄与度などの評価
 - ・ 劣化損傷形態と残存耐力および崩壊メカニズムの関係の解明
 - ・ 安全余裕度の捉え方と健全度評価指標の適切な設定
新設橋＝既設橋？、社会が許容する安全レベル $\beta \approx 3.7$?
荷重（設計荷重、実態荷重、将来予測荷重）



ターンバクル破断による吊橋の傾き



ハンガーロッドの破断



主ケーブルの腐食



ハンガーロープ定着部の腐食

吊形式橋梁の技術継承

● 国内市場の停滞

- ・ 設計・施工・架設に関する技術継承が困難
- ・ 受注できるプロジェクトがない限り、人材育成は困難
- ・ 国としての将来にむけた国内プロジェクト計画の推進に期待？

● 海外展開の推進

- ・ 中小規模橋梁工事のODA案件は、堅調な伸び
- ・ 海外プロジェクトへの積極的な参画(技術継承・人材育成のためにも)
- ・ ODA頼みの海外工事に対して、日本出資以外の海外橋梁工事は？



国内基準は、EN、BS、AASHTO、AS/NZ等の基準
に割って入ることは遅きに失したか？

国内基準と海外基準の相違点、優位性の説明用英文ガイドライン

国内基準の背景、性能規定、法制度、社会条件・環境条件、荷重条件

45

ご清聴
ありがとうございました。

46