

橋梁上部工に作用する津波波力の特性に関する解析的考察

奈良崎泰弘¹・田崎賢治²・佐々木達生³

¹正会員 大日本コンサルタント（株） 復興・防災推進部（〒550-0014 大阪府西区北堀江1-22-19）

²正会員 工博 大日本コンサルタント（株） 復興・防災推進部
（〒550-0014 大阪府西区北堀江1-22-19）

³正会員 大日本コンサルタント（株） 技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、東北地方を初め東日本太平洋沿岸部において多くの橋梁が上部工流出等の被害を受けた。橋梁に作用する津波波力については、2004年に発生したスマトラ沖地震の津波によって橋梁が被害を受けたことから、そのメカニズムの解明に向けた研究が進んでいる（例えば1）～4）。近年では実験的研究に加えて解析的な研究も多く行われるようになり（例えば5）、6）、本稿も流体解析ソフトにより橋梁に作用する波力について解析的に考察を行ったものである。

橋梁に作用する波力には大別して衝突する津波の特性および橋梁の構造特性が影響すると思われるが、本研究では前者に着目する。既往の研究では橋梁に衝突する津波の特性として砕波を伴う段波を対象としたものが多い（例えば1）～6）。一方で、東北地方太平洋沖地震において段波状ではなく水位が漸増しながら橋桁が一定の時間をかけて水没する映像も残されているように、橋梁に衝突する津波は必ずしも段波状ではなく、架橋位置により多様である考えられる。

このことから、本稿では津波の流速・波高等の条件に加えて津波前面の水面勾配もパラメータとして考慮し、それらが橋梁に作用する波力に対してどのように影響するかについて考察を行った。なお、橋梁条件としては一般的な鋼鈑桁橋を対象とした。

2. 解析条件

(1) 使用ソフトおよび解析モデル

本研究における解析手法としては、CADMAS-SURF/3D⁷⁾を用いて差分法により行った。なお、鉛直波力の算出においては桁下に閉じ込められる空気が影響すると考えられるが、CADMAS-SURF/3Dにおける「空気圧計算モデル」を使用して近似的に考慮した。

モデル空間としては橋軸方向の奥行きを考慮しない2次元解析とし、橋桁断面のみをモデル化した。橋桁断面形状は幅員10m、床版張出し長1m、上部工高2mの4主鈑桁とした。解析モデルの全体図および橋桁断面拡大図を図-1に示す。

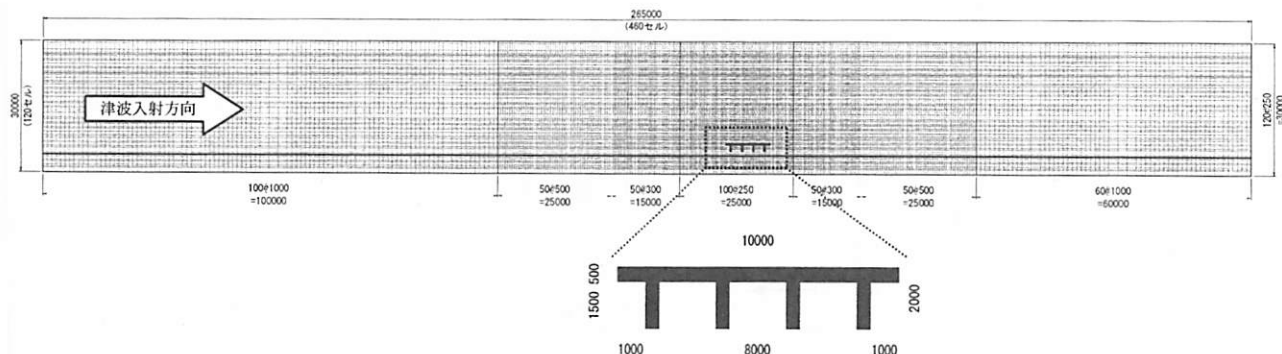


図-1 解析モデル図

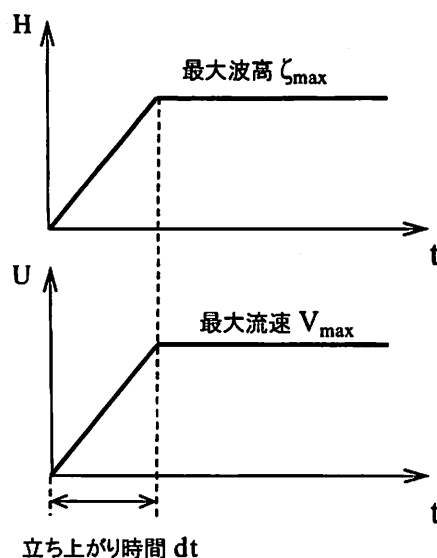


図-2 造波波形

(2) 造波波形

造波は波高および流速について図-2のような波形とし、一定時間をかけて目標値まで波高と流速を増加させ、その後は一定とした。波形に関するパラメータは波高と流速およびそれらが最大値に達するまでの時間（以下、立ち上がり時間と称する）となる。

