

構造物の安定概念から発想する橋梁デザインの提案

A study of bridge design approaching from concepts of stability in the fields of engineering.

石井信行*, 白倉誠**, 富家崇雄***

Nobuyuki Ishii, Makoto Usukura, Takao Fuke

*工博 山梨大学講師, 大学院医学工学総合研究部土木環境工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

**工修, 東京コンサルタンツ株式会社 (〒168-0063 東京都杉並区和泉 3-1-8)

***学士, 山梨大学大学院, 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

The authors tried to propose a new methodology of bridge design in this paper. One of the authors had reported in the previous papers that engineering understanding of bridges could be modeled with cognitive prototypes, which were thought to be bases of inspiration for bridge design, so that he thought that adding a new idea to a prototype of an engineer might guide him/her to a new design. Concepts of stability in the fields of bridge engineering, architecture, aeronautical engineering, naval architecture, railroad engineering, robot engineering and bioengineering were studied. A pair of the concept of dynamic and static stability in the fields of aeronautical engineering and naval architecture was chosen for adapting to bridge engineering. Based on the concept, a new methodology of bridge design was proposed, and a conceptual design for a new bridge was shown.

Key Words: Structural Design, Bridge, Stability

キーワード: 構造デザイン, 橋梁, 安定

1. はじめに

橋梁デザインを評価する場合にしばしば用いられる, 力の流れやダイナミックさというキーワードを学術的に説明することを目的として, 著者等の一人は, 橋梁の形態により喚起される力動性のイメージを視覚的力学と定義し, 先行研究においてイメージとしての安定や, 動きについて報告してきた^{1~4)}. それらの研究において構造物力動性認知モデルと構造物プロトタイプの実在を示した. 構造物プロトタイプのうち, システムプロトタイプは橋梁の構造に関する理解(または認識)を意味し, 個人においてシステムプロトタイプは学習されるものであることも示した. また, 橋梁デザイナーについての調査からは, ロベール・マイヤールが実験で鉄筋コンクリートの構造物に実際に載荷し, その変形や破壊の性状を観察し設計に反映していたことが分かった. 構造システムまたは各構造部材の変形や破壊のイメージがマイヤールに構造デザインのアイディアを与えたと考えられるので, 構造デザイナーが多様なシステムプロトタイプを持つことにより, 構造デザインの発展が期待できると考えた.

そこで, 構造システムの性状に関する概念について別の見方や新たな捉え方を示すことで, システムプロトタイプが有する情報を増やすということを考えた.

2. 目的・対象

本研究では, 橋梁の構造システムの性状に関する概念の1つである「安定」に着目し, 橋梁分野とその他の分野の「安定概念」「安定構造」を比較し, それらを統合, 応用することにより, 新たなシステムや形態を有した橋梁構造物を提案する.

3. 研究の流れ

工学分野における構造及び物理, 力学に関係のある機能と安定概念を文献等で調査し, 各分野について抽出した安定概念が示す状態を得る方法論を事例調査する. 得られた方法論を, 構造の特徴と安定を得る具体的な手法により整理し, 橋梁と異なる安定構造を抽出し比較を行い, 両者に違いをもたらした安定概念を基に新たな安定概念の提案を行う. その後, その新たな安定概念に基づいた橋梁システムの提案を行う.

4. 安定概念

ここでは, 構造物の本質的機能までさかのぼった上で, 現在の構造物の安定概念の定義について用語辞典と専門

表-1 工学分野における構造物の安定の定義

分野	対象物	(不) 安定の定義の有無	中立 (不) 安定の有無	動/静 (不) 安定の定義の有無	動, 静的外乱による安定性有無	静安定および動安定の対象となる現象・力 (静…静安定、動…動安定)
土木工学	橋梁 (構造物)	○	○	×	○	静…静的 (転倒, 座屈) / 動…動的 (風, 地震)
建築工学	建築物	○	○	×	○	静…座屈 / 動…発散やフラッター
生物工学	植物	×	×	×	×	
航空工学	飛行機	○	○	○	×	静…軸のずれ / 動…速度 (時間) における振幅
	ヘリコプター	○	○	○	×	
船舶工学	船	○	○	○	×	静…静水時の軸のずれ / 動…動水時の軸のずれ
自動車工学	自動車	○	×	×	×	
機械工学	機械	○	×	○	×	静…静的な力 / 動…動的な力や運動 (速度)
鉄道工学	鉄道	○	×	×	×	
身体運動工学	人	×	×	×	×	
	動物	×	×	×	×	
その他 (原子力, 材料技術など)		×	×	×	×	

書^{5~32)}を調査し整理した。

対象分野は、物理的、力学的に関係し、かつ情報がある程度多く存在するという条件を満たす、土木工学分野^{6, 7)}、建築工学分野^{8, 9)}、航空工学分野^{10~12)}、船舶工学分野^{13~15)}、機械 (ロボット) 工学分野^{16~18)}、自動車工学分野^{19~22)}、鉄道工学分野^{23, 24)}、生物工学 (植物) 分野^{25~28)}、動物・人の身体運動工学分野^{29~32)}である。

その結果として、次のようなことが言えた。

安定の概念には、外力または外部からのエネルギー (自ら移動することにより生じるエネルギーも含む) の作用 (外乱) を受けずに釣合っている基本状態を意味する概念と、外乱に対して何らかの挙動を示している状態に対する概念があり、後者には大きく分けて次の2つ状態を意味する概念がある。

- ①元の状態の釣合っている状態に戻る。
- ②変化が機能に関して認められる範囲の釣合い状態である。

また、分野によって定義が異なるものの、①を動安定 (動的安定) と②を静安定 (静的安定) というように分類している。これら両方が定義されている分野と、静安定だけの分野があり、構造物自体が移動または運動する場合に動安定という概念が存在する場合が多い。(表-1)

5. 安定を得る方法論

5.1 方法論の枠組み

安定概念を整理した各工学分野の具体事例を調査し、次の枠組みで特徴を抽出し、項目に分類して表 (次頁表-2, 次々頁表-3) に整理した。ここでは、対象としている分野に横断的に関係する制御工学についても調査している。

- ①構造物の基本的な特性。
- ②外部から受けたエネルギーを、構造物がどう処理しているかという外乱対応メカニズム。
- ③外部からのエネルギーを構造のどの部分で処理しているかという外乱 (内乱) 対応システム。人や動物の移動工学分野やロボットの機械工学分野の場合、構造物自体が基本状態からずれる状態を作り出すことにより

