Analytical Study on the Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Shape Memory Alloys (SMA) Using the Near-Surface Mounted (NSM) Technique

Dr. Bassam Hwaija *
Dr. Ammar Abbass **
Kinan kadoon***

(Received 28 / 11 / 2024. Accepted 23 / 6 / 2025)

□ ABSTRACT □

In recent years, there has been increasing interest in strengthening Reinforced Concrete (RC) beams using Fiber-Reinforced Polymer (FRP) strips or laminates through the Near-Surface Mounted (NSM) technique. While many studies have confirmed the effectiveness of this method, they have also shown that it leads to a reduction in the ductility of the beams. This research proposes a promising advanced technique for strengthening RC beams using Shape Memory Alloys (SMAs), known as the NSM-SMA technique, which may help address some of the challenges associated with NSM-FRP technique.

This analytical study aims to evaluate the effect of the NSM-SMA technique on the ductility behavior of RC beams through numerical analysis using the OpenSEES software. Several widely used types of SMA alloys in civil engineering applications were adopted and compared with the strengthening performance of FRP.

The results revealed that the NSM-SMA technique significantly improved beam ductility, with improvements exceeding 90% in some specimens. In contrast, a reduction in ductility was observed when using the NSM-FRP technique, compared to the unstrengthen reference beam.

Keywords: Reinforced Concrete (RC) beam, Near Surface Mounted (NSM), Shape Memory Alloy (SMA), Fiber Reinforced Polymer (FRP), Ductility.

Copyright **:**Latakia University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email : h.bassam65@yahoo.com
**Assistant Professor, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email : ammarabbass@tishreen.edu.sy
***Master's Student, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email : kinan.kadoon@tishreen.edu.sy/kinankadoon@gmail.com

دراسة تحليلية حول سلوك الجوائز البيتونية المسلحة والمدعمة باستخدام السبائك الحافظة للشكل SMA وفق تقنية التثبيت بالقرب من السطح NSM

د. بسام حويجة*
د. عمار عباس**
كنان قاضون***

(تاريخ الإيداع 28 / 11 / 2024. قُبِل للنشر في 23 / 6 / 2025)

□ ملخّص □

شهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً بتقنيات تدعيم الجوائز البيتونية المسلحة باستخدام شرائح أو صفائح من البوليميرات المسلحة بالألياف FRP باستخدام تقنية التثبيت بالقرب من السطح NSM، وقد أظهرت العديد من الدراسات أن هذه التقنية، رغم فعاليتها، تؤدي إلى انخفاض في مطاوعة الجوائز. يقترح هذا البحث تقنية متقدمة وواعدة لتقوية الجوائز البيتونية المسلحة باستخدام السبائك الحافظة للشكل SMA فيما يُعرف بتقنية NSM–SMA، والتي بدورها يمكن أن تسهم في معالجة بعض المشكلات المرتبطة بتقنية NSM–FRP.

تهدف هذه الدراسة التحليلية الى تقييم تأثير تقنية NSM–SMA على سلوك المطاوعة في الجوائز البيتونية المسلحة، وذلك من خلال تحليل عددي باستخدام برنامج OpenSEES. قد تم اعتماد عدة أنواع مختلفة من سبائك SMA المستخدمة على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية، ومقارنتها بنتائج التقوية باستخدام FRP.

أظهرت النتائج أن تقنية (NSM–SMA) حسّنت بشكل ملحوظ من مطاوعة الجوائز، حيث تجاوزت نسبة التحسن 90٪ في بعض العينات، في حين سُجّل انخفاض في المطاوعة عند استخدام تقنية (NSM–FRP)، مقارنة بالجائز المرجعي غير المدعّم.

الكلمات المفتاحية: الجوائز البيتونية المسلحة (RC)، التثبيت بالقرب من السطح (NSM)، السبائك الحافظة للشكل (SMA)، البوليميرات المسلحة بالألياف (FRP)، المطاوعة.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* استاذ ، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سوريا . h.bassam65@yahoo.com
** مدرس، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سوريا. ammarabbass@tishreen.edu.sy
***طالب ماجستير، قسم الهندسة الإنشائية، كلية الهندسة المدنية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سوريا.
/kinankadoon@gmail.comkinan.kadoon@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تُعد الجوائز البيتونية المسلحة من العناصر الانشائية الاساسية والمصممة لتحمل الأحمال المختلفة، حيث تتعرض لعزوم انعطاف تترافق مع قوى قص. لذلك، من الضروري معالجة أية تشققات تظهر بها وتدعيمها لتفادي خروجها عن الخدمة أو انهيارها [1].

تنوّعت طرق التدعيم واستخدمت مواد وتقنيات مختلفة لتحسين سلوك العناصر الإنشائية في مواجهة الأحمال. خلال العقدين الماضيين، أُجريت العديد من الدراسات حول تقوية الجوائز البيتونية المسلحة باستخدام شرائط أو صفائح البوليميرات المسلحة بالألياف FRP (Fiber Reinforced Polymer) والمثبتة بالقرب من السطح NSM (Near Surface Mounted). تعتمد هذه التقنية على وضع شرائط FRP ضمن شقوق طولية تُفتح مسبقاً في الغطاء البيتوني للعنصر الانشائي، وتُثبت باستخدام مادة لاصقة كالإيبوكسي أوغيره [2].

حظيت تقنية NSM–FRP باهتمام واسع من قبل الباحثين، وركزت العديد من الدراسات على استخدام FRP مشدود مسبقاً لتحسين استجابة العناصر الانشائية، إذ ساهم ذلك في زيادة القدرة التحملية القصوى، وتحسين مقاومة التشقق، وزيادة صلابة العنصر، بالإضافة إلى تقليل ظاهرة الانسلاخ debonding [3]. رغم الميزات المتعددة لهذه التقنية، إلا أنها واجهت بعض التحديات، أبرزها التشوهات المتبقية في الجوائز والاعمدة المدعمة، وانخفاض المطاوعة (ductility)، مما يؤدي إلى تقليل القدرة على تبديد الطاقة وزيادة كبيرة في الصلابة [3–8].

