第57卷第1期 大连理工大学学报 Vol. 57, No. 1
2017年1月 Journal of Dalian University of Technology Jan. 2017

资深教授学术论文专栏

文章编号：1000-8608(2017)01-0105-06

考虑地震、波浪和海流作用的跨海桥梁结构研究进展

柳春光*[1,2]， 张士博[1]

（1.大连理工大学 建设工程学部 工程抗震研究所，辽宁 大连 116024；
2.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要： 随着我国经济建设的快速发展，近几十年来大型的跨海桥梁工程结构不断涌现，服役期内跨海大桥可能同时承受风、波浪、海流、海冰、潮汐和地震等其中的几种联合作用，有关此方面的理论、数值和试验研究还比较缺乏.主要对近年来跨海桥梁结构在承受波浪、海流、地震单独或联合作用下的理论、数值、试验研究与进展进行了综述，并对桥梁结构考虑波浪、海流作用的水下振动台试验的发展进行了展望.

关键词： 跨海桥梁；波流力；动水压力；流固耦合；水下振动台
中图分类号： TU318.1 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201701015

0 引 言

近年来，我国跨海桥梁的建设速度呈现空前增长的趋势，苏通大桥、杭州湾大桥和青岛海湾大桥等跨海大桥已投入使用，港珠澳大桥即将建设完工，琼州海峡跨海大桥已进入可行性建设方案论证阶段，我国高速公路网规划方案中的台湾海峡和渤海海峡等规模更大的跨海通道工程，不同程度地进行着前期探索和研究工作.

与陆地桥梁所处的自然条件相比，跨海桥梁所处的海洋环境更为恶劣和复杂，其服役期内要承受多种时变自然荷载（波浪、海流和地震等）共同激励下的多重冲击作用.鉴于我国建设的跨海桥梁时间较短，在理论和经验上的知识储备都显得比较缺乏.

本文首先介绍跨海桥梁基础波流力研究进展，然后介绍跨海桥梁地震动水效应研究进展，接下来介绍跨海桥梁结构考虑地震、波浪、海流作用的研究进展，最后讨论跨海桥梁结构考虑地震、波浪、海流作用的若干有待研究的问题.

1 跨海桥梁基础波流力研究进展

20世纪50年代，Morison等[1]提出计算小直径桩柱上波浪力的莫里森方程，由于其简单的形式和明确的物理意义，被研究领域和工程设计沿用至今.对于波流共存场中的单桩而言，合理地确定水动力系数 C_d 和 C_m 是采用莫里森方程计算波流力的关键.影响水动力系数的因素较多且复杂，公式中的 C_d 和 C_m 很难从理论推导得到，国内外研究者通过原型观测资料和试验研究获得水动力系数的变化规律.Wolfram等[2]利用两种尺度圆柱在纯波浪和波流共同作用下的横向力试验数据，采用6种时域方法和4种频域方法得到了水动力系数 C_d 和 C_m.任佐皋[3]基于波-流场中的线性波浪理论和模型试验，提出了在同向波-流场中孤立桩相对速度力系数的计算公式，并根据模型试验数据，采用最小二乘原理进行回归得到阻力系数和惯性力系数.李玉成等[4-5]研究了垂直圆柱在稳定流分别于规则波和不规则波共同作用下的受力问题，并采用莫里森方程和线性波浪理论分析垂直桩柱在波流共存场的波流力.同时，对垂直方柱[6]在波（规则波与不规则波）流场中的波流力采用扩展的莫里森方程计算.

如何合理确定倾斜杆件上的水动力系数，截止到目前尚存在问题.滕斌等[7]将修正互谱法应

收稿日期：2016-05-26； 修回日期：2016-11-30.
基金项目："九七三"国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB013605-4)；国家自然科学基金资助项目(51678107)；辽宁省优秀人才基金资助项目(2014020012)；高等学校博士学科点博导专项科研基金资助项目(20130041110036).
作者简介：柳春光*(1964-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：liucg@dlut.edu.cn；张士博(1978-)，男，博士生，E-mail：drzhang0102-@163.com.