外部からエネルギーを受けることから、外乱ではなく内乱としている。

- ④外部からのエネルギーを処理する方法を示す外乱 (内乱) 対策。
- ⑤安定を得る具体的な手法。

調査した全ての分野の方法論を同じ枠組みで説明するために、いずれも抽象的または概念的な捉え方になっている。

5.2 構造物特性

(1) 剛・柔構造

構造物全体の剛さについて、剛であるか柔であるかが方法論に違いをもたらしていると考えられたので、剛構造 (表中「剛」) と柔構造 (表中「柔」) に分類することにした。剛構造は、構造の主要素全てに剛要素が存在している場合であり、柔構造は、構造の主要素に柔要素が存在している場合である。ただし、剛と柔は絶対的な基準によるものではなく、個々の設計における基本的な捉え方等により相対的に判定する。

(2) 復元 (原) 性

外乱が存在しなくなった時に、構造物が本来的に元の位置・形態に戻るかが方法論に違いをもたらしていると考えられたので、元の状態に戻る性質 (復元 (原) 性) の有無を評価した。ここでは、復元を元の形態に戻することを意味するものとして、固定されている構造物の分野である、土木工学分野、建築工学分野、生物工学分野の植物、身体運動工学分野の固定動物に対して用いている。一方、復元は原点 (位置) に戻ることを意味しているため、動いている構造物の分野である、航空工学分野、船舶工学分野、自動車工学分野、機械工学分野、鉄道工学分野、身体運動工学分野 (固定動物は除く) に用いている。

(3) 速度

構造物が速度を有するかどうか方法論に違いをもたらしていると考えられたので、基本状態において構造物が速度を有しているかを確認した。

5.3 外乱 (内乱) 対応メカニズム

表-2 構造物における安定獲得の方法論（1）

●：基本状態 ○：外乱状態

対象部分					構造的性質										外部可変				内部可変				方式	
分	事例	外乱(力)	現象	主要素	装置と対象部分の関係	装置	性質	変位	速度	外力	シス	分散	伝達	対策	形状	位置	シス	メカ	シス	メカ	シス	メカ	方式	
土木工学	桁橋	基本状態		桁+橋脚	-----	-----	剛	●															剛	
		地、風、活	揺れ	桁、※橋脚	-----	-----	剛	○															剛	
		風		桁	-----	-----	剛	○															剛	
		地、風、活		-----	-----	支点(=装)	剛	○															剛	
		地、風、活		-----	-----	桁+装	AMD(Amd Mass Damper)	○															剛	
	アーチ	基本状態		桁+アーチ	-----	-----	剛	●															剛	
		地、風、活	揺れ	桁+アーチ	-----	-----	剛	○															剛	
		風		つり材	-----	-----	剛	○															剛	
		風		-----	-----	リブ+装	TMD(Tuned Mass Damper)	○															剛	
		風		-----	-----	桁+高欄+装	フラップ	○															剛	
	トラス	基本状態		桁、トラス	-----	-----	剛	●																剛
		地、風	揺れ	桁、※対風構	-----	-----	剛	○																剛
		基本状態		桁、塔、ケーブル	-----	-----	剛	●																剛
		地、風、活	揺れ	桁、ケーブル	-----	-----	剛	○																剛
		風		ケーブル	-----	-----	剛	○																剛
	斜張橋	基本状態		塔	-----	-----	柔	○																柔
		地、風、活	揺れ	橋	-----	-----	柔	○																柔
		風		-----	-----	フラップ、フェアリング等	○																	柔
風、地			-----	-----	支点(=装)	積層ゴムアイソレータ	○																柔	
風			-----	-----	塔+塔の上部の装	TMD(Tuned Mass Damper)	○																柔	
吊橋	基本状態		橋、塔、ケーブル	-----	-----	柔	●																柔	
	地、風	揺れ	橋、ケーブル	-----	-----	柔	○																柔	
	風		塔	-----	-----	柔	○																柔	
	風		橋	-----	-----	フェアリング、デフレクタ	○																柔	
	地、風		-----	-----	支点(=装)	積層ゴムアイソレータ	○																柔	
建築工学	吊床版	基本状態		橋	-----	-----	柔	○															柔	
		地、風、活	揺れ	橋	-----	-----	柔	○															柔	
	吊+斜上屋根付免震橋梁	基本状態		橋、塔、ケーブル	-----	-----	柔	○															柔	
		地、風、活	揺れ	橋、ケーブル	-----	-----	柔	○															柔	
	ボンツン	基本状態		通路橋	-----	-----	剛	●															剛	
		地、風、活	揺れ	通路橋	-----	-----	剛	○															剛	
	住宅(耐)※超高層ビルでも利用	基本状態		通路橋	-----	橋+免震装置	積層ゴムアイソレータ	○																剛
		地、風、活	揺れ	通路橋	-----	橋+制振装置	TMD(Tuned Mass Damper)	○																剛
		基本状態		橋+橋脚	-----	-----	剛	●																剛
		地、風、活	揺れ	橋	-----	-----	剛	○																剛
		基本状態		全体	-----	-----	剛	●																剛
		地	揺れ	全体	-----	-----	剛	○																剛
基本状態		住宅+基部/中層の免装	-----	-----	剛	●																剛		
地		揺れ	住宅+中層の免装	-----	-----	剛	○																剛	
基本状態		全体	-----	-----	剛	●																剛		
地		揺れ	全体	-----	-----	剛	○																剛	
生物工学	マン(制)※超高層ビルでも利用	基本状態		層+装+層	-----	-----	剛	●															剛	
		地		層+装+層	-----	-----	剛	○															剛	
		地		層+装+層、棟+装+棟	-----	-----	剛	○															剛	
		地		建物+建物上部の装	-----	-----	剛	○																剛
		地		建物+建物上部の装	-----	-----	剛	○																剛
		地		建物+建物上部の装	-----	-----	剛	○																剛
		地	揺れ	建物+建物上部の装	-----	-----	TMD(Tuned Mass Damper)	○															剛	
		地		建物+建物上部の装	-----	-----	AMD(Amd Mass Damper)	○															剛	
		地		層+装+層	-----	-----	アクティブテンション	○																剛
		地		層+装+層(層+壁)	-----	-----	電磁力装置	○																剛
		地		層+装+層(層+壁)	-----	-----	油圧装置	○																剛
		地		層+装+層(層+フ)	-----	-----	アクチュエータ	○																剛
地		層+装+層(層+フ)	-----	-----	油圧装置	○																剛		
地		建物+建物両脇の装	-----	-----	両端ピンの第三の柱	○																剛		
生物工学	植物	基本状態		全体	-----	-----	剛	●															剛	
		地	揺れ	全体	-----	-----	剛	○															剛	
		基本状態		根、茎、葉、枝	-----	-----	柔	○															柔	
		土・水圧	座屈	根	-----	-----	柔	○																柔
		風		茅(幹)、枝、葉	-----	-----	柔	○																柔
生物工学	柳	基本状態		枝、葉	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
生物工学	コヤシ	基本状態		枝、葉	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
生物工学	柿木	基本状態		枝、実	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	
		風		座屈	-----	-----	柔	○															柔	