في هذا السياق، أجرى الباحث Yost وزملاؤه [1] دراسة تجريبية على تقوية السلوك الانعطافي للجوائز البيتونية المسلحة باستخدام شرائط NSM–CFRP. شملت الدراسة اختبارات مخبرية على خمسة عشر جائزاً بالحجم الكامل، مع ثلاث نسب مختلفة من التسليح الفولاذي (ρs)، ونسبتين مختلفتين من تسليح CFRP (ρfrp). تم اختبار الجوائز تحت تأثير حمولات دورية باستخدام نظام تحميل انحناء من أربع نقاط. أظهرت النتائج أن استخدام شرائط CFRP أدى إلى انخفاض واضح في مطاوعة الانتقال ومطاوعة الطاقة، وتراوح هذا الانخفاض بين 6.6% و 22%.

كما أشار العديد من الباحثين إلى أن التدعيم باستخدام تقنية NSM–FRP يؤدي إلى انخفاض واضح في المطاوعة، وزيادة كبيرة في الصلابة، وهو غير مرغوب فيه في المناطق الزلزالية. يوضح الجدول (1) الانخفاض في مطاوعة الجوائز البيتونية المسلحة.

الجدول (1). انخفاض مطاوعة الجوائز البيتونية المسلحة في بعض الدراسات.

المرجع	نوع التقوية	مطاوعة بعد التدعيم	انخفاض مطاوعة
Yost et al [1]	شرائط NSM–CFRP	1.06–1.27	6.6–22%
El–Hacha and Rizkalla [5]	قضبان NSM–CFRP	6	17%
	شرائطNSM–CFRP	5.4	26%
Badawi [6]	قضبان NSM–CFRP	1.4	30%
Soliman et al [7]	قضبان NSM–CFRP	1.6–3.58	Up 80%
Astorga [8]	شرائط NSM–CFRP	5.9	28%

بناءً على الجدول (1)، لوحظ انخفاض واضح في مطاوعة الجوائز البيتونية المسلحة المدعمة. ويعود ذلك إلى السلوك غير المطاوع لمادة FRP.

في المقابل، أدى الاهتمام المتزايد من قبل الباحثين إلى إدخال المواد الذكية في تطبيقات الهندسة المدنية، بهدف تحسين السلوك الزلزالي للعناصر الانشائية. وخلال العقد الأخير، ازداد عدد الدراسات التي تناولت عناصر ذكية وجذابة أنشئت من خلائط معدنية تُعرف باسم السبائك الحافظة للشكل SMA (Shape Memory Alloy) [9–10]. تتمتع هذه المواد الذكية بخواص فريدة ومتميزة، من أبرزها: المرونة الفائقة Super Elasticity (SE) فهي الخاصية التي يمكن أن تحدثها SMA بعد أن تخضع لتشوهات لدنة عالية مع تشوه محدود او بدون تشوه متبقي والعودة إلى شكلها الأصلي بعد التفريغ، وأيضاً خاصية استعادة شكلها الأصلي Shape Memory Effect (SME) وذلك عند التسخين أو عند إزالة التحميل الخارجي [9–15]. بالإضافة إلى ذلك، تُظهر سبائك SMA سلوكاً هستيرياً على شكل علم Flag shaped hysteresis، ما يسمح للعناصر الانشائية البيتونية والفولاذية بالعودة إلى حالتها الأصلية بعد التفريغ مع الحفاظ على تشوهات متبقية ضئيلة جداً أو معدومة. وتُعد هذه الخصائص ذات أهمية كبيرة في تحسين السلوك الزلزالي للعناصر الانشائية [10].

في الآونة الأخيرة، استُخدمت سبائك SMA كمواد تدعيم في المنشآت المدنيّة، حيث أجريت عدة دراسات حول فعاليتها في هذا المجال. وبالتالي، فإنّ تقنية NSM–SMA تُعد بديلاً واعداً لتجاوز بعض التحديات المرتبطة بتقنية NSM–FRP، نظراً للخصائص الفريدة التي توفرها مواد SMA.

في هذا البحث، سيتم دراسة تأثير استخدام مواد SMA في تحسين سلوك الجوائز البيتونية المسلحة RC. وقد تم استخدام برنامج العناصر المنتهية OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) [16] لإجراء التحليل، مع التركيز على دراسة تأثير تغيير نوع خليطة SMA على أداء الجوائز البيتونية المسلحة.

أهمية البحث وأهدافه:

لا تزال مشكلة انخفاض المطاوعة في الجوائز البيتونية المسلحة والمقواة باستخدام تقنية NSM–FRP غير مطروحة بالقدر الكافي في الابحاث، على الرغم من أن الكود الأوروبي **Eurocode 8 (EN 1998–1:2004)** يشترط أن تمتلك الجوائز قدرة مطاوعة انحناء لا تقل عن **3**، لضمان تشكل مفاصل لدنة آمنة واستجابة زلزالية مناسبة [17]. يركز هذا البحث على استخدام المادة الذكية SMA كتقنية جديدة مقترحة لتقوية الجوائز البيتونية المسلحة، بهدف التحقق من كفاءة تقنية التدعيم NSM–SMA في تحسين مطاوعة هذه الجوائز.