用于水流与不规则波共同作用下倾斜桩柱上受力系数的计算.李玉成等[8]采用莫里森方程和斯托克斯二阶波浪理论,分别研究了不同埋深水平桩和倾斜桩在倾角不同情况下的受力及水动力系数 C_d、C_m 随 Kc 数的变化规律. Sundar 等[9]通过对正向和逆向波浪作用下倾斜桩柱的试验研究,采用最小二乘法得到不同倾角情况下倾斜桩柱的阻力系数和惯性力系数随 Kc 数的变化.

跨海桥梁桩基础多以群桩结构的形式出现,不仅相当庞大和复杂,而且呈现出典型的三维特性,同时还要面临波流共存的复杂自然条件,波流间的相互作用将影响各自的传播特性.目前分析群桩上波流力主要有两种方法:一是利用莫里森方程和群桩的水动力系数直接计算各组成桩上的波流力. Chakrabarti[10]通过试验分析了垂直桩群在规则波作用下水动力系数 C_d、C_m 随桩距和 Kc 数的变化规律.二是利用单桩上的波流力乘以相应的群桩系数计算各组成桩上的波流力.李玉成等[11-12]通过实验研究了串列、并列双桩在不规则波和水流共同作用下所受的波流力,并给出群桩系数随 Kc 数和相对桩距的变化规律.

由于波流对桩柱的非线性作用,且跨海桥梁桩基础多采用群桩结构,鉴于目前理论分析和数值模拟还不成熟,采用物理模型试验方法更有实际的借鉴意义.我国已建[13-14]和在建[15]的大型跨海桥梁工程,主要还是通过物理模型试验来确定桥梁基础波流力.

2 跨海桥梁地震动水效应研究进展

桥梁结构处于静止的流场时,当因地震作用振动时,将产生一个以桥梁结构为中心向外辐射的波浪运动,同时流体又会以动水压力的形式反作用于桥梁结构,桥梁结构与其接触的流体的耦合作用是一个非常复杂的动力耦合作用问题.目前主要有两种考虑流体-结构动力相互作用的方法:附加质量法和有限元方法.

2.1 附加质量法

跨海桥梁结构在地震作用下的动力响应问题中需要考虑流体-结构的相互作用.目前,国内外研究者主要采用简化或改进的莫里森方程来表述水体对桥梁结构的动水压力作用. Yamada 等[16]采用修正莫里森方程计算因海浪引起的动水压力,对地震和海浪激励下近海桩柱结构上的动力响应进行了计算和分析.赖伟等[17]对地震下圆柱形桥墩上的动水压力,提出了一种半解析半数值的方法.高学奎等[18]在简化的莫里森方程的基础上,采用附加水质量考虑水的影响,提出在抗震设计时采用相对水深来决定是否需要考虑地震动水压力.柳春光等[19]对莫里森方程进行了修正,并采用 Airy 波浪理论对某一跨海大桥深水桥墩进行地震作用下的非线性动力分析.

桥梁结构在地震作用时的波动场与莫里森方程基本假设和水动力要素不符合,目前比较现实的办法就是搞清楚应用莫里森方程计算桥梁结构动水压力的适用范围及如何进行修正以减少其计算误差.

2.2 有限元方法

桥梁在地震作用时,下部结构与其接触的流体之间的运动相互影响,具有典型的流固耦合作用,是一个非常复杂的动力耦合作用问题. Banerjee 等[20]对处于地震和洪水联合作用下的桥梁结构进行了研究.郑史雄[21]根据流固耦合作用理论,建立了考虑受周围水体作用的深水桥墩有限元模型,分析了桥墩在地震激励下,流固耦合作用对其墩身内力和墩顶位移等影响.魏凯等[22]针对桥梁水下桩基础结构进行了试验研究和数值模拟,通过二者的互相验证,更好地了解流固耦合对深水桥梁结构水下桩基础动力响应的作用机理.

流固耦合是处于静水中桥梁结构在地震激励下动力响应的重要特征,也是该领域应用流固耦合力学的环节.

2.3 桥梁水下振动台试验研究进展

桥梁水下振动台试验可以为桥梁结构物理模型理论分析和工程设计提供可靠的数据和信息支撑.赖伟等[23]以平潭海峡大桥引桥桥墩为工程背景,设计了长度相似比为 1/30 的试验模型,进行了桥梁-桩基础的水下振动台试验.宋波等[24]以南京长江三桥中的桥塔下部结构为工程背景,设计了几何比尺为 1/50 的缩尺模型,进行了无水和有水两种状态振动台试验. Liu 等[25]以杭州湾北航道桥辅助墩墩身及基础为原型,按照 1/32 桩的相似比尺设计桩墩模型,进行了深水桩墩结构水下振动台试验.