(3) 解析ケース

a) 桁下高（桁下～地盤高）

橋梁の桁下高は実際に津波の被害を受ける可能性の高い橋梁を想定し4mから8mまで1m刻みとした。

b) 初期水位・波高・流速

初期水位・波高・流速は式(1)の関係⁸⁾に基づいて設定した。これは段波到達前後（図-3の断面Ⅰおよび断面Ⅱ）の流量の連続性から算出されるものであり、この関係を満足させることで波高および流速が安定したものとなる。

$$U = \frac{C\zeta}{H} \sqrt{\frac{gH(H+h)}{2H(H-\eta\zeta)}} \quad (1)$$

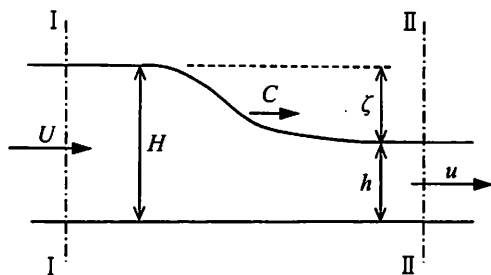
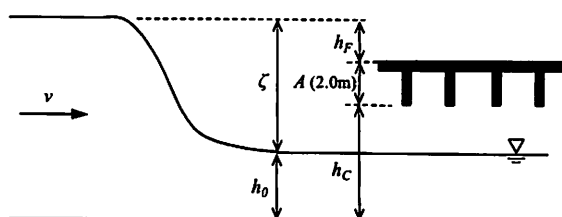


図-3 式-(1)の概念図

表-1 解析ケース一覧

Case番号	初期水位 h_0 (m)	桁下高 h_c (m)	波高 ζ (m)	路面浸水深 h_F (m)	流速 v (m/s)	立ち上がり時間 dt (s)
2-4-4	2	4	4	0	7.46	10~70
3-4-3 ~ 3-4-5	3	4	3 ~ 5	0 ~ 2	4.77 ~ 7.69	
3-5-4 ~ 3-5-5	3	5	4 ~ 5	0 ~ 1	6.24 ~ 7.69	
4-5-3 ~ 4-5-6	4	5	3 ~ 6	0 ~ 3	4.21 ~ 8.04	
3-6-5	3	6	5	0	7.69	
4-6-4 ~ 4-6-6	4	6	4 ~ 6	0 ~ 2	5.51 ~ 8.04	
5-6-4 ~ 5-6-7	5	6	3 ~ 7	0 ~ 4	3.82 ~ 8.43	
4-7-5 ~ 4-7-6	4	7	5 ~ 6	0 ~ 1	6.78 ~ 8.04	
5-7-4 ~ 5-7-7	5	7	4 ~ 7	0 ~ 3	5.00 ~ 8.43	
6-7-3 ~ 6-7-7	6	7	3 ~ 7	0 ~ 4	3.53 ~ 7.79	
4-8-6	4	8	6	0	8.04	
5-8-5 ~ 5-8-7	5	8	5 ~ 7	0 ~ 2	6.16 ~ 8.43	
6-8-4 ~ 6-8-7	6	8	4 ~ 7	0 ~ 3	4.62 ~ 7.79	
7-8-3 ~ 7-8-8	7	8	3 ~ 8	0 ~ 5	3.29 ~ 8.25	

※Case番号は「初期水位-桁下高-波高」とした。
(立ち上がり時間はCase番号に含まない)



パラメータの設定方法として、まず初期水位は下限値2m、上限値は桁下1mとした。波高は1m刻みとし、津波が路面まで到達する高さを下限値とし、式(1)から算出した流速が8m/s程度までとなる波高を上限値とした。なお式(1)を適用すると初期水深に比して波高が大きいほど流速は大きくなる。