表-3 構造物における安定獲得の方法論（2）

●：基本状態 ○：外乱状態

対象部分					構造的性質					外部可変			内部可変			方式				
事例	外乱(力)	現象	主要素	装置と対象部分の関係	装置	性質	選	外	シ	集	散	質	吸	分	形	方	シ	メ	シ	メ
航空工学	飛行機	基本状態	主翼+尾翼+胴	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		飛行時の横揺れ	主翼+胴	主翼+装	-----	エルロン(補助翼)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	垂直尾翼+胴	垂直尾翼+装	-----	ラダー(方向舵)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	可変飛行機	基本状態	主翼+尾翼+胴	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	横揺れ	主翼	-----	ジェット推進偏向装置	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		基本状態	ロータ+尾翼+胴	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ヘリコプター	前進時の横揺れ	ロータ+胴	-----	-----	剛	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	垂直フィン+胴	-----	-----	剛	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		ホバ抵抗	水平安定板+胴	-----	-----	剛	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ノータ	基本状態	ロータ+尾翼+胴	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
船舶工学	船	基本状態	舵+船体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		摩擦抵抗	横揺れ	船+船底と船舷の綫線部の装	-----	ビルジキール(銅板)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		基本状態	船+船内タンクの装	-----	フィンスタビライザー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	水中翼半	基本状態	船+船内タンクの装	-----	アンチローリングタンク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		航行時波	揺れ	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		基本状態	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	水中翼全	基本状態	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		航行時波	揺れ	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		基本状態	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	潜水艦	基本状態	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
進行		水	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
浮上		揺れ	船+船内タンクの装	-----	可動質量型減速装置	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
自動車工学	自動車	基本状態	車体+サス+タイヤ	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	車体	車体+装	-----	テールフィン(ウイング)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		走行時の揺れ	サスの一部の装	スタビライザー	-----	ショックアブソーバー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	ロボ	基本状態	車体+アックス(○装)	油圧式	-----	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		立ち	倒	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		進行	倒	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	無軌ロボ1	基本状態	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		進行	倒	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		無軌ロボ2	倒	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	脚行ロボ	基本状態	車体+アックス(○装)	油圧式	空気式	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
機械工学	鉄道	基本状態	台車+車体+車軸	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	揺れ	台車	サスの一部の装	金属ばね	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		路面不整、蛇行	揺れ	台車	サスの一部の装	空気ばね	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	リニア	基本状態	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	揺れ	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		路面不整、蛇行	揺れ	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	エアロトレイン	基本状態	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	揺れ	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		路面不整、蛇行	揺れ	台車	サスの一部の装	オイルダンパ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	身体運動工学	脊椎、人	立つ(基本)	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
歩行			倒	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
走行			倒	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
脊椎、犬		立つ(基本)	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		歩行	倒	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		走行	倒	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
脊椎、鳥		飛ぶ(基本)	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		空気抵抗	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		歩行	倒	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
棘、ヒトデ		基本状態	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	外敵	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	捕食	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
固、サンゴ	基本状態	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外敵	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	捕食	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
固、ヤギ	基本状態	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外敵	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	破壊	揺れ	全体	-----	-----	剛	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

ている。

(4) 吸収（表中「吸」）

特定の部分、全体部分で外部エネルギー、内乱が与えた変位エネルギーを吸収する方法で対処している。

(5) 分離（表中「分」）

外部エネルギーによる影響の拡大を避けるため、意図的に構造の一部を分離させる方法で対処している。

(6) 速度（表中「速」）

速度をつけることでより釣合いのとれた状態にする方法で対処している。

(7) 形状（表中「形」）

外乱を受けない形状にする方法で対処している。ただし、「許容」の方はどれも該当するため、特別つけないこととし、「拒否」の方だけとする。

5.6 安定を得る手法

上の節で挙げた外乱や内乱に対する考え方について、構造物の具体的な対応の方法を、形状、力学の観点で整理すると、「外部可変」「内部可変」「方式」の3項目にまとめられた。