由于水下振动台的条件限制,截止到目前,水下振动台试验研究仅考虑辐射波浪和地震激励的联合作用.

3　跨海桥梁结构考虑地震、波浪、海流作用的研究进展

3.1　跨海桥梁结构考虑地震、波浪共同作用的研究进展

近几十年来，国内外一些专家学者对处于水中的海洋结构在地震和波浪联合作用下的动力反应问题进行了一定的研究. Yamada 等[26]以Kanai功率谱模拟强震，Bretschneider 能量波谱模拟随机海浪，采用频域随机振动法分析了海洋结构的动力响应. Karadeniz[27]采用 JONSWAP 和 P. M 表面波谱模拟随机波浪，采用修正 Kanai-Tajiml 地震加速度谱模拟随机地震，分析了三维海洋钢结构模型在深水波浪环境下受地震激励的谱分析. 李忠献等[28]利用辐射波浪理论求解桥墩地震动水压力，并采用绕射波浪理论考虑波浪作用，对深水桥梁分别进行了地震、波浪、地震和波浪联合作用下的桥梁动力响应分析.

上述文献对流体影响的简单化处理，忽略了处于海洋环境中的桥梁桩基础由于地震的激励产生的辐射波浪对绕射波流场的影响.

3.2　跨海桥梁结构考虑地震、波浪和海流共同作用的研究进展

深水桥梁群桩基础浸没水深达数十米，地震作用下桥梁桩基结构在受激振动的同时还要承受波流对其产生的动水压力的作用. 目前研究跨海桥梁结构在地震、波流共同作用下的反应文献很少. 陈国兴等[29]采用斯托克斯五阶波理论，将基于莫里森方程计算所得的波浪力以分布力的形式施加于桥墩之上，分析了考虑波流作用的深水大型群桩桥墩结构非线性地震反应特性. Zheng 等[30]利用大连理工大学地震、波浪和海流联合模拟试验系统进行了近海风力发电机单桩基础在波浪和地震联合作用下的缩尺模型试验研究.

深海桥梁的群桩基础在遭遇地震时，将处于一个由地震激励产生的辐射波浪、绕射波浪和海流组合成的综合波流场. 大连理工大学地震、波浪和海流联合模拟试验系统为地震、波浪和海流环境下桥梁结构物理模型试验研究可行性提供了技术支持.

3.3　跨海桥梁结构上地震动水压力、波浪力和波流力计算方法研究进展

海洋结构波浪力和动水压力因结构尺度的大小不同受力特性也不同. 本文对此领域的计算方法进行归纳总结.

3.3.1　小尺度桩柱结构上波浪力、动水压力和波流力计算　对于小直径桩柱上所受波浪力和动水压力，普遍采用莫里森方程或修正莫里森方程进行计算.

(1)作用于小直径桩柱上的波浪力

$$F=\rho\frac{\pi D^2}{4}\ddot{u}+C_m\rho\frac{\pi D^2}{4}(\ddot{u}-\ddot{x})+\frac{1}{2}C_d\rho D(\dot{u}-\dot{x})|\dot{u}-\dot{x}| \tag{1}$$

式中：$\ddot{x}$ 和 $\dot{x}$ 分别为结构的相对加速度和速度，ρ 为水的密度，D 为桩直径，C_m 为附加质量系数，C_d 为阻力系数，$\ddot{u}$ 和 $\dot{u}$ 分别为流体质点水平运动加速度和速度.

(2)作用于小直径桩柱上的动水压力

当处于静水中的小尺度桩柱在地震作用下沿水平方向运动时，由于莫里森方程假定桩柱存在不影响原有波浪场的运动，结构运动不会改变原有水的状态，即式(1)中的 $\ddot{u}=\dot{u}=0$. 地震作用时，桩柱上所受的动水压力为

$$P=-C_m\rho\frac{\pi D^2}{4}\ddot{x}-\frac{1}{2}C_d\rho D\dot{x}|\dot{x}| \tag{2}$$

一般情况下，式(2)中的附加惯性力与动水阻力相比较大，可以忽略阻力项.