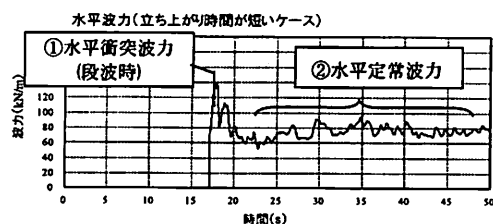
c) 波形勾配

上記の各ケースについて造波の立ち上がり時間を10~70秒で5秒間隔で変化させた。立ち上がり時間が短い場合は橋桁前面で砕け寄せ状に砕波した。

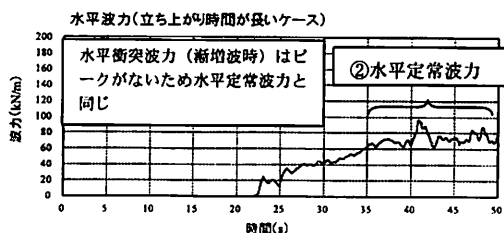
3. 解析結果の抽出

(1) 波力の分類

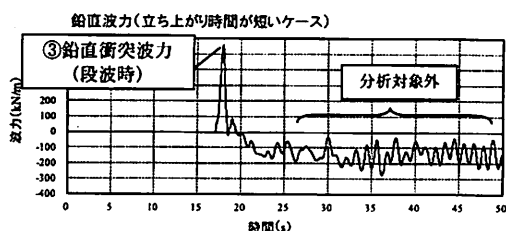
一般に、構造物に津波が衝突したとき、波力は津波衝突時にピークを生じ、その後波力が小さくなって一定となる。これを踏まえ、本解析では橋梁の流出被害や今後の対策を考える際に有用と思われる水平波力のピーク値、鉛直波力のピーク値（上向きを正とする）、水平波力の一定値に着目して解析結果を分析した。以降、それぞれの波力について水平衝突波力、鉛直衝突波力、水平定常波力と称する。なお、鉛直波力についてもピーク値の後に波力が一定となるが、本解析では全てのケースにおいてその値が負となったため分析対象とはしなかった。また、水平衝突波力および鉛直衝突波力については造波における立ち上がり時間により傾向が分かれるため（詳細は後述）比較的立ち上がり時間が短い場合を段波時、長い場合を漸増波時として分類した。ただ



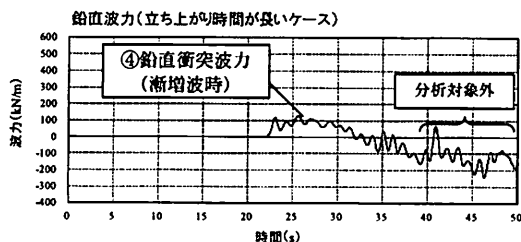
(a) 水平波力（立ち上がり時間が短い場合）



(b) 水平波力（立ち上がり時間が長い場合）



(c) 鉛直波力（立ち上がり時間が短い場合）



(d) 鉛直波力（立ち上がり時間が長い場合）

図-4 波形の例と波力の分類

し、水平衝突波力の漸増波時については衝突の際のピーク値がないため、便宜的に水平定常波力と同じ値とした。以上より、本稿で分析対象とする波力は①水平衝突波力（段波時）、②水平定常波力、③鉛直衝突波力（段波時）、④鉛直衝突波力（漸増波時）となる。図-4に波形の例と波力の分類を示す。

(2) 波力の整理方法

波力波形は短周期の振動成分を含むため、0.5秒で移動平均を行った上で以下の通り整理を行った。なお、2次元解析であるため、波力は橋軸方向1mあたりの値を示す。

a) 水平衝突波力および鉛直衝突波力

水平衝突波力および鉛直衝突波力は橋梁1m前面の津波波高が路面高に到達後10秒間の最大値とした。

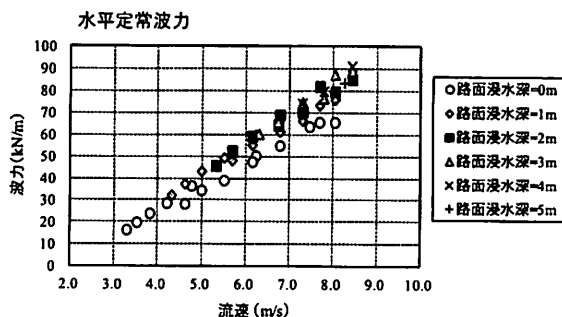


図-5 流速と水平定常波力の関係

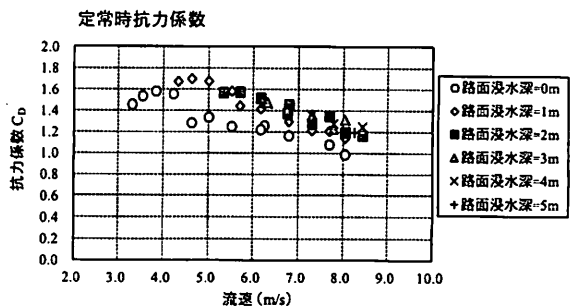


図-6 流速と定常時抗力係数の関係

b) 水平定常波力

水平定常波力は橋梁1m前面の津波波高が路面高に到達した20秒後から20秒間の波力を平均して算出した。水平定常波力については造波の立ち上がり時間によらず、初期水位、波高および流速が同じであればほぼ一定となったため、各ケースについて全ての立ち上がり時間での値を平均して整理した。

4. 各波力の特性

(1) 水平定常波力

図-5に各ケースの流速と水平定常波力の関係、図-6にそれを式(2)により抗力係数 C_D として無次元化したものを示す。なお、流速の影響に加えて路面より上の水位の影響を確認するため、路面浸水深ごとに結果を整理した。

$$C_D = \frac{Fx}{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot A} \quad (2)$$

路面浸水深が0.0mのときがその他のケースに比して抗力係数が小さい。路面浸水深が0.0m以外のケースでは路面浸水深による抗力係数の変化は見られず、流速が大きくなるほど抗力係数が小さくなる。また値としては1.0～1.7程度となった。