(1) 外部可変

1) 形状対応

(a) 形状変化（表中「形状」）

構造物の形状を変える方法を採用している。

(b) 位置変化（表中「位置」）

構造物の形状は不変であるが、移動することによって流体に対する相対的な形状を変える方法を採用している。

(c) 方向変化（表中「方向」）

構造物の形状は不変であるが、方向を変えることによって流体に対する相対的な形状を変える方法を採用して

いる。

2) システム

(a) 力学（表中「力」）

外部から見て、力学的なシステムが変化する方法を採用している。

(b) 形状（表中「形」）

外部から見て、形状的なシステムが変化する方法を採用している。

3) メカニズム

(a) 弾性力（表中「弾」）

弾性力：外力によって形や体積に変化に生じた物体が、力を取り去ると再びもとの状態に回復する性質を利用する方法を採用している。

(b) 揚力（表中「揚」）

揚力：飛行機の翼のような薄板を流体中で動かす時に、進行方向に対して垂直（上向きを正方向）に動く力を利用する方法を採用している。

(c) 圧力（表中「圧」）

圧力（おさえつける力）、すなわち二つの物体が接触面で、または物体内の二つの部分が面の両側で垂直におしあう力を利用する方法を採用している。

(2) 内部可変

1) システム

(a) 力学（表中「力」）

外部から見えない内部で、力学的なシステムが変化する方法を採用している。

(b) 形状（表中「形」）

外部から見えない内部で、形状的なシステムが変化する方法を採用している。

2) メカニズム

(a) 剪断現象利用（表中「剪」）

固体内部に剪断現象が起こっている状態（弾塑性変形）を利用する方法を採用している。

(b) 摩擦現象利用（表中「摩」）

固体と固体の摩擦が起こっている状態（相対変位）を利用する方法を採用している。

(c) 粘性現象利用（表中「粘」）

固体に対する流体の粘性抵抗（流体移動）を利用する方法を採用している。

(3) 能動・受動方式

1) 能動方式（表中「能」）

必要に応じて安定を得るために外部エネルギーを供給する方法を採用している。

2) 受動方式（表中「受」）

安定を得るために外部エネルギーを必要としないで対処できる能力を与える方法を採用している。

5.7 安定を得る手法の事例

上で述べた枠組みにより、次章の方法論の提案に関係する分野に属している、「斜張橋」と「飛行機」の分析事

例を示す。

(1) 斜張橋

1) 基本状態：「不変システム」

斜張橋は柔構造であり、形状不変システムであり、速度を有していない構造である。

2) 対応：主要素・部分・装置

外乱対応には4種類ある。

(a) 地震・風・活荷重による揺れ：「許」「分散」「伝達」、対応変化：「弾性力」（対応構造：桁、塔、ケーブル）

外部エネルギーの構造物への侵入を許容し、構造物の中にケーブルなどの柔的要素を配置することで、その入ったエネルギーを分散させ、地盤に伝達する。その時、外部力「弾性力」によって対応する。ここで、外部力とは「外部可変」に関わる力を意味する。

(b) 風荷重による揺れ：「拒」「形状」、対応変化：「不変」（対応構造：ケーブル、桁、塔）

外乱に対してできるだけ避けられるように構造物の形状工夫を部分的に施すことで、外部エネルギー侵入を拒否する。その時の対応は、力や形状が可変をしない。

(c) 風荷重による揺れ：「許」「集中」「質量効果」「吸収」、対応変化：「剪断力」（対応構造：TMD装置、ダンパーのついた斜張橋）

外部エネルギーの構造物への侵入を許容し、特定の部分を集中的に動かすことで「質量効果」を働かせ、構造物の影響を抑え、かつエネルギーを吸収することによって対応する。その時、ダンパーなどでは内部力「剪断力」によって対応する。ここで、内部力とは「内部可変」に関わる力を意味する。

(d) 風・地震荷重による揺れ：「許」「集中」「柔軟」「集中」、対応変化：「剪断力」（対応構造：支点（=積層ゴムアイソレータ）が存在し、ダンパーのついた斜張橋）

外部エネルギーの構造物への侵入を許容し、その入ったエネルギーを特定の部分に集中させ、特定の部分が柔軟になることで構造物の影響を抑え、かつエネルギーを吸収することによって対応する。その時、ダンパーなどでは内部力「剪断力」によって対応する。

(2) 飛行機

1) 基本状態：「速度」「外部位置可変」「外部方向可変」「外部力可変システム」「揚力」「推力」（能動）

飛行機は剛構造であり、速度を有する構造である。また、推力や揚力を要した構造であり、また常に移動しているため、外部力システム（推力や揚力の調整）を変化させ、また、方向を変えて飛行している。飛行が外乱に影響を受けるため、外部形状の工夫や内部コンピューターなどを施すことによって元の釣合い状態に単調に戻る静安定と、元の釣合い状態に収束する動安定の両方の復原性を有している。

2) 対応：主要素・部分・装置

外乱対応には2種類ある。

(a) 飛行時の空気抵抗の揺れ：「拒」「形状」、対応変化：「外

部位置変化」「外部方向変化」(対応構造: 胴体)

外乱に対して, 全体形状を流線形にするなど構造物の形状工夫をすることで外部エネルギーの侵入を拒否する。外乱時には, 外乱の影響が最も少ない位置や方向に変えることで対応している。

(b) 飛行時の空気抵抗の横揺れ, 偏揺れ, 縦揺れ: 「力」「集中」, 対応変化: 「外部形状変化」「外部位置変化」「外部方向変化」「揚力」「推力」(能)(対応構造: 主翼+胴(+補助翼), 垂直尾翼+胴(+方向舵), 水平尾翼+胴(+昇降舵))

外乱や空気抵抗による揺れに対し, 圧力差ができ揚力が生まれるような形状を重心から釣合いのとれた位置に集中的に主翼, 垂直尾翼, 水平尾翼を配置し, それぞれの翼についた補助翼, 方向舵, 昇降舵の形状を変化させることで揚力の強さを調整し, ある特定部分に力を集中的に発生させて方向を元に戻す。その時の対応は, 「形状」「位置」「方向」「揚力」「推力」を調整して対応している。

6. 橋梁における新たな安定を得る方法論の提案

6.1 適用可能な方法論

前章で整理した方法論の各項を基に, 各分野のパターンを作成したところ, 橋梁工学分野 8 パターン, 建築工学分野 8 パターン, 航空工学分野 4 パターン, 船舶工学分野 4 パターン, 機械(ロボット)工学分野 5 パターン, 自動車工学分野 3 パターン, 鉄道工学分野 6 パターン, 生物工学(植物)分野 3 パターン, 身体運動工学分野 6 パターンに整理できた。

さらに, 剛構造であるか柔構造であるかということと, 対応方法との組合せを表にした。(表-4) この際, パターンによっては重複する対応があるので, 分かりやすくするためにも, 原則として 1 つの行に同じ分野のパターンが 1 つとなるようにした。尚, 内乱は橋梁分野には当てはまらないが, 参考のため表に加えてある。

項目の一致度を基準に, 橋梁工学分野に見られない方法論を抽出すると次の 4 つの対応パターンが得られた。

①対応パターン 1: 「剛構造, 身体運動工学パターン 4」, 「柔構造, 身体運動パターン 5」

外部エネルギーを構造内部へ許可し, ある特定部分にエネルギーを集中させて, その部分を分離することで安定を保つ構造。

②対応パターン 2: 「柔構造, 生物工学パターン 2, 3」「柔構造, 身体運動パターン 6」

全体を柔軟にすることで, 外部エネルギーの入力を拒否し安定を保つ構造。

③対応パターン 3: 「柔構造, 生物工学パターン 3」

全体を柔軟にして外部エネルギーの入力を拒否し, さらに, 外部エネルギーが大きくて危険を感知した場合, 自ら構造の一部を分離することで安定を保つ構造。

④対応パターン 4: 「剛構造, 航空工学パターン 2, 3, 4」「剛

表-4 パターン分類表

橋: 橋梁工学分野/建: 建築工学分野/航: 航空工学分野/船: 船舶工学分野/機: 機械(ロボット)工学分野/車: 自動車工学分野/鉄: 鉄道工学分野/植: 生物工学(植物)分野/動: 身体運動工学分野/数字は各分野内での分類を表す。