(3)小直径桩柱上的波浪和地震联合作用力

当地震与波浪、海流联合作用时，流体与结构相互作用，在这种情况下，莫里森波浪力的计算应考虑流体与结构的相对运动. 因此，小直径桩柱上波浪和地震联合作用力为

$$F=\rho\frac{\pi D^2}{4}\ddot{u}+C_m\rho\frac{\pi D^2}{4}[\ddot{u}-(\ddot{x}_g+\ddot{x})]+\frac{1}{2}C_d\rho D[\dot{u}-(\dot{x}_g+\dot{x})]|\dot{u}-(\dot{x}_g+\dot{x})| \tag{3}$$

式中：$\ddot{x}_g$ 和 $\dot{x}_g$ 分别为地面加速度和速度.

小直径桩柱上地震和波流联合作用力为

$$F=\rho\frac{\pi D^2}{4}\ddot{u}+C_m\rho\frac{\pi D^2}{4}[\ddot{u}-(\ddot{x}_g+\ddot{x})]+\frac{1}{2}C_d\rho D[\dot{u}+\dot{u}_c-(\dot{x}_g+\dot{x})]\times|\dot{u}+\dot{u}_c-(\dot{x}_g+\dot{x})| \tag{4}$$

式中：$\dot{u}_c$ 为海流沿水平方向的速度.

3.3.2　大尺度桩柱结构上波浪力和动水压力计算　近海结构中除桩基外，一般尺度都较大，波浪力中的惯性部分与黏性阻力部分相比较大，结构的存在将对入射波浪产生较大的不可忽略的影响.

(1)直立圆柱波浪力计算

对于大尺度柱结构,在实际工程中通常采用MacCamy基于绕射理论得到波浪绕射的解析解,为了方便起见,也可以改写成和莫里森方程中水平惯性力项同样的形式:

$$F=C'_{\mathrm{m}}\rho\frac{\pi D^2}{4}\ddot{u} \tag{5}$$

式中:C'_{m} 为等效质量系数.

(2)直立圆柱动水压力计算

目前大尺度直立圆柱动水压力计算主要利用辐射波浪理论求解,赖伟[31]采用辐射波浪理论对圆形桥墩上的动水压力提出一个半解析半数值方法.

(3)截断圆柱波浪力计算

波浪关于截断圆柱的绕射,Garret通过分区离散和边界匹配的方法得到了解析解.

(4)截断圆柱动水压力计算

Wiliams等利用特征函数展开和匹配渐进法对辐射波浪场速度势求解,提出了截断圆柱动水压力的求解方法.

跨海桥梁下部结构多采用群桩和承台组合形式,群桩上的波浪力和动水压力可以采用3.3.1方法,承台上的波浪力和动水压力研究文献还较少.群桩和承台之间波动场的相互影响较复杂,目前还没有此方面的研究文献.

4 结 语

国内外对有关跨海大桥承受波浪、海流、地震等随机荷载作用已经进行了相关的试验和理论研究,并在一些桥梁工程抗震设计中得到了参考和应用.由于跨海桥梁所处的海洋环境的复杂和恶劣性,尚有许多问题待解决,需要开展以下几方面研究:

(1)发展有效的跨海大桥群桩-承台组合基础结构波流力数值模拟技术和理论研究.

(2)流固耦合法在深水桥梁地震激励下的动力响应研究方面还需要完善控制方程选择、网格运动的控制、地震动初始条件的确定、流固耦合算法的选定问题.

(3)进行跨海桥梁在地震、波浪和海流多重激励作用下的动力试验,为近海桥梁在地震、波浪和海流多种自然荷载联合作用下的理论研究提供可靠的数据和信息支撑.

参考文献:

[1] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A, *et al*. The force exerted by surface waves on piles [J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1950, **2**(5):149-154.

[2] WOLFRAM J, NAGHIPOUR M. On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders [J]. **Applied Ocean Research**, 1999, **21**(6):311-328.