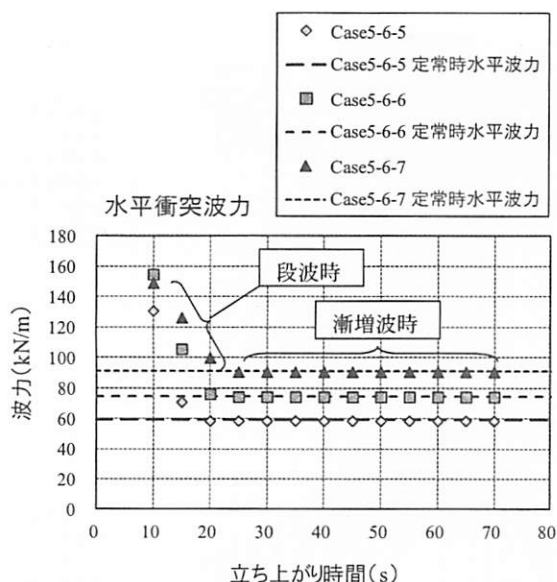


図-7 立ち上がり時間と水平衝突波力の関係

(2) 水平衝突波力

a) 立ち上がり時間との関係

水平衝突波力と立ち上がり時間の関係について、代表としてCase5-6-5, 5-6-6, 5-6-7の場合を図-7に示す。これによると、水平衝突波力は立ち上がり時間が20秒程度以上では水平定常波力を超えない。立ち上がり時間が20秒程度以下になると水平衝突波力は急増し、最も立ち上がり時間が短い10秒のときに最大となる。（前者が先に述べた漸増波時で、後者が段波時。後述する鉛直衝突波力についても同様）。図-8にCase5-6-7を代表として立ち上がり時間が10秒、20秒、70秒とした場合の津波衝突時の水面形状を示す。

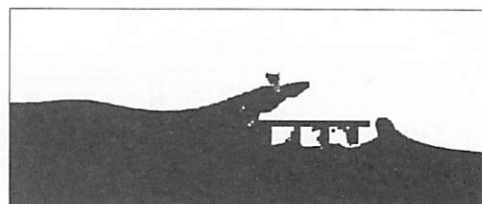
b) 段波時の水平衝突波力

段波時の代表として、立ち上がり時間が10秒の場合について考察する。このときの流速と水平衝突波力の関係を図-9に、また水平定常波力と同様に無次元化して抗力係数としたものを図-10に示す。水平衝突波力は流速に比例して増加する。抗力係数については水平定常波力と同様に流速が大きいくほど小さくなる傾向を示し、その値は2.0～4.5となった。

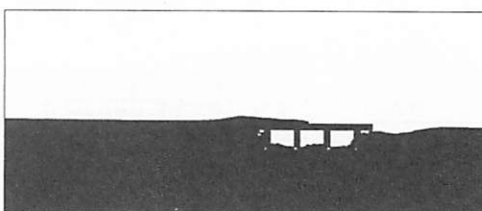
次に、流速以外で水平衝突波力に影響があると予想される路面浸水深、橋桁前面1mの位置で桁下高から路面高まで水位が上昇するのに要する時間（以下、水位上昇時間と称する）について水平衝突波力との関係をそれぞれ図-11、図-12に示す。前者については、段波衝突時に橋桁背面の水位が上昇しておらず桁背面に静水圧が働かないことから桁前背面での水頭差により水平波力が生じると考えられる（図-8 a), b) のような状態）。また後者については橋桁前面各高さに作用する衝撃的な圧力の同時性から、



a) $dt=10s$



b) $dt=20s$



c) $dt=70s$

図-8 津波衝突時の水面形状 (Case5-6-7)