	外部エネルギー入力										内乱		
	許, 散					許, 集					力		
	伝	柔	吸	質	柔	吸	分	形	柔	分	質	柔	吸
剛構造	橋1	橋1	橋3	橋3	橋2			航2			航1	機1	
	建1	建1	橋4	橋4	航1			航3			機2		
			建2	建2	船1			航4			機3		
				建3				船3			機4		
					建4			車1			船4		
					建5			鉄1			船5		
					建6			鉄5			鉄6		
					建7								
					建8								
				船2									
				車1	車1								
				車2	車2								
				鉄2	鉄2								
				鉄3	鉄3								
				鉄4	鉄4								
柔構造	橋5	橋5	橋7	橋7	橋6			動4			動2	機5	機5
	植1		橋8	橋8				植2			動1	動1	動1
					動5			植3	植3				
					動3			動6					

構造, 船舶工学パターン 3, 4」「剛構造, 鉄道工学パターン 6」「柔構造, 身体運動パターン 2」

外部エネルギーに対応という概念ではなく, 外乱に対して構造自らが力を発生することで対応する構造。

これらのうち橋梁に適用可能候補として, 剛構造の航空工学分野, 船舶工学分野における方法論で, 外乱に対して構造自らが力を発生することで対応する方法の対応パターン 4 を選出した。

6.2 適用可能な方法論の安定概念

前節で適用可能な候補として選出したパターンの航空工学分野, 船舶工学分野の構造物は人を安全な状態で行動させるという機能において橋梁構造と同じであるが, 定義されている安定の概念については橋梁構造と異なる。航空工学分野の飛行機, 可変飛行機, ヘリコプターには, 構造物のいずれかの軸がずれた状態から基本状態に戻することを意味する静安定と, 速度, 時間における基本状態からのずれが振幅の収束として表現される動安定が存在していた。また, 船舶工学分野では, フィンスタビライザー, ビルジキール, 水中翼船に静水時の軸のずれ(静安定)と動水時の軸のずれ(動安定)が存在する。

6.3 安定概念の橋梁への適用性検討

橋梁構造に静安定と動安定が存在していないのは, 橋梁は常に固定される構造物であり, 一部の吊構造形式を除いたほとんどの場合において, 設計基準により動的に荷重を作用させる設計が要求されていない。つまり, あらかじめ「発散することがない」状態であるように設計

されているのである。一方、航空機や船舶は常に動いている構造物であり、波や風などの外力を常に受けている。そのため、外乱が与えられると、外乱要因がなくなっても乱れが収束するかは分からない状態にある。そのため、振動しながら常に釣り合い状態に向かうように、「発散しないような」設計をしなければならない。この両構造物の設計による考え方の違いが橋梁構造に「静安定」と「動安定」という二つの概念が存在していない理由だと考えられる。

しかしながら、橋梁の分野においても構造物が従来のように下部工等に固定されていないという状況を想定することは可能であり、航空工学分野・船舶工学分野の安定概念である静安定と動安定を導入することができると考えられる。

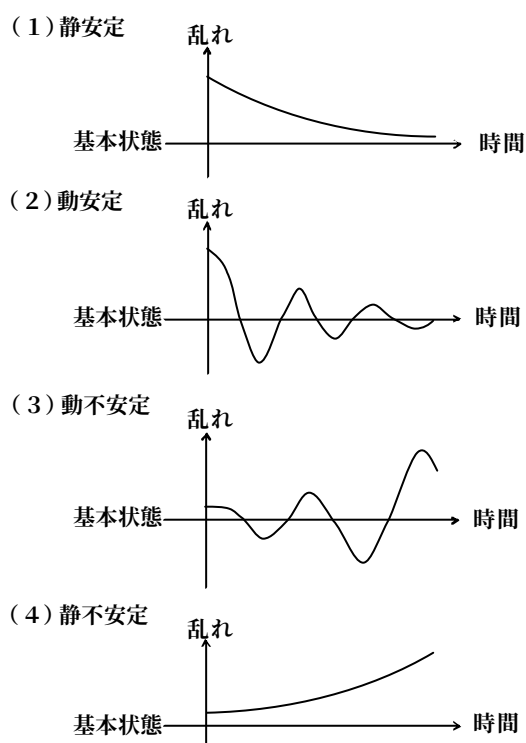


図-1 静安定と動安定の概念

6.4 橋梁工学分野の新たな安定を得る方法論

「人が自然に歩いて快適に渡れる機能を有することを前提に、外力により橋梁の姿勢が変化した時、元の状態へ戻ろうとして復元力が作用する性質の静安定と、物体が外力を受けて運動を始めた時、その振幅が時間とともに小さくなり、釣り合い状態に向けて振動的にまたは非振動的に戻る場合の動安定を有して構造物として成り立つこと」という方法論を提案する。

従来する方法論により設計される橋梁において発生する収束振動も、振幅の大小を無視すれば、提案する方法論により設計した場合に期待される現象と形の上では同じであるが、その現象を意識的に設計の中に位置付けることで新たな構造デザインを期待するものである。

7. 提案する方法論による構造デザイン例

7.1 基本的な考え方と構造システム

本論文で提示する構造デザイン例は、提案する方法論の適用の仕方を示すこととし、架橋条件等については現実性よりも説明性を重視する。

構造システムのコンセプトは、水中で浮力・揚力を発生させる構造体を下部工とし、上部工が水面より上方にある人道橋とする。具体的には、流速が一定の水路に架けると想定し、平面線形が下流に向かって凸の円弧である箱桁を兩岸の支点と桁と柱で連結した水中翼によって支持する。桁は兩岸の支点を結ぶ軸を中心とした回転が可能とする。桁と水中翼の材料は軽量で高強度の GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）とする。

この構造システムは、桁上に活荷重が載らない状態で、死荷重と水中翼に発生する浮力・揚力がバランスし、活荷重が加えられると、桁が兩岸の支点を結ぶ軸を中心に回転する。この回転に伴い、支柱を介して桁に固定された水中翼は下方に変位すると同時に迎角が大きくなる。迎角の増大により揚力が増大し、新たな釣り合い位置でバランスする。桁上への载荷がゆっくりであれば静安定の挙動を示し、急激であれば動安定の挙動を示すことが期待される。