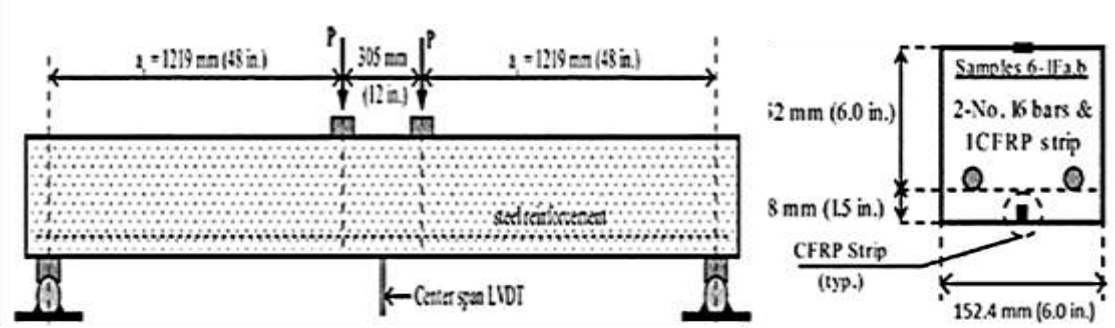
تم استخدام برنامج العناصر المنتهية OpenSEES لإجراء التحليل العددي، مع دراسة تأثير تغيير نوع خليطة SMA المستخدمة في التدعيم، وذلك مع تثبيت باقي المعاملات المؤثرة، مثل مقاومة الضغط للبيتون $fc`$ ونسبة التسليح الفولاذي. وقد شملت الدراسة استخدام خمسة خلائط مختلفة من SMA في تدعيم الجائز المختار، ثم مقارنتها من حيث الأداء مع الجائز المدعم بتقنية FRP، ومع الجائز المرجعي غير المدعم.

طرائق البحث ومواده:

النموذج التحليلي المستخدم

تفاصيل العينات المدروسة

تم إنشاء النموذج التحليلي للجائز المختار استناداً إلى الدراسة التجريبية التي أجراها Yost وآخرون [1]، حيث تم أخذ أبعاد وخصائص المادة للجائز المختار من الدراسة السابقة التي أجراها Yost وآخرون [1]. يوضح الشكل (1) تفاصيل الشكل وأبعاد الجائز المعتمد المرجعي (غير المدعم) والجائز المدعم بشريط واحد من CFRP (1Fb–6).



الشكل (1): تفاصيل أبعاد وتسليح الجائز المدعم NSM–CFRP (الأبعاد بال mm) [1]

يوضح الجدول (2) أبعاد وخصائص المواد المستخدمة في الدراسة للجائز المعتمد والمأخوذ من الدراسة المرجعية السابقة التي أجراها Yost وآخرون [1].

جدول (2): خصائص المادة وأبعاد الجائز البيتوني المسلح المستخدم في هذه الدراسة.

خصائص الجائز المعتمد في الدراسة	
المقطع العرضي (مستطيل) (mm)	152.4×190.4
نسبة التسليح الطولي (%)	1.827
مقاومة البيتون على الضغط (MPa)	37.2
اجهاد الخضوع لقضبان التسليح الطولية (MPa)	510
معامل المرونة لقضبان التسليح الطولي (GPa)	200

في هذه الدراسة تم اختيار خمسة أنواع من خلائط SMA الأكثر استخداماً في الهندسة المدنية واستخدامها وفق تقنية التدعيم NSM، حيث تم اختيار أربعة من أنواع SMA فائقة المرونة وواحدة تعود إلى خاصية ذاكرة الشكل FeMnSi، وذلك من أجل تحسين سلوك الانعطاف والمطاوعة في الجوائز.

خصائص شرائط سبائك SMAs المستخدمة في هذه الدراسة تم الحصول عليها من الدراسة التي أجراها Billah وآخرون [18] وموضحة في الجدول (3).

جدول (3): خصائص أنواع سبائك SMA المعتمدة في هذه الدراسة.

اسم سبيكة SMA	E (GPa)	fy (MPa)	fy / E	ε_s (%)	fp_1 (MPa)	المرجع
Fe-based (FeMnSi)	150	430	0.00287	11.8	710	Shahverdi et al. [9]
NiTi45	68	435	0.0064	8	535	Ghassemieh et al. [19]
FeNCATB	46.9	750	0.016	13.5	1200	Tanaka et al. [20]
CuAlMn	28	210	0.0075	9	275	Shrestha et al. [21]
FeMnAlNi	98.4	320	0.0033	6.13	442.5	Omori et al. [22]

εs: طول منطقة التشوهات فوق المرنة، E: معامل يونغ، fy: الاجهاد البدائي للتحول من مرحلة الأوستينيت إلى مرحلة المارتنسيت، fp_1: الاجهاد النهائي للتحول من مرحلة الأوستينيت إلى مرحلة المارتنسيت.

تم اعتماد موقع وتباعدات شرائط NSM دون تغيير وذلك لإثبات مدى قيمة استخدام شرائط NSM-SMA ولإجراء مقارنة منطقية مع شرائط NSM-CFRP. تم إعطاء الجوائز البيتونية المسلحة التسمية B-a اعتماداً على المعلومات أعلاه، حيث يرمز الرمز B إلى الجائز البيتوني المسلح والرمز a إلى نوع شرائط NSM-(S1,S2,S3,S4,S5) والرمز B-0 إلى الجائز البيتوني المسلح الغير مدعم (الجائز المرجعي). يوضح الجدول (4) ملخص لجميع الجوائز المدروسة في هذا البحث.

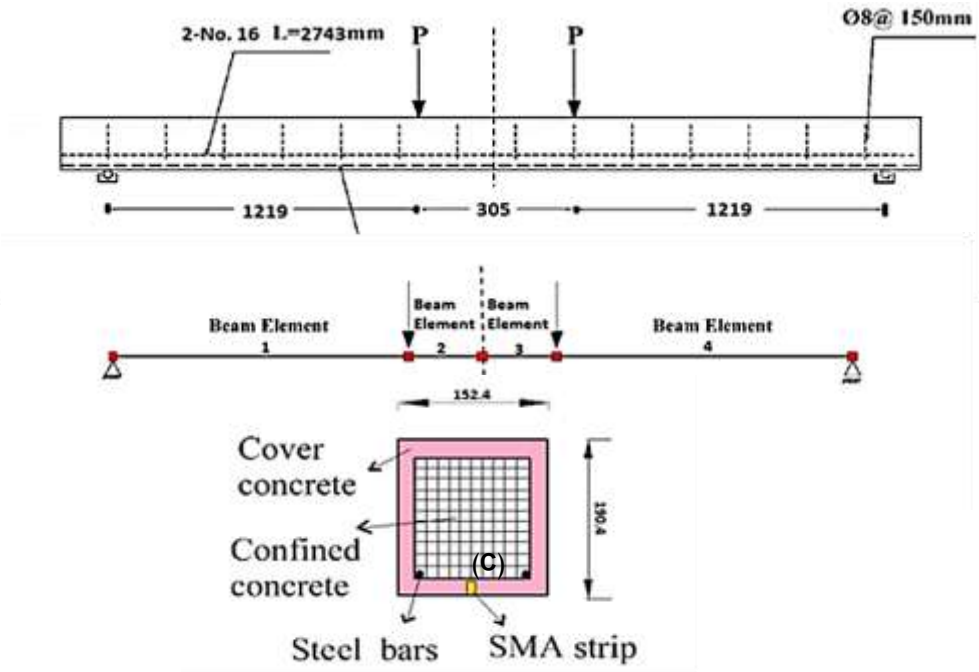
جدول (4): الجوائز البيتونية المسلحة المستخدمة في هذه الدراسة.