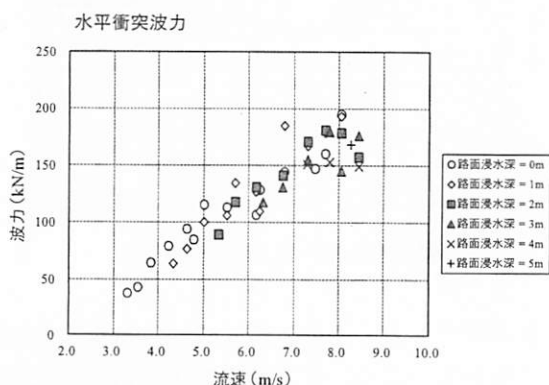


図-9 流速と水平衝突波力の関係

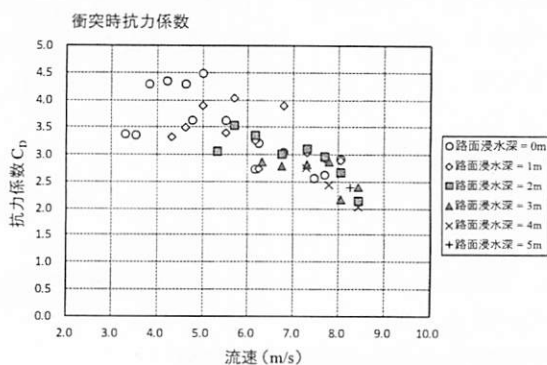


図-10 流速と衝突時抗力係数の関係

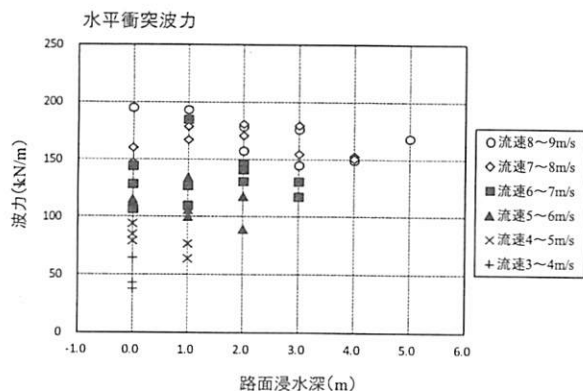


図-11 路面浸水深と水平衝突波力の関係

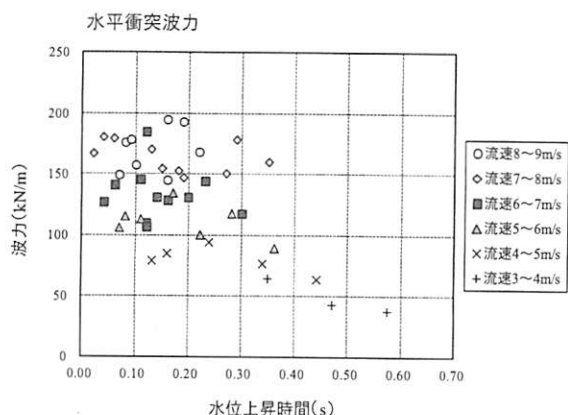
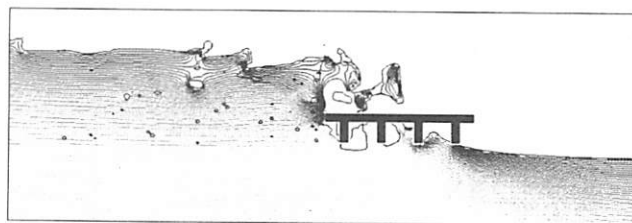


図-12 水位上昇時間と水平衝突波力の関係

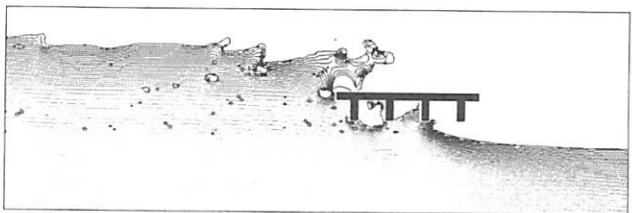
水位上昇時間が短いほど波力が大きくなると考えられる。なお、波力への影響が強いことがわかった流速の影響を除いて分析を行うため、流速1m間隔ごとに整理を行った。

まず図-11 より、各流速における路面浸水深と水平衝突波力の関係について、これらの間に明確な相関は見られない。次に図-12 から、水位上昇時間が長いほど波力が小さくなる傾向が若干あることがわかる。これは先に述べた水位上昇時間による水平衝突波力への影響についての推測と同傾向である。しかし、流速による分類が幅をもっていることもあって各流速における水平衝突波力はばらつきが多い。路面浸水深および水位上昇時間についてはさらなる分析が必要と考える。

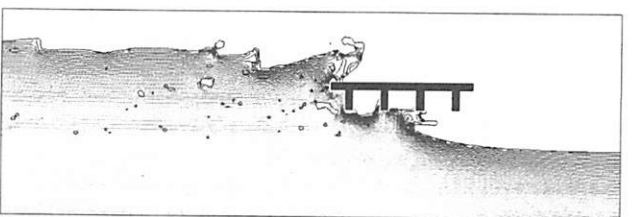
段波時の水平衝突波力について、参考として図-13および図-14に一定の初期水位、波高、流速に対して桁下高のみ変えた場合（代表としてCase5-6-7, 5-7-7, 5-8-7, 初期水位 5m, 波高 7m, 桁下高 6m, 7m, 8m）の段波衝突時圧力コンター図および桁前面の圧力分布を示す。図-14より、Case5-6-7では高さ0.0m~1.5m（主桁ウェブに相当）において圧力がほぼ一定であり、Case5-7-7では高さ1.0m付近（ウ