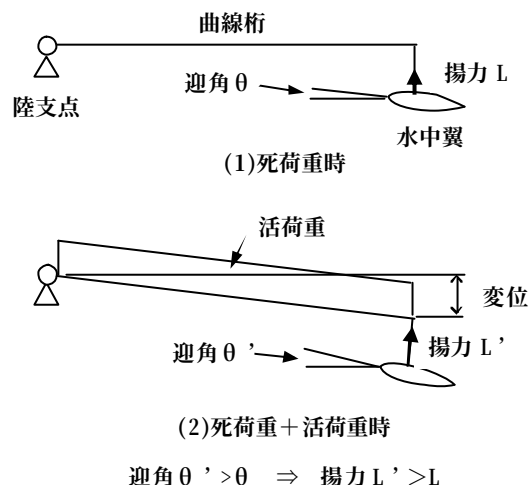


図-2 構造コンセプト側面模式図

7.2 架橋条件

(1) 場所

鉛直護岸を有する 3 面コンクリート張りの水路上とし、水路の諸元及び関連する条件は次の通りとする。

- ・底幅 : $b = 20\text{m}$
- ・水深 : $h = 3\text{m}$
- ・擁壁の高さ : $H = 4.9\text{m}$
- ・桁下余裕高 : 0.7m
- ・水路床勾配 : $i = 1/2000$

河川セグメント 2

(自然堤防河川に対応)

- ・ 気温 : 15℃
- ・ 流れの状態 : 一様流
- ・ 流速 : $v = 3.004 \text{ m/s}$ (マンニングの公式より)
- 水中翼が上下する範囲で一定とする。
- ・ 水の単位重量 : $\rho = 999.1 \text{ kgf/m}^3$

(2) 橋梁

- ・ 橋種 : 水中翼支点付曲線桁人道橋
- ・ 平面線形 : 円弧
- ・ 陸支点間距離 : 20.0m
- ・ 材質 : GFRP
- ・ 活荷重 : 群集荷重 350 kgf/m^2
- ・ 水中翼支点反力 : 鉛直上向き (浮力・揚力)
: 水平 (抗力)
- ・ 許容横断勾配 : $\pm 5\%$ (静止時)

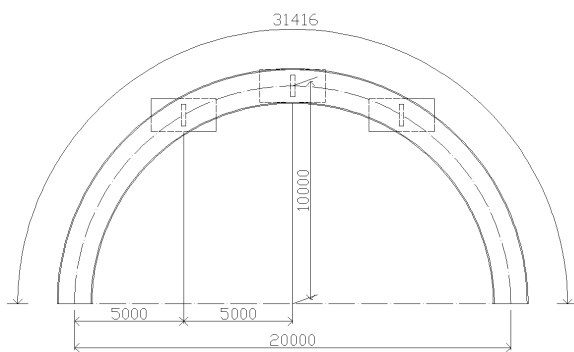


図-3 平面図(単位: mm)

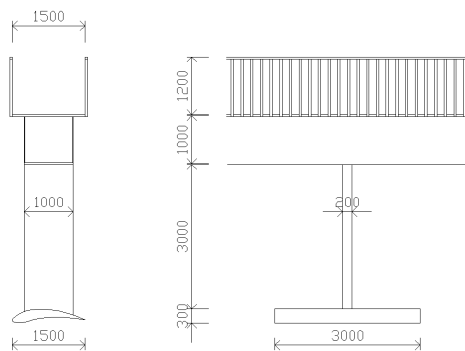


図-4 水中翼支点部詳細図・断面図(単位: mm)

7.3 設計の流れ

① 基本構造系を設定する。

径間割りとは桁の断面を仮定し、死荷重を計算する。水中翼の断面を仮定し、単位長さ当りの抗力、浮力、および単位長さ当りの迎角と揚力の関係を計算する。これらの力は水中翼の軸線の接線方向または法線方向に作用するので、迎角が変化すると作用方向も変化するが、相対的に小さいのでここでは無視する。

② 構造解析モデルを設定する。

全体系を棒モデルとし、両岸上の陸支点は移動を固定し回転は全方向開放する。また、水中翼の支柱が桁に連結する点を支点とする。浮力と人荷重を載荷しない時の

揚力は、このバネ支点へ上方向に載荷する。同様に、水中翼に作用する水平抗力も支点へ水平方向に載荷する。想定する水中翼の寸法では、作用する抗力が相対的に小さいので、構造解析時には桁断面図心から抗力が作用する水中翼前縁との距離により発生する桁のねじりを無視する。また、活荷重によって、水中翼の鉛直方向変位が発生すると、迎角が変化し揚力も増減するので、水中翼支点をバネ支持として扱う。地震荷重・風荷重は考慮しない。

③ 構造解析を行い諸元を決定する。

桁の曲率半径(ここでは回転軸と円弧の頂点との距離で表す。)、桁断面、水中翼の寸法、水中翼の取り付け角度(死荷重時の迎角)について、照査・決定を行う。桁断面に生じる最大の応力度が許容応力度以下、活荷重最大時に円弧頂点での水平変位の値が許容横断勾配を満たすことを条件とした。なお、ここでは許容応力度の余裕に関する条件は与えないので、桁断面が過大であっても求める構造特性が得られれば良いとする。

7.4 設計結果

(1) 桁諸元

- 1) 径間割 : 4 径間
- 2) 曲率半径 (回転軸と円弧の頂点との距離) : 10.0m
- 3) 桁断面

桁高 1.0m
床版幅 1.5m
床版厚 0.035m
下フランジ幅 1.0m
下フランジ厚 0.035m
ウェブ厚 0.016m
高欄高さ 1.2m
高欄幅 0.05m
開口率 75%
断面積 0.118944 m^2

4) 材料特性³³⁾

設計基準強度 $1.3\text{E}+7 \text{ kgf/m}^2$
ヤング係数 $1.4\text{E}+11 \text{ kgf/m}^2$
ポアソン比 0.4
単位重量 1900 kgf/m^3
減衰比 0.015

(2) 水中翼諸元・諸量 (1 基あたり)

1) 寸法

翼断面積 0.2045 m^2
翼周 3.1487m
翼厚 0.3m
翼幅 3.0m

2) 揚力

・ 揚力の計算式

$$L = (1/2) C_L \rho V^2 A$$

ここで、

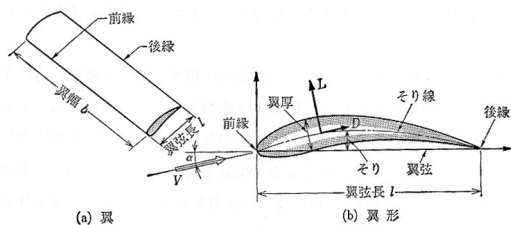


図-5 翼の部位名称³⁴⁾

C_L : 揚力係数³⁴⁾

ρ : 流体の単位重量

V : 一様流れの速度

A : 翼の平面図形の面積

・バネ定数

$$k = \angle L / (D \times \sin \angle \theta)$$

5693kgf/m (図-6 近似式より)