نوع التقوية	اسم الجائز
الجائز المرجعي (الغير المدعم)	B-0
الجائز المدعم بشرائط NSM-CFRP	B-FRP
الجائز المدعم بشرائط NiTi45	B-S1
الجائز المدعم بشرائط FeNCATB	B-S2
الجائز المدعم بشرائط CuAlMn	B-S3
الجائز المدعم بشرائط FeMnAlNi	B-S4
الجائز المدعم بشرائط FeMnSi	B-S5

تم اعتماد قطر وعدد شرائط NSM-SMA المستخدمة بحيث تكون الصلابة الأولية لجميع الجوائز البيتونية المسلحة المدعمة متساوية تقريباً.

النموذج التحليلي المستخدم

قمنا في دراستنا باستخدام برنامج OpenSEES لمحاكاة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة والمدعمة. حيث تم تقريب نموذج العناصر المنتهية لجائز RC كعنصر إطاري ليفي منتهي ثنائي البعد، يوضح الشكل (2) مخططاً لجائز RC المستخدم في الدراسة مع تمثيل لمقطع الألياف. يتألف المقطع الليفي المستخدم من طبقة بيتونية، قضبان فولاذ التسليح وشرائط SMA على مستوى المقطع العرضي SMA.



الشكل (2): a– تفاصيل الجائز RC، b– النموذج العددي، C– توزيع الالياف في المقطع العرضي

يتكون كل عنصر من عدة مقاطع عرضية، وينقسم كل مقطع عرضي إلى عدة ألياف وذلك تحت حالة الاجهاد أحادي المحور. يوضح الشكل (2–C) تقسيم الألياف للجائز البيتوني المسلح المدعم بما فيها الألياف البيتونية والفولاذية وألياف SMA وذلك على مستوى المقطع العرضي. تم أخذ معايير الانهيار اعتماداً على الدراسة السابقة التي أجراها Yost وآخرون [1]. يوضح الجدول (5) خصائص المواد التي نم استخدامها في النموذج التحليلي.

نموذج مادة البيتون المستخدمة

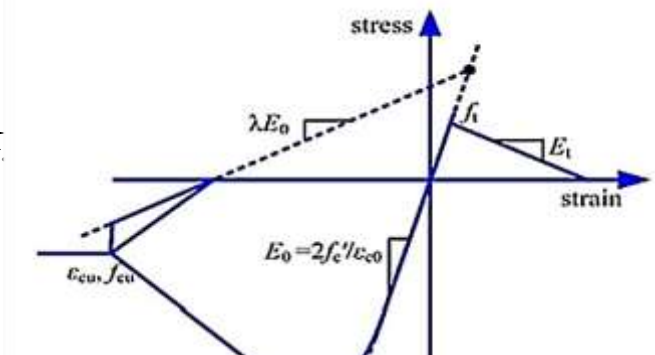
تم استخدام نموذج Kent and Park (1971) [23] لتمثيل سلوك البيتون المطوق والغير مطوق في دراستنا، حيث تم تعريف هذا النموذج في برنامج OpenSEES باستخدام المادة Concrete02 [16] والموضحة في الشكل (3).

المعادلة (1) تعبر عن الجزء الصاعد من المنحني اجهاد – تشوه:

$$fc = fc` \left[2\left(\frac{\varepsilon c}{\varepsilon c`}\right) - \left(\frac{\varepsilon c}{\varepsilon c`}\right)^2\right] \quad (1)$$

المعادلة (2) تمثل قوة الشد المباشرة للبيتون:

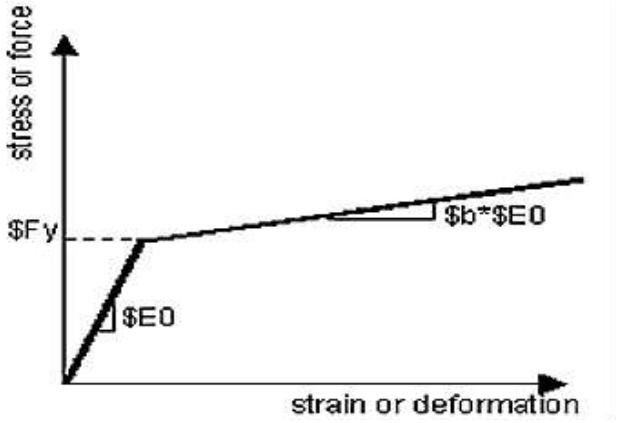
$$ft = 0.33\sqrt{fc'} \quad (2)$$



الشكل (3): مخطط اجهاد–تشوه مادة البيتون Concrete02 [16]