a) Case5-6-7 dt=10s



b) Case5-7-7 dt=10s



c) Case5-8-7 dt=10s

図-13 段波衝突時の圧力コンター図

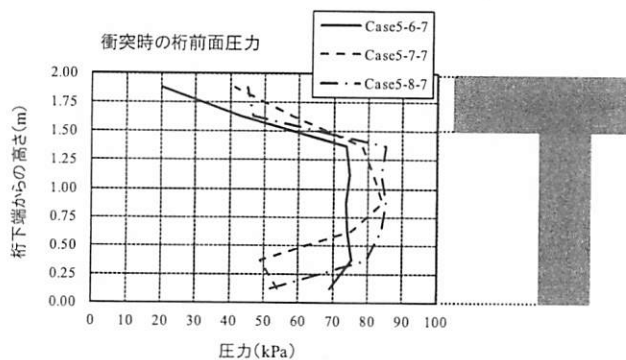


図-14 段波衝突時の桁前面圧力分布

ェブ中心部）、Case5-8-7では高さ1.5m付近（ウェブ上端）において圧力が最も大きくなっていることがわかる。また、桁下端ではCase5-6-7が最も圧力が大きいのにに対し、床版前面においてはCase5-6-7が最も圧力が小さい。この分布は津波が橋桁に衝突する直前の水面の勾配の影響と考えられ、初期水面に近く比較的勾配が緩やかな状態で津波が衝突するCase5-6-7では下端が大きくなり、急勾配で衝突するCase5-7-7およびCase5-8-7では上端と下端がほぼ同程度の圧力となる。

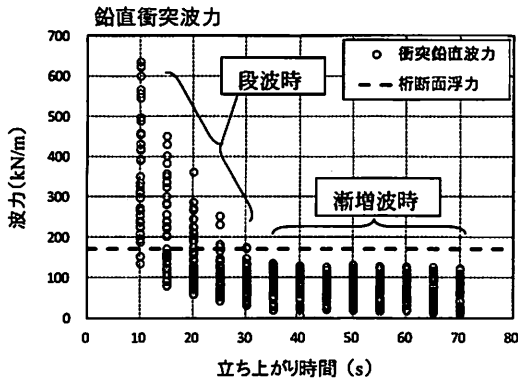


図-15 立ち上がり時間と鉛直衝突波力の関係

(3) 鉛直衝突波力

a) 立ち上がり時間との関係

造波におけるパラメータのうち、立ち上がり時間を変化させたときの鉛直衝突波力の変化を図-15に示す（全ケース）。水平衝突波力と同様に、立ち上がり時間が一定以上小さくなると鉛直衝突波力は急増する（段波時）。一方で立ち上がり時間が長くなると鉛直衝突波力の変化は小さくなる（漸増波時）ことがわかる。また、漸増波時の波力の値は桁間の空気分も含めた桁断面積から算出した浮力よりも小さい値となる。

次に、波高と流速および路面浸水深と鉛直衝突波力の関係について考察する。波高および流速をパラメータとして比較した結果を図-16（代表としてCase5-6-5, 5-6-6, 5-6-7, 各ケース初期水位5m, 桁下高6m, 波高はそれぞれ5m, 6m, 7m）、路面浸水深をパラメータとして比較した結果を図-17（代表としてCase5-6-5, 5-7-5, 5-8-5, 各ケース初期水位5m, 波高5m, 桁下高はそれぞれ6m, 7m, 8m）に示す。まず波高、流速については、段波時にのみ波高、流速の増加に伴って鉛直衝突波力は増加し、漸増波時には波高、流速によらず鉛直衝突波力はほぼ一定の値をとる。路面浸水深については、段波時および漸増波時ともに路面浸水深が大きいほど衝突鉛直波力が大きくなる。

b) 漸増波時の鉛直衝突波力

漸増波時の鉛直衝突波力は流速、波高によらず、路面浸水深が大きいほど波力が大きくなる。これらのことから漸増波時の鉛直衝突波力は初期水位から桁下までが小さいほど大きくなるといえるが、これは津波衝突時の流速の影響によると考えられる。漸増波時では鉛直衝突波力を得る時刻で桁の前背面両方で水位が路面程度となるため、仮に桁下に流速がないとした場合、鉛直波力は桁間の空気を考慮し