ここで、

$\angle \theta$: 迎角の変化

$\angle L$: 揚力の変化

D : 回転軸と円弧の頂点との距離

・初期揚力 3879kgf (迎角 0°)

表-5 迎角と揚力の関係 (翼幅 3.0m)

迎角(度)	揚力係数 C_L	揚力 L (kgf)
-4	0	0
0	0.2	3877
4	0.4	7754
8	0.6	11631
12	0.82	15895

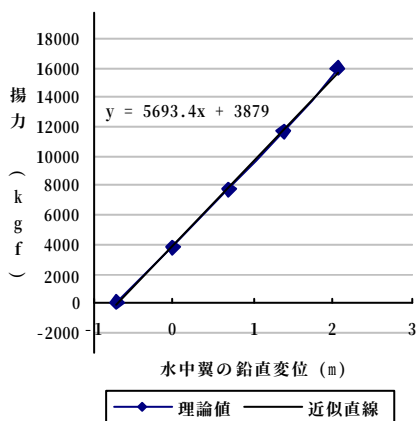


図-6 水中翼の変位と揚力の関係 (翼幅 3.0m)
近似式の x の係数がバネ定数となる。

3) 浮力

浮力 = 水の単位重量 $\times$ 水中翼の体積

$$= 999.1 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \times 0.6135 \text{ (m}^3\text{)} = 612.9 \text{ (kgf)}$$

4) 抗力

抗力の計算式

$$D = (1/2) C_D \rho V^2 A = 62.2 \text{ (kgf)}$$

ここで、

C_D : 抗力係数 ($=0.01$)³⁵⁾

ρ : 流体の単位重量

V : 一様流れの速度

A : 翼の流れ方向の投影面積 (迎角 12°)

図面からスケールアップ: 1.38 m^2

(3) 解析結果

1) 支点反力

表-6 支点反力

		流軸方向 T_x (kgf)	流軸直角方向 T_y (kgf)	鉛直方向 T_z (kgf)
陸支点	死荷重	-4.94E+01	-9.33E+01	1.16E+03
	活荷重	-4.94E+01	-9.33E+01	2.15E+03
水中翼 支点	中央	死荷重		1.96E+03
		活荷重		7.11E+03
	側方	死荷重		2.28E+03
		活荷重		6.76E+03

注) 解析ソフトの制約から水中翼支点反力は鉛直方向のみを示す。

2) 断面力

最大曲げモーメント < 許容曲げモーメント

$$(=1.07\text{E}+4 \text{ kgf}\cdot\text{m}) \quad (=5.36\text{E}+5 \text{ kgf}\cdot\text{m})$$

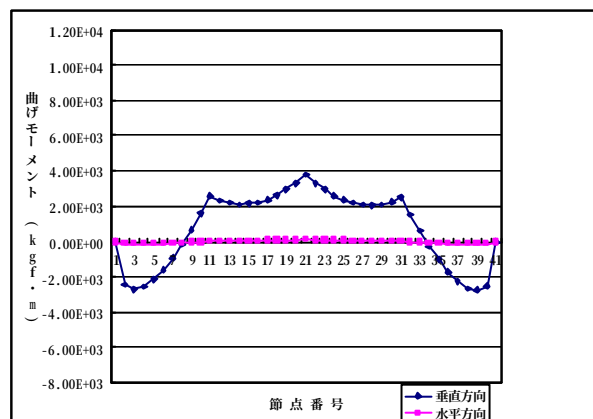


図-7 曲げモーメント図 (死荷重)

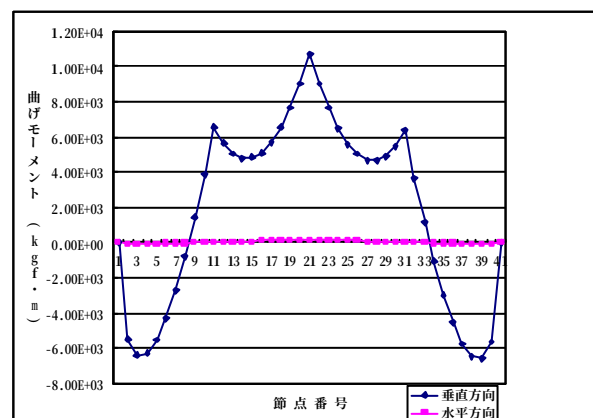


図-8 曲げモーメント図 (死荷重+活荷重)

3) 変位

死荷重時: +0.4124m

死活荷重時: -0.4927m

死荷重時から死活荷重時との差をとると最大変位幅が 0.9051m となり、死荷重時の横断勾配を円弧内側に 5% 与えれば、最大変位時で外側に 5% 弱となり、条件を満