نموذج مادة الفولاذ المستخدمة

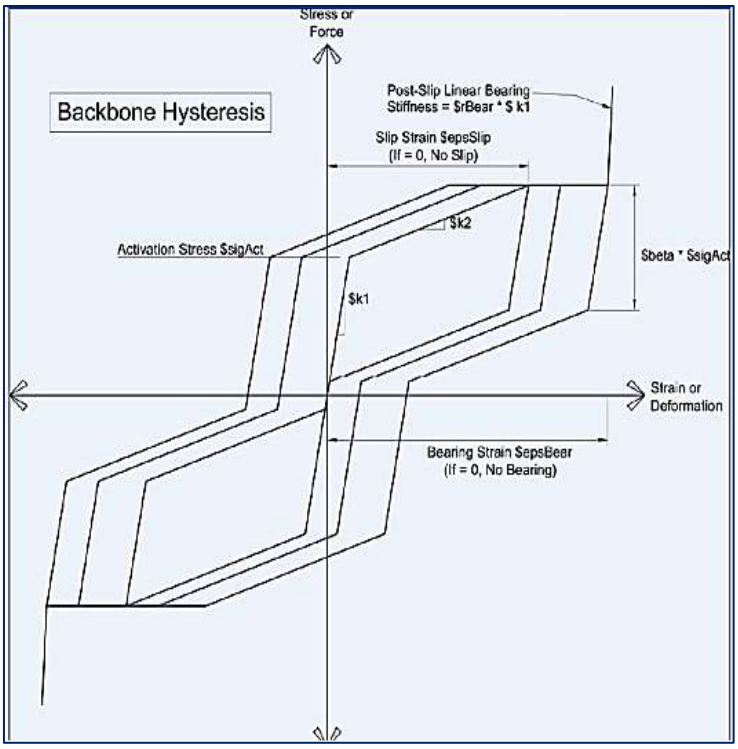
تم نمذجة مادة فولاذ التسليح في برنامج OpenSEES باستخدام المادة Steel01 [16] والموضحة في الشكل (4). يتألف منحني سلوك هذه المادة من خطين مستقيمين، ويمكن تعريف هذه المستقيمات بنقطتين تم اختيارهما الأولى هي نقطة الخضوع (f_y, ε_y)، والثانية هي نقطة الانقطاع $(f_{rup}, \varepsilon_{rup})$. يبلغ اجهاد الخضوع للفولاذ المستخدم 510 Mpa ومعامل مرونته 200 Gpa.



الشكل (4): مخطط اجهاد–تشوه المادة Steel01 [16]

نموذج شرائط NSM–SMA المستخدمة

تم نمذجة شرائط NSM–SMA فائقة المرونة في برنامج OpenSEES باستخدام نموذج المادة ذاتية التمركز والموضحة في الشكل (5)، والذي تم إنشاؤها من قبل الباحثين Christopoulos وآخرون [24]. بينما تم استخدام نموذج المادة الهيستيرية لمحاكاة تأثير ذاكرة الشكل لشريط FeMnSi.



الشكل (5): نموذج مادة أحادية المحور ذاتية التمركز [24]

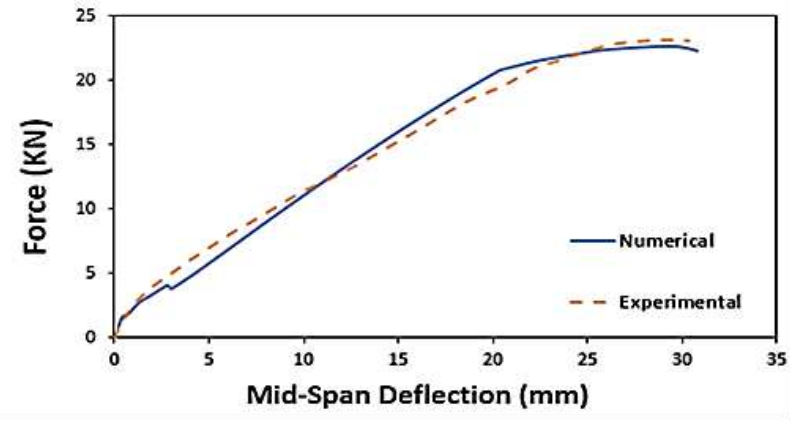
جدول (5): خصائص المواد المستخدمة في النموذج التحليلي.

نموذج المادة	الخصائص	
البيتون	اجهاد الضغط (MPa)	37.2
	التشوه عند أقصى الضغط (%)	0.002
	معامل المرونة (MPa)	28600
فولاذ التسليح الطولي	معامل يونغ (GPa)	200
	اجهاد الخضوع (MPa)	510
CFRP	معامل المرونة (GPa)	136
	اجهاد الشد الاعظمي (MPa)	1648

النتائج والمناقشة:

التحقق من صحة النموذج العددي

يُعد التحقق من صحة النموذج العددي وتوثيقه خطة أساسية لضمان موثوقية النتائج ودقتها. وذلك بهدف الحصول على مخرجات تمثل السلوك الواقعي للعناصر الانشائية. في هذه الدراسة، تم التحقق من صحة النموذج العددي من خلال نمذجة الجائز البيتوني المسلح (6–1Fb) وتحليله باستخدام برنامج OpenSEES، وذلك تحت نفس شروط التحميل التجريبي، حيث تم تطبيق نظام تحميل محكوم بالإزاحة لمحاكاة الظروف الحقيقية للاختبار.



الشكل (6): منحنيات مقارنة حمولة–انتقال بين النتائج العددية والتجريبية

يوضح الشكل السابق (6) أن النتائج العددية المحصلة من النموذج المقترح تُظهر تطابقاً جيداً مع النتائج التجريبية التي توصل إليها Yost وزملاؤه [1]. بناءً على ذلك، يمكن الاستنتاج أنّ النموذج العددي المقترح قادر على محاكاة الصلابة الابتدائية، والسلوك المرن–اللدن، بالإضافة إلى سعة التحمل القصوى للأحمال الجانبية، وذلك بدقة مقبولة. وقد بلغ الفرق بين النتائج العددية والتجريبية أقل من 2% فيما يتعلق بقدرة التحمل، مما يؤكد كفاءة النموذج العددي ودقته في تمثيل السلوك الانشائي الواقعي للجائز المدروس.