[3] 任佐皋. 波-流场中孤立桩柱上作用力系数的研究[J]. 海洋学报, 1985, **7**(4):503-512.
REN Zuogao. Hydrodynamic coefficients for a isolated pile due to combined wave and current [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 1985, **7**(4):503-512. (in Chinese)

[4] 李玉成,张春蓉. 规则波和水流共同作用下圆柱受力的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1990, **5**(2):58-68.
LI Yucheng, ZHANG Chunrong. Force on cylinder coexisting field of regular waves and currents [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 1990, **5**(2):58-68. (in Chinese)

[5] 李玉成,叶正凡. 不规则波和流作用于圆柱上的正向力及横向力[J]. 海洋学报, 1991, **13**(6):849-859.
LI Yucheng, YE Zhengfan. Positive force and horizontal force on a circular cylinder due to combined irregular wave and current [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 1991, **13**(6):849-859. (in Chinese)

[6] 李玉成,何 明. 作用于小尺度方柱上的正向波浪力[J]. 海洋学报, 1996, **18**(3):107-120.
LI Yucheng, HE Ming. Wave forces on slender square cylinder [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 1996, **18**(3):107-120. (in Chinese)

[7] 滕 斌,李玉成. 不规则波流作用下斜桩上受力系数的确定方法[J]. 大连理工大学学报, 1990, **30**(6):715-722.
TENG Bin, LI Yucheng. Determination of force coefficients of inclined cylinder in irregular wave and current field [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1990, **30**(6):715-722. (in Chinese)

[8] 李玉成,康海贵,费勤浩. 规则波作用下倾斜桩柱的受力研究[J]. 水动力学研究与进展, 1992, **7**(1):85-100.
LI Yucheng, KANG Haigui, FEI Qinhao. Wave forces on inclined cylinder in regular waves [J].

Journal of Hydrodynamics, 1992, **7**(1):85-100. (in Chinese)

[9] SUNDAR V, VENGATESAN V, ANANDKUMAR G, *et al*. Hydrodynamic coefficients for inclined cylinders [J]. **Ocean Engineering**, 1998, **25**(4/5):277-294.

[10] CHAKRABARTI S K. Hydrodynamic coefficients for a vertical tube in an array [J]. **Applied Ocean Research**, 1981, **3**(1):2-12.

[11] 李玉成,王凤龙,王洪荣. 作用于并列双桩桩列上的波流力[J]. 海洋学报, 1992, **14**(2):106-121.
LI Yucheng, WANG Fenglong, WANG Hongrong. Wave-current forces on two-pile in paratactic [J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 1992, **14**(2):106-121. (in Chinese)

[12] 李玉成,王凤龙. 作用于串列双桩桩列上的波流力[J]. 水动力学研究与进展, 1992, **7**(2):141-149.
LI Yucheng, WANG Fenglong. Wave-current forces on two-pile in series [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 1992, **7**(2):141-149. (in Chinese)

[13] 兰雅梅,刘　桦,皇甫熹,等. 东海大桥桥梁桩柱承台水动力模型试验研究——第二部分:作用于群桩及承台上的波流力[J]. 水动力学研究与进展, 2005, **20**(3):332-339.
LAN Yamei, LIU Hua, HUANG Fuxi, *et al*. Experimental studies on hydrodynamic loads on piles and slab of Donghai bridge-Part Ⅱ: Hydrodynamic forces on pile array and slab in wave-current combinations [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2005, **20**(3): 332-339. (in Chinese)

[14] 潘军宁,王登婷. 杭州湾大桥工程桥梁基础波流力模型试验研究报告[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2003.
PAN Junning, WANG Dengting. Experimental study report of hydrodynamic loads on the Hangzhou bay bridge foundation [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese)

[15] 王登婷,潘军宁. 港珠澳大桥桥梁基础波流力试验专题研究报告[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2009.
WANG Dengting, PAN Junning. Experimental study report of hydrodynamic loads on the HK-Zhuhai-Macao bridge foundation [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese)

[16] YAMADA Y, IEMURA Y, KAWANO K, *et al*. Seismic response of offshore structures in random seas [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1989, **18**(7):965-981.