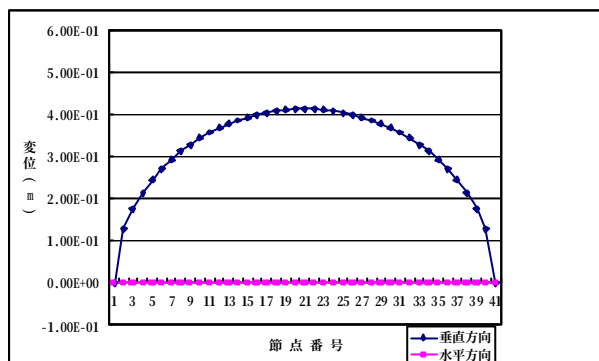


図-9 変位図（死荷重）

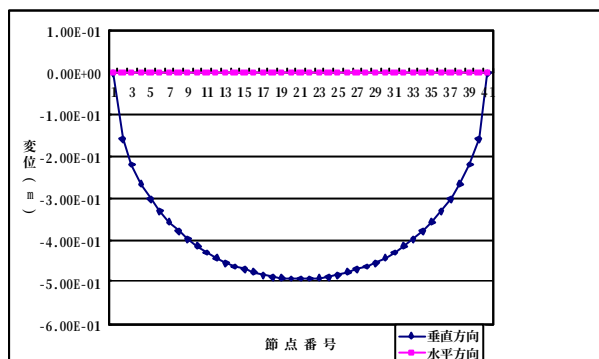


図-10 変位図（死荷重＋活荷重）

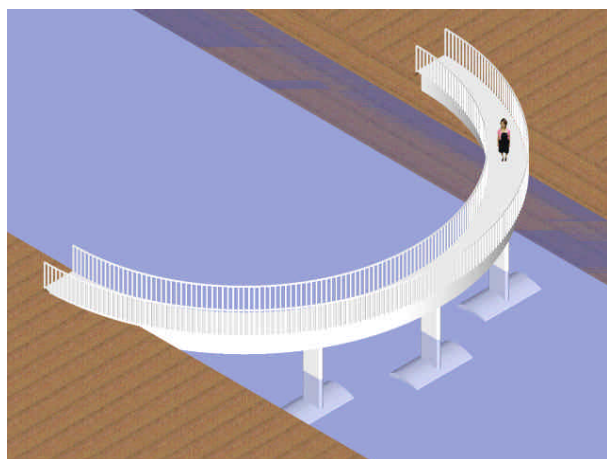


図-11 CG イメージ

たす。

8. まとめ

構造物の安定獲得の方法を土木工学分野，建築工学分野，航空工学分野，船舶工学分野，機械（ロボット）工学分野，自動車工学分野，鉄道工学分野，生物工学（植物）分野，動物・人の身体運動工学分野から抽出し，構造物の基本的な特性，外部から受けたエネルギーの処理メカニズム及び処理を行う部位と方法，そして構造体が安定を得る具体的な手法という枠組みで整理した結果から，主に航空・船舶分野で用いられる概念で，橋梁の構造システムにおいて適用されていない「動安定」に着目し，構造を成立させる方法論として橋梁へ適用することの妥

当性を示した．そして，提案する方法論に基づいた具体的な構造システムの設計事例を示した．

現在の構造設計の方法論は，それぞれの分野の歴史の中で淘汰されずに残ってきたやり方であり，その歴史の中で要求されてきた機能を満たすことに関して信頼性が高く，計画者・設計者にとってそのような既存の設計方法論を採用することは合理的である．しかしながら，構造物に要求される条件が，従来の枠の外にある状況になった時には，新たな発想が必要となる．今回試設計を行った橋梁が実際に架けられる条件の場所が存在するかは不明であるが，提案した橋梁設計の新たな方法論により，物の形にまで辿り着けることを具体的に示したことで，橋梁デザインの発展性の拡大に繋がると期待する．

9. 今後の課題

本論文で示した橋梁の設計例は，構造システムと現象の関係について単純な状況を想定したものであった．今後，提案した構造デザインの方法論の発展性として次のようなことが考えられる．

- ・流速の変化に対応できる水中翼支点付橋梁の設計．
- ・活荷重の載荷状態により形態を変える橋梁設計手法の提案．
- ・構造物の変形を制御する新しいシステムの開発．

参考文献

- 1) 石井信行：構造物の視覚的力学，鹿島出版会，2003.
- 2) 岡本真和，天野光一，石井信行：構造形態が喚起する安定・不安定感の心理学的実験による検討，土木学会・構造工学論文集 Vol.44A，pp.575-580，1998.
- 3) 村田啓治，石井信行：柱状形態が喚起する安定・不安定感の心理学的実験による検討，土木学会・構造工学論文集 Vol.45A，pp.579-588，1999.
- 4) 石井信行，白倉誠，鈴木美穂，行場次朗：橋梁形式判別実験による橋梁認知プロトタイプが存在検討，土木学会・構造工学論文集 Vol.50A，pp.303-313，2004.
- 5) 中井多喜男：自動制御用語辞典，朝倉書店，2000.
- 6) 土木学会編：土木用語大辞典，技報堂出版，1999.
- 7) 日本道路協会編：道路用語辞典第3版，丸善，1997.
- 8) 彰国社編：建築用語辞典第二版，彰国社，1993.
- 9) 建築用語辞典編集委員会編：建築用語辞典（第二版），技報堂，1995.
- 10) 木村秀政監修：航空宇宙用語辞典，地人書館，1983.
- 11) （社）日本航空技術協会編：航空技術用語辞典，（社）日本航空技術協会，1992.
- 12) 鈴木英夫：図解ヘリコプターメカニズムと操縦法，講談社，2001.
- 13) 東京商船大学船舶用語辞典編集委員会編：船舶用語辞典，成山堂，2001.
- 14) （社）日本造船学会編：船舶工学用語集，成山堂，1992.

- 15)面田信昭：船舶工学概論，成山堂，1998.
- 16)西川兼康・高田勝共監修：機械工学用語辞典，理工学，1996.
- 17)（社）実践教育訓練研究会編：機械用語大辞典，日刊工業新聞社，1997.
- 18)越後亮三他：機械工学辞典，朝倉書店，1988.
- 19)鈴木脩己：大車林，三栄書房，2003.
- 20)畠山重信，押川裕昭共編：自動車用語辞典，山海堂，1980.
- 21)自動車用語中辞典編纂委員会編：自動車用語中辞典「第2版」普及版，山海堂，2003.
- 22)GP 企画センター編：グランプリ自動車用語辞典グランプリ出版，1992.
- 23)久保田博：新版鉄道用語辞典，グランプリ出版，2003.
- 24)財団鉄道総合技術研究所編：鉄道技術用語辞典，丸善，1997.
- 25)沼田真：生態学辞典増補改訂版，築地書館，1983.
- 26)ヴェルナー＝ラウ（中村信一，戸部博共訳）：植物形態の事典，朝倉書店，1999.
- 27)八杉龍一他編：岩波生物学辞典第4版，岩波書店，1996.
- 28)Eleanor Lawrence 編（荒木忠雄他監訳）：ヘンダーソン生物用語辞典，オーム社，1996.
- 29)今村嘉雄他：新修体育辞典，不昧堂出版，1976.
- 30)湯村久治，鈴木富生他共編：最新スポーツ大辞典，国書刊行会，1985.
- 31)大石三田郎監修，浅田隆夫編集：スポーツ用語辞典，成美堂出版，1988.
- 32)ユリッヒ・バイヤー編（朝岡正雄訳）：スポーツ科学用語辞典，大修館書店，1996.
- 33)北山暢彦・宇野名右衛門：「伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋」の設計・製作・架設，石川島播磨橋梁技報橋梁特集号，pp.82-86，2001.
- 34)富田幸雄：水力学-流れ現象の基礎と構造-，実教出版，1982.
- 35)河内啓二：揚力と抗力，ながれ 21，pp.323-329，2002.
(2006年9月11日受付)