مطاوعة الجوائز المدعمة

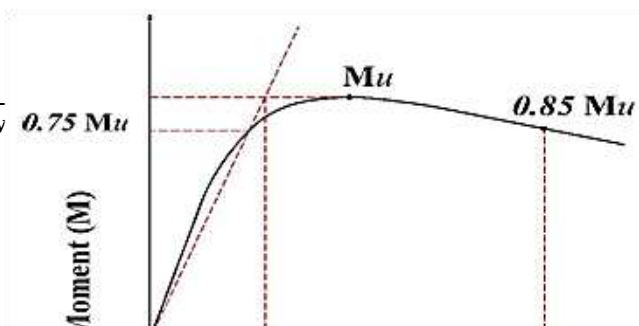
يُعرف مصطلح المطاوعة على أنه قدرة المنشأ أو العناصر الإنشائية على التشوه إلى ما بعد حدود المرونة دون أن تنهار. اعتماداً على Paulay and Priestley [25] يوجد هناك ثلاثة مصادر أساسية لمؤشرات المطاوعة ألا وهي: التشوه، الانحناء، والانتقال.

في هذه الدراسة تم اعتماد مطاوعة الانحناء أو الدوران، حيث تعتبر مطاوعة الانحناء من أكثر المصادر ملائمة للتشوهات غير المرنة. يتم حساب مطاوعة الانحناء وذلك وفقاً للعلاقة (3):

$$\mu\emptyset = \frac{\emptyset u}{\emptyset y} \qquad (3)$$

حيث أنّ ϕy وϕu يشيران إلى دوران الخضوع والدوران الأعظمي على التوالي.

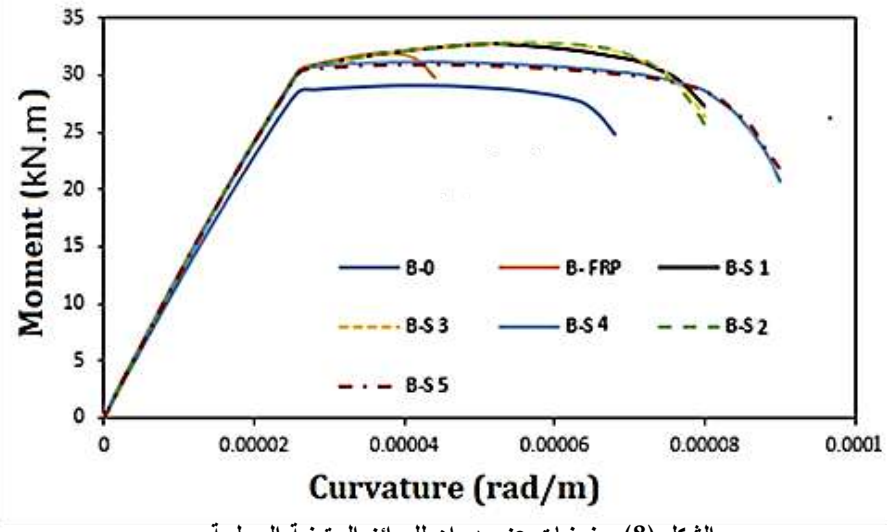
استناداً إلى المراجع والدراسات السابقة يمكن استخدام عدة طرق لحساب دوران الخضوع والدوران الأعظمي. في هذا البحث تم استخدام الطريقة التي قدمها Park (1988) [26]، حيث يوضح الشكل (7) الطريقة التي تم اختيارها لحساب كل من ϕy وϕu، حيث تم تعريف ϕy من منحني مرونة–لدونة المكافئ كنقطة تقاطع بين المستقيم الواصل من 75% من العزم الأعظمي Mu والمستقيم الأفقي المار من العزم الأعظمي Mu، بينما تم تعريف ϕu هو الدوران المقابل ل 85% من العزم الأعظمي Mu أو بافتراض أن تشوه البيتون على الضغط في الألياف العليا لمقطع الجائز البيتوني المسلح يساوي 0.004 (Park 1988) [26].



الشكل (7): تعريف دوران الخضوع والدوران الأعظمي [26]

تحليل عزم – دوران:

بعد التحقق من صحة النموذج العددي، تم اجراء تحليل عزم–دوران (Moment–Curvature) للجوائز المدروسة. يوضح الشكل (8) منحنيات العزم–الدوران للجوائز البيتونية المسلحة، بافتراض أنّ المقاطع المستوية قبل التشوه تبقى مستوية بعد التشوه. يتضح من الشكل (8) أنّ جميع الجوائز البيتونية المسلحة المدعمة أظهرت قدرة تحمل أكبر من الجائز غير المدعم (B–0)، كما أن الجائز المدعم بشرائط NSM–CFRP (B–FRP) أظهر مطاوعة أقل بكثير مقارنةً بالجوائز المدعمة بشرائط NSM–SMA، بل وحتى اقل من الجائز المرجعي غير المدعم (B–0). علاوةً على ذلك، تبين أن الجائز المدعم بشرائط NSM–FeNCATB (B–S2) أظهر قدرة تحمل أكبر بين الجوائز المدعمة، وكانت نتائجه قريبة من الجوائز (B–S3,B–S1). ويعود هذا الأداء إلى التشوه الأقصى الكبير الذي تحقق في هذا الجائز.



الشكل (8): منحنيات عزم–دوران للجوائز البيتونية المسلحة

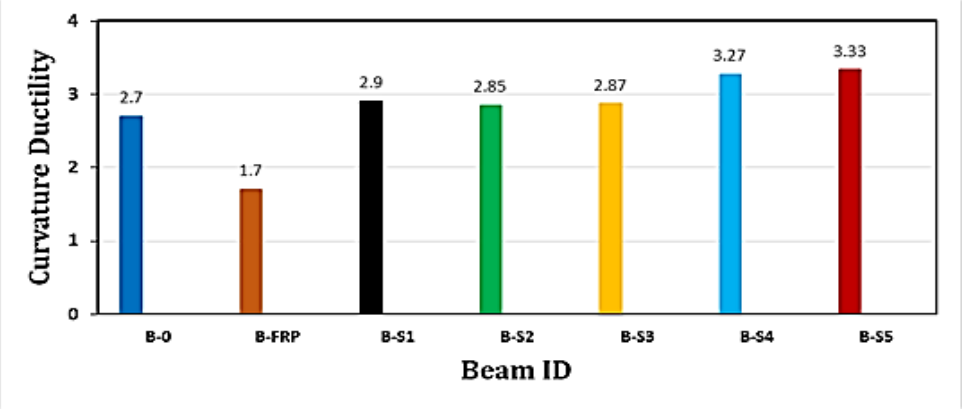
مطاوعة الانحناء للجوائز RC:

تم حساب مطاوعة الانحناء للجوائز المدروسة اعتماداً على الطريقة المقترحة من قبل Paulay and Priestley [25]، وتم عرض النتائج في الشكل (9). يتضح من الشكل أنّ مطاوعة الانحناء $\mu\emptyset$ لجميع الجوائز البيتونية المسلحة والمقواة بشرائط NSM–SMA كانت أعلى من مطاوعة الجائز المرجعي غير المدعم. في المقابل، أظهر الجائز المقوى بشرائط NSM–FRP مطاوعة أقل من الجائز غير المدعم. بالنسبة للجوائز المقواة بشرائط NSM–SMA وهي

(B–S5, B–S4, B–S3, B–S2, B–S1)، فقد كانت نسبة الزيادة في المطاوعة بالمقارنة مع الجائز المرجعي B–0 على النحو التالي: 7%، 5.5%، 6.3%، 21% و23.3% على التوالي.

أما الجائز المقوى بشرائط NSM–FRP فقد سجل انخفاضاً في مطاوعة الانحناء بنحو 37% مقارنة مع الجائز المرجعي، مما يؤكد محدودية هذه التقنية من حيث السلوك المطاوع.

وعند مقارنة الجائز B–FRP مع الجوائز المدعمة بشرائط NSM–SMA، تبين أن مطاوعة الانحناء قد تحسنت بشكل ملحوظ بنسب بلغت: 70%، 67%، 69%، 92% و95% وذلك للجوائز B–S1، B–S2، B–S3، B–S4 و B–S5 على التوالي، ما يدل على فعالية سبائك SMA في تحسين السلوك المطاوع.



الشكل (9): مطاوعة الانحناء للجوائز البيتونية المسلحة

كما يتضح من الشكل السابق، فإن مطاوعة الانحناء للجائز B–S5 بلغت 3.33 وهي الأعلى بين جميع الجوائز المدعمة بشرائط NSM–SMA، حيث تجاوزت مطاوعة الجوائز B–S1، B–S2، B–S3، B–S4 بنسبة 13%، 14.4%، 13.8% و1.8% على التوالي. ويعزى هذا الأداء المميز للجائز B–S5 إلى الانخفاض الكبير في نسبة التشوه المرن للسبيكة FeMnSi والتي تساوي تقريباً 0.00287، مما أدى إلى دوران صغير وزيادة في المطاوعة. من جهة أخرى، أظهرت النتائج أنّ الجائز B–S2 سجل أدنى مطاوعة انحناء، بلغت حوالي 2.85 مقارنة مع باقي الجوائز المدعمة بشرائط NSM–SMA.

بناء على ما سبق، يمكن الاستنتاج أن الجائز المدعم بشرائط NSM–FeMnSi أظهر أداءً أفضل من حيث مطاوعة الانحناء وقابلية التشوه، مقارنة بباقي الجوائز. وعلى أي حال، فقد أظهرت جميع الجوائز المدعمة بشرائط NSM–SMA مطاوعة انحناء أعلى من الجائز المرجعي غير المدعم، حيث بلغت الزيادة النسبية في المطاوعة: 9% للجائز B–S1، 11% للجائز B–S2، 8% للجائز B–S3، و2% للجائز B–S4.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

في هذا البحث، تم إجراء دراسة تحليلية لبيان كفاءة تقنية NSM–SMA في تحسين سلوك الانعطاف (التحكم بالمطاوعة) للجوائز البيتونية المسلحة، وذلك باستخدام برنامج العناصر المنتهية OpenSEES. شملت الدراسة

استخدام خمسة أنواع مختلفة من سبائك SMA كوسيلة تدعيم، وتم تحليل أثرها على المطاوعة مقارنة بالتقنيات التقليدية NSM–FRP.

فيما يلي أبرز النتائج المستخلصة من الدراسة التحليلية:

1) تم التحقق من صحة النموذج العددي من خلال مقارنته مع نتائج تجريبية منشورة، عن طريق استخدام برنامج OpenSEES. أظهرت المطابقة دقة عالية، مع اختلاف لم يتجاوز 2%.

2) أظهرت الجوائز المدعمة باستخدام تقنية NSM–SMA تحسناً ملحوظاً في المطاوعة مقارنة بكل من الجائز المرجعي غير المدعم والجائز المدعم باستخدام تقنية NSM–FRP.

3) بينت النتائج أن الجائز المدعم بتقنية NSM–FRP لم يحقق متطلبات المطاوعة التي ينص عليها الكود الأوروبي Eurocode 8، بينما ساهمت تقنية NSM–SMA في رفع مطاوعة الجوائز إلى حدود مقبولة أو أعلى.

4) تميّز الجائز المدعم بتقنية NSM–FRP بصلابة عالية انعكست سلباً على مطاوعته، وهو ما يُعد غير مرغوب به في المناطق الزلزالية، على عكس الجوائز المدعمة بشرائط SMA التي أظهرت استجابة أفضل بفضل الخصائص الفريدة لتلك المواد.

5) من بين جميع أنواع سبائك SMA المستخدمة، كانت الشرائط المصنوعة من FeMNAlNi وFeMnSi الأفضل أداءً من حيث تحسين مطاوعة الجوائز البيتونية المسلحة.

6) أدت تقنية NSM–SMA إلى زيادة مطاوعة الانحناء بنسبة تجاوزت 90% في بعض الحالات، حيث بلغت الزيادة 95% في الجائز المدعم بشريط FeMnSi.