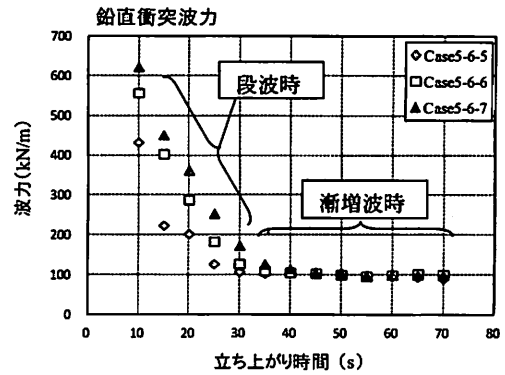


図-16 波高のみ変化させた場合の立ち上がり時間と鉛直衝突波力の関係

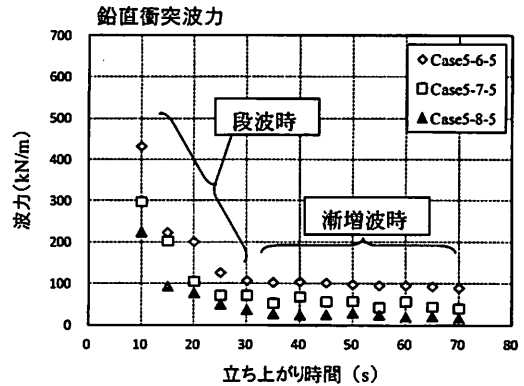


図-17 桁位置のみ変化させた場合の立ち上がり時間と鉛直衝突波力の関係

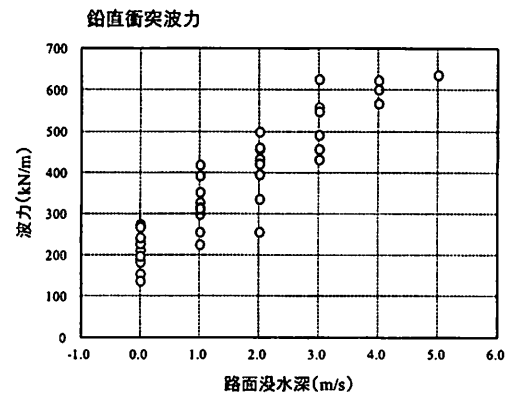
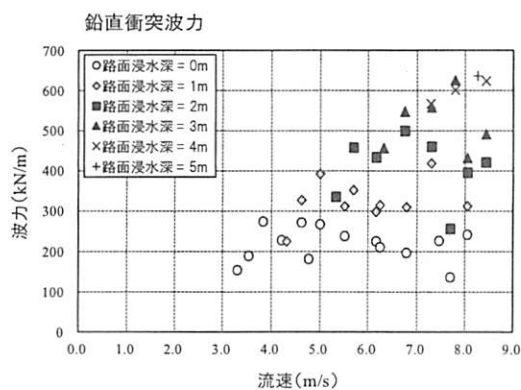
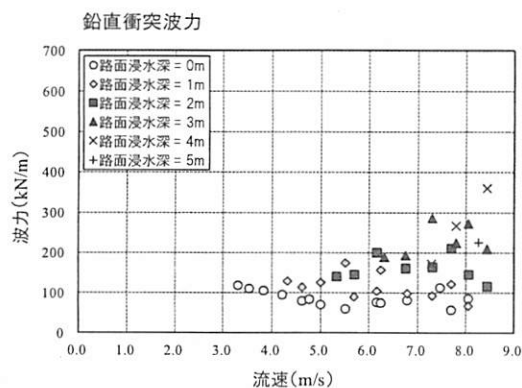


図-18 路面浸水深と鉛直衝突波力（dt=10s）の関係

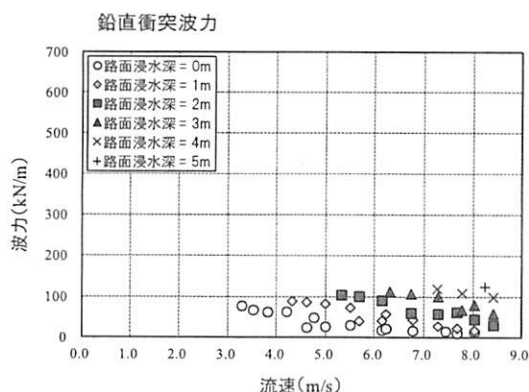
た浮力分となる。しかし、実際には桁下には津波による流れが生じており、桁位置で流れが剥離して流速が増加するために圧力低下が生じる。したがって漸増波時の鉛直衝突波力は浮力分からこの圧力低下分を除いた値となると考えられる。本解析における造波条件では流速は波高とともに大きくなるため、初期水位から桁下までが高いほど津波衝突時の波高および流速が大きく、その結果桁下の圧力低下分も大きくなり、鉛直波力は小さくなる。



a) dt=10s

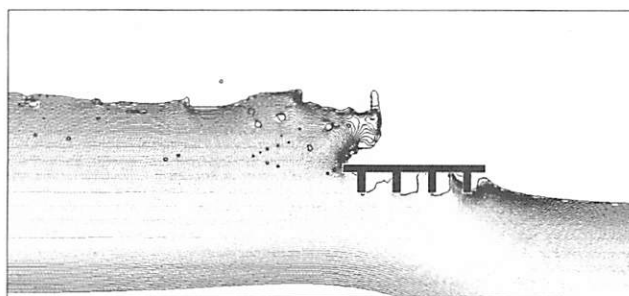


b) dt=20s

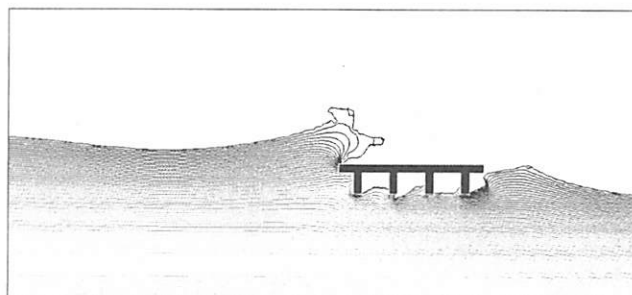


c) dt=70s

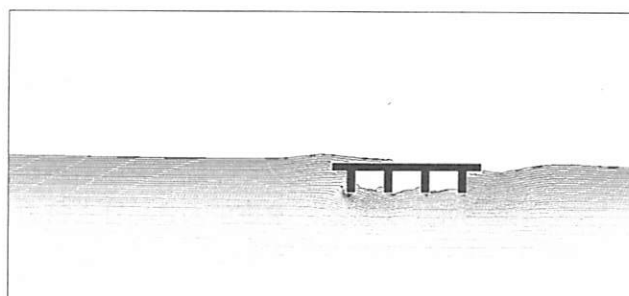
図-19 流速と鉛直衝突波力の関係



a) dt=10s



b) dt=20s



c) dt=70s

図-20 津波衝突時の圧力コンター図 (Case7-8-8)