[17] 赖　伟,王君杰,胡世德. 地震下桥墩动水压力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, **32**(1):1-5.
LAI Wei, WANG Junjie, HU Shide. Earthquake induced hydrodynamic pressure on bridge pier [J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2004, **32**(1):1-5. (in Chinese)

[18] 高学奎,朱　晞. 地震动水压力对深水桥墩的影响[J]. 北京交通大学学报, 2006, **30**(1):55-58.
GAO Xuekui, ZHU Xi. Hydrodynamic effect on seismic response of bridge pier in deep water [J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2006, **30**(1):55-58. (in Chinese)

[19] 柳春光,齐　念. 考虑流固耦合作用的深水桥墩地震响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(4):433-437.
LIU Chunguang, QI Nian. Seismic response analysis of piers in deep water considering fluid-structure interaction [J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2009, **29**(4):433-437. (in Chinese)

[20] BANERJEE S, PRASAD G G. Analysis of bridge performance under the combined effect of earthquake and flood-induced scour [C] // **Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management — Proceedings of the ICVRAM 2011 and ISUMA 2011 Conferences**. Reston: ASCE, 2011:889-896.

[21] 郑史雄. 深水桥墩考虑液固相互作用的地震反应分析[J]. 桥梁建设, 1998(1):52-54.
ZHENG Shixiong. The effects of the fluid-structure interaction seismic response of bridge piers [J]. **Bridge Construction**, 1998(1):52-54. (in Chinese)

[22] 魏　凯,袁万城. 深水高桩承台基础地震动水效应数值解析混合算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, **41**(3):336-341, 396.
WEI Kai, YUAN Wancheng. A numerical-analytical mixed method of hydrodynamic effect for deep-water elevated pile cap foundation under earthquake [J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2013, **41**(3):336-341,396. (in Chinese)

[23] 赖　伟,王君杰,韦　晓,等. 桥墩地震动水效应的水下振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(6):164-171.

LAI Wei, WANG Junjie, WEI Xiao, *et al*. The shaking table test for submerged bridge pier [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2006, **26**(6):164-171. (in Chinese)

[24] 宋 波,张国明,李 悦. 桥墩与水相互作用的振动台试验研究[J]. 北京科技大学学报, 2010, **32**(3):403-408.
SONG Bo, ZHANG Guoming, LI Yue. Shaking table test of pier-water interaction [J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2010, **32**(3):403-408. (in Chinese)

[25] LIU Chunguang, SUN Guoshuai. Calculation and experiment for dynamic response of bridge in deep water under seismic excitation [J]. **China Ocean Engineering**, 2014, **28**(4):445-456.

[26] YAMADA Y, KAWANO K, IEMURA H, *et al*. Wave and earthquake response of offshore structures with soil-structure interaction [J]. **Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu / Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers**, 1988 (398 pt I-10):157-166.

[27] KARADENIZ H. Spectral analysis of offshore structures under combined wave and earthquake loadings [J]. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**, 1999, **4**:504-511.

[28] 李忠献,黄 信. 地震和波浪联合作用下深水桥梁的动力响应[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(11):134-140.
LI Zhongxian, HUANG Xin. Dynamic responses of bridges in deep water under combined earthquake and wave actions [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, **45**(11):134-140. (in Chinese)

[29] 陈国兴,白德贵,王志华. 考虑波流影响的深水群桩基础桥墩地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, **28**(5):170-177.
CHEN Guoxing, BAI Degui, WANG Zhihua. Seismic response analysis of large scale bridge pier supported by pile foundation considering the effect of wave and current action [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2008, **28**(5):170-177. (in Chinese)

[30] ZHENG Xiangyuan, LI Hongbin, RONG Weidong, *et al*. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study [J]. **Marine Structures**, 2015, **44**:125-141.

[31] 赖 伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学, 2004.
LAI Wei. Dynamic response of earthquake and wave action under deep water bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

Research progress of sea-crossing bridge structure considering action of earthquake, wave and current

LIU Chunguang[*1,2], ZHANG Shibo[1]

(1. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: With the rapid development of economic construction in our country, large sea-crossing bridge engineering structures have emerged in recent decades. In service period, the sea-crossing bridge may also undergo the united excitation of the wind, wave, current and sea ice, tidal and earthquake, etc.. However, almost few theoretical, numerical and experimental studies on these aspects exist. Firstly, the theoretical, numerical and experimental research and progress of sea-crossing bridge structures under the separate or joint action of waves, currents, earthquake are summarized. Then, the development of the research of the bridge structure underwater shaking table test considering the wave and current action in the future is prospected.

Key words: sea-crossing bridge; wave-current forces; dynamic water pressure; liquid-solid coupling; underwater shaking table