التوصيات للدراسات المستقبلية:

استنادًا إلى النتائج التي تم التوصل إليها في هذه الدراسة العددية، يمكن اقتراح التوصيات التالية لتوجيه الأعمال البحثية المستقبلية:

- ركزت هذه الدراسة على تقييم كفاءة أنواع مختلفة من شرائط NSM–SMA في تحسين سلوك الانعطاف والسلوك الزلزالي للجوائز البيتونية المسلحة. يوصى بإجراء دراسات تجريبية لاحقة للتحقق من فعالية هذه التقنية عمليًا وتعزيز النتائج العددية.
- تم تطبيق تقنية NSM–SMA في هذا البحث على جوائز بيتونية مسلحة ذات استناد بسيط فقط .لذلك، ينصح بدراسة سلوك الجوائز المستمرة والمقواة باستخدام هذه التقنية في أبحاث مستقبلية لتوسيع نطاق تطبيقها.
- يوصى بتطوير إرشادات تصميم زلزالي قائمة على الأداء (Performance–Based Seismic Design Guidelines) للجوائز البيتونية المسلحة المدعّمة بشرائط SMA بأنواعها المختلفة، مما يسهم في إدخال هذه التقنية ضمن الممارسات الهندسية المعتمدة.
- في الدراسات المستقبلية، ينبغي دراسة تأثير بارامترات أخرى مثل المقاومة المميزة للبيتون ونسبة تسليح الفولاذ، بهدف فهم مدى تأثيرها على زيادة المطاوعة وتحسين أداء الجوائز المدعّمة باستخدام تقنية NSM–SMA.

References:

[1] J.R. Yost, S.P. Gross, D.W. Dinehart and J.J. Mildenberg. Flexural behavior of concrete beams strengthened with near-surface-mounted CFRP strips. ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 4, p. 430, 2007.

[2] R. Ghalia. Development of strengthening methods for reinforced concrete beams against flexure using FRP composites. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies – Engineering Sciences Series, Vol. 39, No. 5, 2017. (in Arabic)

[3] C. Bakis, L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, A. Machida, S. Rizkalla and T. Triantafillou. Fiber-reinforced polymer composites for construction – state-of-the-art review. Journal of Composites for Construction, Vol. 6, No. 2, pp. 73–87, 2002.

[4] R. El-Hacha and M. Gaafar. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface mounted CFRP bars. PCI Journal, Vol. 56, No. 4, pp. 134–151, 2011.

[5] R. El-Hacha and S.H. Rizkalla. Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. Structural Journal, Vol. 101, No. 5, pp. 717–726, 2004.

[6] M.A. Badawi. Monotonic and fatigue flexural behaviour of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP rods. 2007. Available at: http://hdl.handle.net/10012/2997.

[7] S.M. Soliman, E. El-Salakawy and B. Benmokrane. Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 37, No. 10, pp. 1371–1382, 2010.

[8] A. Astorga, H. Santa Maria and M. Lopez. Behavior of a concrete bridge cantilevered slab reinforced using NSM CFRP strips. Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 461–472, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.095.

[9] M. Shahverdi, C. Czaderski and M. Motavalli. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. Construction and Building Materials, Vol. 112, No. 38, pp. 28–38, 2016.

[10] A. Abbass, R. Attarnejad and M. Ghassemieh. Seismic assessment of RC bridge columns retrofitted with near-surface mounted shape memory alloy technique. Materials, Vol. 13, No. 7, p. 1701, 2020.

[11] K. Hong, S. Lee, Y. Yeon and K. Jung. Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with near-surface-mounted Fe-based shape-memory alloy strips. Int. J. Concr. Struct. Mater., Vol. 12, No. 1, p. 45, 2018.

[12] A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi and M. Motavalli. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: an overview. Construction and Building Materials, Vol. 63, pp. 281–293, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.032.

[13] Y.M. Yeon, K.N. Hong, S. Lee and S.W. Ji. Numerical study of RC beams strengthened with Fe-based shape memory alloy strips using the NSM method. Appl. Sci., Vol. 11, No. 15, p. 6809, 2021.

[14] S. Abouali, M. Shahverdi, M. Ghassemieh and M. Motavalli. Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys. Engineering Structures, Vol. 187, pp. 133–148, 2019. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.060.

[15] Y. Araki, T. Endo, T. Omori, Y. Sutou, Y. Koetaka, R. Kainuma and K. Ishida. Potential of superelastic Cu-Al-Mn alloy bars for seismic applications. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 40, No. 1, pp. 107–115, 2011.

[16] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott and G.L. Fenves. OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264(1), pp. 137–158, 2006.
[17] European Committee for Standardization. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004). Brussels: CEN, 2004.
[18] A.M. Billah and M.S. Alam. Performance-based seismic design of shape memory alloy-reinforced concrete bridge piers. I: development of performance-based damage states. Journal of Structural Engineering, Vol. 142, No. 12, p. 4016140, 2016.
[19] M. Ghassemieh, M. Mostafazadeh and M.S. Sadeh. Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 23, pp. 535–543, 2012. DOI: 10.1177/1045389x12436731.
[20] Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori and K. Ishida. Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity. Science, Vol. 327, No. 5972, pp. 1488–1490, 2010.
[21] K.C. Shrestha, Y. Araki, T. Nagae, Y. Koetaka, Y. Suzuki, T. Omori, Y. Sutou, R. Kainuma and K. Ishida. Feasibility of Cu-Al-Mn superelastic alloy bars as reinforcement elements in concrete beams. Smart Materials and Structures, Vol. 22, No. 2, p. 25025, 2013.
[22] T. Omori, K. Ando, M. Okano, X. Xu, Y. Tanaka, I. Ohnuma, R. Kainuma and K. Ishida. Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys. Science, Vol. 333, No. 6038, pp. 68–71, 2011.
[23] D.C. Kent and R. Park. Flexural members with confined concrete. Journal of the Structural Division, Vol. 97, No. 7, pp. 1969–1990, 1971.
[24] C. Christopoulos, R. Tremblay, H-J. Kim and M. Lacerte. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation. Journal of Structural Engineering, Vol. 134, No. 1, pp. 96–107, 2008.
[25] T. Paulay and M.N. Priestley. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. Vol. 25, No. 4, pp. 362, 1992.
[26] R. Park. Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. In Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 605–616, 1988.