c) 段波時の鉛直衝突波力

段波時の鉛直衝突波力については、流速、波高および路面浸水深のどちらをパラメータとしたときも値が変動するが、それらの感度について分析を行う。

図-18に立ち上がり時間10sにおける路面浸水深と鉛直衝突波力の関係を示す。また、造波パラメータにおける立ち上がり時間が10秒、20秒、70秒のときの流速と鉛直衝突波力の関係を図-19に、各立ち上がり時間についてCase7-8-8の圧力コンター図を図-20に示す。図-18および図-19における立ち上がり時間10秒の結果より、鉛直衝突波力に対しては

路面浸水深が支配的な要因となっており、流速によらず路面浸水深が大きいほど鉛直衝突波力が大きくなるのが分かる。一方で流速の影響としては流速が増加すると鉛直衝突波力は減少する傾向がみられるが、その影響は路面浸水深に比して小さい。

路面浸水深の増加による波力の増加については、津波による橋桁上下面の水位上昇の差によると考えられる。すなわち、橋桁下面では橋桁前面での水位上昇により圧力が増加し、一方で橋桁上面には水が達していないため圧力上昇がなく、その差により桁に作用する鉛直波力が大きくなる。なお橋桁前面の

水位上昇の度合いは造波の立ち上がり時間の影響も大きく、立ち上がり時間が短くなるほど橋桁上面に水が達する直前において橋桁前面の水位が高く、鉛直衝突波力が大きくなると考えられる。これは図-19の立ち上がり時間10秒、20秒、70秒を比較したときに立ち上がり時間が長いほど路面浸水深の増加による鉛直衝突波力の増加が小さいことから明らかである。

流速の増加による鉛直衝突波力の減少については、先に述べた漸増波時と同様の要因、すなわち桁下での流速増加による圧力低下があると考えられる。図-19の3つのグラフを見比べると、路面浸水深の増加による鉛直衝突波力の増加量は立ち上がり時間によって大きく異なるのに対し、各路面浸水深における流速増加による鉛直衝突波力の低下はどの立ち上がり時間でもほぼ同様となる。

5. まとめ

本稿では、張出し部を有する鈑桁橋を対象として、初期水位、桁下高、津波波高、津波立ち上がり時間が上部工に作用する津波波力特性に与える影響について解析的に考察を行った。これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 津波衝突後の定常的な流れの状態における水平波力は初期水位、波高等に関わらず流速が大きいほど大きくなる。またその波力を抗力係数として無次元化すると、流速が大きいほど抗力係数は小さくなり、抗力係数の値はおおよそ1.0～1.7程度となる。
- (2) 津波衝突時の水平波力について、水面勾配が小さい場合は定常的な流れにおける水平波力を超えるピークは生じない。
- (3) 津波衝突時の水平波力について、水面勾配が大きく段波状になる場合はその勾配が大きいほど波力は大きい。また、流速が大きいほど波力も大きくなる。水平波力を抗力係数として無次元

化すると、流速が大きいほど抗力係数は小さくなり、おおよそ2.0～4.5程度の値となる。

- (4) 津波衝突時の鉛直波力について、水面勾配が小さい場合は流速が大きくなるほど波力は小さくなり、その値は桁間の空気を含めた桁断面に作用する浮力から桁下での流速増加による圧力低下分を差し引いた値程度に近いと考えられる。
- (5) 津波衝突時の鉛直波力について、水面勾配が大きい場合は路面浸水深および水面勾配が大きいほど波力は大きくなる。またこれらに比して影響度は小さいが、流速が大きくなるほど波力は小さくなる。

参考文献

- 1) 庄司 学, 森 洋一郎: 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.801-805, 2006.
- 2) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.55, pp.789-465, 2009.
- 3) 庄司 学, 平木 雄, 藤間功司, 鳴原良典: 橋桁に作用する碎波段波の流体力に関する実験的検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.801-805, 2010.
- 4) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司 学, 木村吉郎: 津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.474-485, 2010.
- 5) 鳴原良典, 藤間功司, 庄司 学: 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算, 地震工学論文集, Vol.30, pp.899-904, 2009.
- 6) 薄井稔弘, 運上茂樹, 杉本 健: 津波に対する道路橋の被害軽減に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.464-473, 2008.
- 7) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 2010.
- 8) 福井芳郎, 白石英彦, 中村 充, 佐々木泰雄: 津波の研究 (I), 海岸工学講演会講演集, Vol.9, pp. 44-49, 1962.